

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CAMPUS DE RIO CLARO

MACIÇOS ROCHOSOS EM PROJETOS HIDRELÉTRICOS:
PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

João Batista de Mesquita

Orientador: José Alexandre J. Perinotto

Co-orientador: André Pacheco de Assis

Tese de Doutorado elaborada junto ao
Programa de Pós-Graduação em
Geociências e Meio Ambiente para
obtenção do título de Doutor em
Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)

2008

550 Mesquita, João Batista de
M582m Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação
geomecânica / João Batista de Mesquita. - Rio Claro : [s.n.], 2008
269 f. : il., figs., gráfs., formulários, fots., tabs., mapas

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Geociências e Ciências Exatas
Orientador: José Alexandre J. Perinotto
Co-orientador: André Pacheco de Assis

1. Geologia. 2. Maciço rochoso. 3. Hidrelétrica. 4. Geografia física –
Aspectos ambientais. I. Título.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. André Pacheco de Assis

Dr. Adalberto Aurélio Azevedo

Dr. Fábio Soares Guimarães

Prof. Dr. Leandro Eugênio da Silva Cerri

Prof. Dr. Vanderlei Maniesi

Doutorando: João Batista de Mesquita

Rio Claro, 17 de novembro de 2008

Resultado: Aprovado

*Dedico esta tese à minha família:
aos meus filhos Vandré, Cybelle, Thalita e Elisa, que
mesmo à distância torceram por esta vitória;
à minha esposa, Adriana Emerick de Paiva, com seu
lado espiritual, muito presente na luta do dia-a-dia,
sofrido, com muita compreensão e sempre com
muito amor;
e, finalmente, aos meus verdadeiros amigos, tantos,
que não cabem aqui citações nominais.*

Agradeço em primeiro lugar a Deus, absoluto e soberano criador, pela vida, esperança e criatividade.

À Furnas Centrais Elétricas SA na pessoa do engenheiro Dionésio Werner Júnior, pelo apoio e confiança depositada.

Ao meu orientador e amigo José Alexandre J. Perinotto, pela sua dedicação na análise e orientação, sobretudo na etapa final do desenvolvimento da tese.

Ao co-orientador e amigo, André Pacheco de Assis, por dedicar seu tempo precioso, com sua orientação profissional e acadêmica.

À todos os profissionais e amigos, que participaram comigo dos trabalhos do Complexo Hidrelétrico do rio Madeira e da UHE Serra do Facão, que direto ou indiretamente contribuíram no desenvolvimento desta tese.

Ao ilustre amigo Professor Dr. Gerson Flores, com sua simplicidade e competência no apoio e formatação final da tese.

Ao Sérgio Luis Gato, pelo aplicado e competente trabalho técnico das figuras e formatação do texto e ao Renato Batista de Oliveira, pela participação na execução dos ensaios geomecânicos.

Já se passaram três décadas, vislumbro o futuro e vejo o presente como prêmio à minha inteira dedicação profissional, fruto de um passado muito rico de oportunidades e conhecimentos. Sinto-me honrado da convivência com dezenas de profissionais, engenheiros, geólogos e técnicos, que juntos buscamos o melhor, para as empresas, os empreendimentos e nossas famílias; uma árdua tarefa de se relacionar e trabalhar nos canteiros de obra - a todos, o meu muito obrigado.

Resumo

Desenvolveu-se proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para uso em projetos e obras de hidrelétricas a céu aberto, tendo como base estrutural o sistema *Rock Mass Rating* (RMR), proposto por Bieniawski (1989), para aplicação nas fases de: viabilidade e projeto básico, e projeto executivo (obras civis), direcionado, sobretudo para as atividades de preparo, tratamento e liberação das fundações. Os parâmetros classificatórios, simples e consagrados no meio técnico, são obtidos por meio de procedimentos metodológicos e pesquisa comumente empregados, tendo como estudo de casos os Aproveitamentos Hidrelétricos Jirau e Serra do Facão, localizados no rio Madeira, município de Porto Velho-RO e rio São Marcos em Catalão-Go, Brasil. O sistema básico foi testado e avaliado nos dois projetos hidrelétricos citados e ainda foram demonstradas incoerências do sistema RMR, na obtenção e aplicação dos pesos relativos dos parâmetros fraturamento e Rock Quality Designation (RQD), tendo sido solucionadas na presente tese. Introduziu-se de forma inédita como parâmetro de ajuste com pesos positivos, os tratamentos de fundação aplicados, que deverá ser objeto de calibração em projetos e obra em curso, que poderá servir para avaliar o coeficiente de segurança de determinada estrutura, por meio do ganho que é submetido o maciço rochoso tratado dos índices e parâmetros geotécnicos. Os parâmetros e pesos da classificação da fase de projeto são revistos e ou determinados para a classificação fase de obras, durante o preparo e liberação da fundação, e nessa oportunidade pode-se reavaliar as especificações técnicas e aplicabilidade do projeto executivo, nessa área específica. Demonstrou-se a metodologia de obtenção de parâmetros geomecânicos, testou-se e avaliou-se nos casos citados a Proposta Classificação Geomecânica e, finalmente correlacionou-se com o sistema RMR e *Geological Stress Index* (GSI), com foco na possibilidade de obtenção de parâmetros com lógica matemática. Ressaltam-se a importância das classificações geomecânicas, comparando-as e questionando os métodos empregados de caracterização e compartimentação de maciços rochosos, e os reflexos nas prospecções e pesquisas para projetos hidrelétricos.

Palavras-chave: classificação geomecânica, maciço rochoso, hidrelétrica.

Abstract

There has been developed geomechanic classification of rock mass for outdoors use in projects and works of hydroelectrics, having as structural basis the Rock Mass Rating (RMR) System, proposed by Bieniawski (1989), for application in the phases of viability and basic project, and executive project (civil works) mainly directed for the activities of preparation, treatment and liberation of the foundations. The classificatory parameters, simple and consecrated in technical environment, are obtained from methodological procedures and researches, having as cases of study Jirau and Serra do Facão Hydroelectric Uses located in the Madeira River, in the region of the city of Porto Velho-RO and in São Marcos River, in Catalão-GO, Brazil. The basic system was tested and appraised in the two mentioned hydroelectric projects and incoherences of the system were still demonstrated RMR, in the obtaining and application of the relative weights of the parameters Fracturement and Rock Quality Designation (RQD), having been solved in the present thesis. It was introduced in an unpublished way as adjustment parameter with positive weights, the applied foundation treatments, that should be calibration object in projects and work in course, that it can be to evaluate safety's certain structure coefficient, through the earnings that is submitted the rocky solid agreement of the indexes and parameters geotechnics. The parameters and weights of the classification of the project phase are reviewed and or certain for the classification phase of works, during the preparation and liberation of the foundation, and in that opportunity it can be revalued the technical specifications and aplicabilidade of the executive project, in that specific area. The methodology of obtaining of parameters geomechanics was demonstrated, it was tested and it was evaluated in the mentioned cases the developed geomechanic classification and, finally it was correlated with the system RMR and Geological Stress Index (GSI), with focus in the possibility of obtaining of parameters with mathematical logic. They are pointed out the importance of the classifications geomechanics, comparing them and questioning the employed methods of characterization and compartment of rock mass, and the reflexes in the searches and researches for hydroelectric projects and the reflexes in the searches and researches for hydroelectric projects.

Key words: Geomechanic classification, mass rock, hydroelectric.

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1. Grau de alteração	21
2.2. Grau de coerência	21
2.3. Grau de fraturamento	21
2.4. Persistência das descontinuidades	21
2.5. Classe de permeabilidade e correlação com a perda d'água específica	22
2.6. Convenções para classificação de descontinuidades do maciço rochoso em sondagens mecânicas e mapeamentos geológico-geotécnicos.	22
2.7. Qualidade do Maciço Rochoso a partir do RQD.	26
2.8. Índice da família de juntas (J_n).	30
2.9. Índice de rugosidade das juntas (J_r).	30
2.10. Índice de alteração das paredes das fraturas (J_a).	31
2.11. Índice do caudal afluyente J_w	31
2.12. Índice do estado de tensão do maciço (SRF).	32
2.13. Qualificação do maciço rochoso do sistema Q.	33
2.14. Índice de suporte (ESR) por tipo de escavação	33
2.15. Categorias de suporte permanentes conforme Figura 2.3.	34
2.16. Parâmetros e respectivos pesos da classificação geomecânica RMR (1989).	39
2.17. Caracterização da condição das descontinuidades RMR (1989).	39
2.18. Ajuste da orientação das descontinuidades RMR (1989).	40
2.19. Classes de maciços rochosos RMR (1989).	40
2.20. Método de escavação e suporte para túneis com 10m de largura RMR (1989).	41
2.21. Parâmetros de classificação do sistema MR.	42
2.22. Classificação de maciços rochosos fraturados, classe de MR e definição de suporte.	44
2.23. Valores do fator de rugosidade (JR) do RM_i	46
2.24. Fator de tamanho e continuidade (JL) do RM_i	46
2.25. Fator de alteração da descontinuidade (JA) do RM_i	47
2.26. Classificação do RM_i	47
2.27. Fatores de ajustes do índice SMR, F1, F2 e F3.	48
2.28. Fator de ajuste F4, função do método de escavação.	49
2.29. Ponderação do SMR.	49
2.30. Classes de maciço do SMR e previsão dos tratamentos de taludes.	49
2.31. Relação entre WR e Ru.	50

2.32. Ponderação dos parâmetros da rocha intacta (m_i e σ_{ci}), quando aplicado o ábaco de maciço rochoso heterogêneo (tipo “ <i>Flysch</i> ” da Figura 2.8).....	54
3.1. Ensaio utilizado para caracterização de rocha intacta.....	62
3.2. Classificação de rochas em função da resistência à compressão uniaxial.....	67
3.3. Estimativa da resistência de material rochoso.....	68
3.4. Critérios de resistência normalmente utilizados para descontinuidades, em função da abertura e do preenchimento	71
3.5. Estimativa do ângulo de atrito básico por tipo de rocha.....	72
3.6. Critérios de resistência normalmente aceitos para cada tipo de material rochoso.....	79
3.7. Estimativa dos valores de m_i	86
5.1. Aproveitamento Hidrelétrico (UHE) Jirau - Quantitativos principais de serviços das obras civis.....	105
5.2. UHE Serra do Facão- Síntese de quantidade das obras civis.....	119
5.3. Compartimentação do maciço rochoso fase de projeto básico.....	126
6.1. Avaliação do maciço rochoso do AHE Jirau por meio dos sistemas: MR, RMR, Q e R _{Mi}	132
6.2. Correlações empíricas entre os sistemas Q, MR e RMR para o maciço rochoso da barragem de concreto.....	133
6.3. AHE Jirau: Descontinuidade sub-vertical - Estimativa de parâmetros geomecânicos...	135
6.4. AHE Jirau: Descontinuidade sub-vertical - dados obtidos da envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal	138
6.5. AHE Jirau: Descontinuidade sub-horizontal- Estimativa de parâmetros geomecânicos	139
6.6. UHE Serra do Facão: Características das descontinuidades e correlação com os índices de rugosidade e alteração do sistema Q de Barton <i>et al.</i> (1974)	141
6.7. AHE Serra do Facão – Casa de Força, parede esquerda: Descontinuidade sub-horizontal - Estimativa de parâmetros geomecânicos	143
6.8. UHE Serra do Facão: Descontinuidade sub-horizontal - Parâmetros da envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal e da Tensão cisalhante x Tensão normal ..	144
6.9. UHE Serra do Facão: Descontinuidade sub-horizontal no Muro de encontro jusante - Estimativa de parâmetros geomecânicos	145
6.10. Determinação de parâmetros da descontinuidade, a partir de medições de campo... ..	147
6.11. AHE Serra do Facão – Barragem da margem direita: Descontinuidade de elevado mergulho - Estimativa de parâmetros geomecânicos.....	150
6.12. Ângulo atrito básico(ϕ_b) determinado nos xistos da UHE Serra do Facão.....	151
7.1. Índice alteração/coerência, correlação com ensaios de resistência à compressão	

simples e pesos relativos adotados na classificação proposta (CGM).....	154
7.2. Parâmetros resistência da rocha intacta branda e pesos relativos adotados na classificação.....	154
7.3. Grau de faturamento e peso relativo	155
7.4. RQD e os pesos relativos na classificação	155
7.5. Características das discontinuidades e pesos adotados na classificação	155
7.6. Classes de permeabilidade e pesos relativos adotados.....	156
7.7. Ajuste das discontinuidades e pesos adotados.	156
7.8. Parâmetros/índices classificatórios e pesos relativos para determinação da classe do maciço rochoso da proposta classificação geomecânica para as fases de projeto viabilidade e básico	157
7.9. Determinação da classe do maciço rochoso para as fases de estudos de viabilidade e projeto básico	158
7.10. Tamanho dos blocos em função da densidade de discontinuidades por volume e peso relativo adotado	160
7.11. Ajustes decorrentes de tratamento superficiais e subsuperficiais	164
7.12. Parâmetros/índices classificatórios e pesos relativos para determinação da classe do maciço rochoso	165
7.13. Abrangência dos pesos relativos e correspondentes classes de maciço rochoso	165
7.14. AHE Jirau Barragem de concreto: síntese do resultado da classificação geomecânica maciço rochoso, fase de viabilidade e projeto básico	167
7.15. AHE Jirau Tomada d'água/ Casa de força: Classificação do maciço rochoso, fase de viabilidade e projeto básico	167
7.16. UHE Serra do Facão Barragem de concreto: Síntese da CGM (básica)	173
7.17. UHE Serra do Facão Barragem de concreto: Proposta de classificação geomecânica do maciço rochoso (CGM) fase de projeto executivo (obra)	173
7.18. UHE Serra do Facão Barragem de concreto: Proposta de classificação geomecânica do maciço rochoso fase de projeto executivo (obra)	173
7.19. UHE Serra do Facão – Barragem da margem direita: Proposta de classificação geomecânica do maciço rochoso (CGM)	174
7.20. UHE Serra do Facão – Barragem da margem direita Proposta (CGM) do maciço rochoso fase de projeto executivo (obra) Ajustes com a aplicação dos tratamentos de fundação	175
7.21. UHE Serra do Facão Barragem da margem direita: Proposta de classificação geomecânica do maciço rochoso fase de projeto executivo (obra).....	176

7.22. AHE Jirau - Barragem de concreto: GSI e Módulo de deformabilidade estimados com base na CGM	180
7.23. AHE Jirau - Tomada d'água/Casa de força: GSI e do módulo de deformabilidade estimados obtidos com base na CGM.....	181
7.24. UHE Serra do Facão - Barragem de concreto: Determinação do GSI e do Módulo de deformabilidade do maciço rochoso (Em) por meio da CGM	182
7.25 UHE Serra do Facão - Barragem do leito do rio e da margem direita: Determinação do GSI e do Módulo de deformabilidade do maciço rochoso (Em) por meio da CGM.).	182
7.26. Elementos da regressão linear do maciço rochoso do AHE Jirau e da UHE Serra do Facão, para CGM - fase de projeto básico e o índice RMR (Bieniawski 1989).....	185

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Método de medir o espaçamento de descontinuidades com uso da trena.	18
2.2. Forma de medir e calcular o RQD.....	28
2.3. Classes de suporte permanentes definidas para o sistema Q.....	35
2.4. Ábaco para determinação do período de estabilidade sem revestimento do RMR.....	38
2.5. Classificação de maciços rochosos fraturados do MR: Seção tipo esquemática.	43
2.6. Sistema MR - Ábaco para determinação do K.....	43
2.7. GSI - Ábaco para maciços rochosos fraturados e homogêneos.....	57
2.8. GSI - Ábaco para maciços rochosos heterogêneos.	58
3.1. Efeito escala entre tamanho da obra e grau de fraturamento do maciço rochoso.....	60
3.2. Ensaio de compressão simples em corpo de prova de sondagem em riolito do Jirau.....	64
3.3. Apresentação de resultado de ensaio de compressão triaxial de amostra de sondagem....	65
3.4. Gráfico tensão x deformação com a representação das retas que determinam os módulos secantes e tangente.....	66
3.5. Casa de Força, parede esquerda - amostragem.....	69
3.6. Bloco extraídos com descontinuidades sub- horizontais	69
3.7. Local de extração de bloco cilíndrico com junta SH	69
3.8. Conjunto de equipamentos utilizados no ensaio de cisalhamento direto	70
3.9. Apresentação dos resultados de ensaio de cisalhamento	70
3.10. Efeito de abertura (a) da amplitude (f) da rugosidade e do preenchimento no comportamento de descontinuidades.	71
3.11. Ensaio de resistência ao deslizamento em plano inclinado (tilt test).....	72
3.12. Montagem de corpos de prova do ensaio em rampa inclinada.	72
3.13. Perfis de rugosidade padrão e os respectivos intervalos de valores para estimativa para estimativa visual de JRC_{10} , na escala de 10cm	74
3.14a. Método de medir a amplitude da rugosidade e comprimento do perfil da descontinuidade para determinação da faixa de valores de JRC.....	74
3.14b. Ábaco para determinação da faixa de valores de JRC a partir da amplitude da rugosidade e comprimento do perfil da descontinuidade.	75
3.15. Detalhe da leitura com o Esclerômetro de Schmidt em descontinuidades sub-vertical..	76
3.16. Ábaco de correlação para obtenção da resistência a compressão	76
3.17. Gráfico demonstrativo do efeito escala de JRC e JCS.	78
3.18. Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.	80

3.19. Representação do Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.	81
3.20. Envoltórias de ruptura de pico e residual no espaço de Mohr-Coulomb.	81
3.21. Envoltórias de ruptura de descontinuidades.	83
3.22. Correlação entre o módulo de deformabilidade e o índice Q.	89
3.23. Correlação entre o módulo de deformabilidade e o índice GSI.....	90
5.1. Localização das áreas de estudo de caso, AHE Jirau, no rio Madeira, RO, estado de Rondônia e a UHE Serra do facão no rio São Marcos, estado de Goiás.	100
5.2. Croqui de localização dos aproveitamentos hidrelétricos do Complexo do Rio Madeira e Detalhe da Turbina tipo Bulbo a serem utilizadas nos AHE Jirau e Santo Antônio....	101
5.3. AHE Jirau: Arranjo das obras civis em planta.....	102
5.4. AHE Jirau: Tomada D' água e Casa de Força – corte típico.....	103
5.5. AHE Jirau: Barragem do leito do rio e ensecadeiras incorporadas	103
5.6. AHE Jirau: Vertedouro – corte típico.	104
5.7. AHE Jirau: Coluna lito- estratigráfica regional..	106
5.8. AHE Jirau: Mapa geológico regional.....	107
5.9. Amostra SR296 (profundidade:10,36-10,52m) Fotomicrografia.	108
5.10. Características mesoscópicas dos conglomerados da formação Palmeiral	110
5.11. Arenito arcossiano com estratificação cruzada planar.....	110
5.12. Arenito ardossiano e arenito – conglomerático da Formação Palmeiral.	111
5.13. Mapa Geológico local	112
5.14. Caixa de falha no riolito, do rio Madeira, imediatamente a jusante da cachoeira do Jirau, região do canal de restituição do vertedouro	113
5.15. Contorno dos pólos dos planos- Família de descontinuidades de elevado mergulho (NW-SE). Família NW – SE.	114
5.16. Diagrama de Roseta – direção preferencial dos planos.....	114
5.17. Família NW-SE – Fratura persistente, apresentando deslocamento de blocos na superfície, atitude N35°W/80°NE.	114
5.18. Contorno dos pólos dos planos da família NE-SW de elevado mergulho.	115
5.19. Diagrama de Roseta – direção preferencial dos planos.....	115
5.20. Fraturas sub-paralelas, sub-verticais, com atitude N45° E/88°SE. O plano superior é a lapa de fratura sub-horizontal	115
5.21. Família Sub-horizontal - Sub-paralelo, superfície irregular, ondulada, lapa de uma sub-horizontal, espaçamento de 1 a 2 m.	116
5.22. Família SH aberto associado aos outros sistemas ortogonais, na margem direita à jusante da Casa de Força.	116

5.23. Contorno dos pólos dos planos. Sistemas de baixo mergulho.....	117
5.24. Família de descontinuidades de baixo mergulho. Diagrama de roseta.....	117
5.25. Fraturas Inclínadas de baixo mergulho. Sistema sub-paralelo, inclínado para margem direita, aberto em superfície, espaçamento de 0,50 a 2 m, atitude N50°E/30°SE.	117
5.26. Contorno dos pólos dos planos geral das famílias do AHE Jirau. N=224.	118
5.27. Diagrama de roseta – direção preferencial dos planos geral das famílias.....	118
5.28. Vista geral das famílias de descontinuidades em uma única tomada. Região da Barragem de concreto.	118
5.29. UHE Serra do Facão: Arranjo das obras civis - planta	120
5.30. UHE Serra do Facão: Tomada d' água e casa de força.....	121
5.31. UHE Serra do Facão: Vertedouro, implantado sobre a barragem de CCR	121
5.32. UHE Serra do Facão: Barragem margem direita- seção transversal Est.14+00.	122
5.33. UHE Serra do Facão: Barragem margem direita- seção transversal Est.8+00	122
5.34. UHE Serra do Facão - Mapa geológico regional	125
5.35. UHE Serra do Facão- Mapa geológico local.	127
5.36. Contorno dos pólos dos planos geral de descontinuidades N= 342.....	128
5.37. Diagrama de Roseta – direção preferencial dos planos geral de descontinuidades.	128
5.38. Região dos blocos 8 e 9 da barragem de concreto - Sistemas SV, SH e I.....	129
5.39. Emboque do túnel – sistemas predominantes SV e SH.....	129
5.40. Barragem MD, estaca 14 - 50m/jus. Descontinuidades SH, SV e I (inclínado) de média inclinação..	129
5.41. Muro de encontro montante (El. 670), parede NW – descontinuidade sub-horizontal.129	
6.1. Correlação entre os índices Q e RMR.....	134
6.2. Descontinuidade da família NW-SE, objeto de determinação de parâmetros geomecânicos.....	136
6.3. Família NW-SE vista de jusante na margem direita, atitude: N50°E/80°SE.....	136
6.4. Determinação do índice de rugosidade em descontinuidade sub-vertical em testemunho de sondagem.....	137
6.5. Descontinuidade sub-vertical (SV) - Envoltória do ângulo de atrito de pico x tensão normal.....	138
6.6. Descontinuidade sub-vertical (SV) – Envoltória: Tensão Cisalhante x Tensão Normal.....	138
6.7. Descontinuidade da família sub-horizontal, plano ondulado, irregular, com direção variada mergulhando suavemente para NE.....	139

6.8. Perfis de rugosidade (BARTON e CHOUBEY, 1978).....	139
6.9. Descontinuidade sub-horizontal – Envoltória: Ângulo de Atrito de Pico x Tensão Normal.....	140
6.10. Descontinuidade SH: Envoltória: Tensão Cisalhante x Tensão Normal.....	140
6.11. Descontinuidade sub-horizontal na parede esquerda da Casa de Força.....	142
6.12. Junta sub-horizontal na parede esquerda da Casa de Força - Detalhe.....	143
6.13. Envoltória: Tensão normal (σ_n) x Ângulo de atrito de pico $\phi(p)$	144
6.14. Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal.	144
6.15. Determinação da rugosidade de um trecho da junta sub-horizontal	146
6.16. Determinação da rugosidade de junta sub-horizontal com uso de escalímetro.	146
6.17. Determinação da rugosidade de junta sub-horizontal por meio de levantamento topográfico de precisão..	147
6.18. Envoltória: Tensão normal (σ_n) x Ângulo de atrito de pico $\phi(f)$	148
6.19. Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal.	148
6.20. Descontinuidade da família de elevado mergulho com plano ondulado, irregular.....	149
6.21. Perfis de rugosidade.....	149
6.22. Envoltória: Tensão normal (σ_n) x Ângulo de atrito de pico.	150
6.23. Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal.	151
7.1. Descontinuidades e irregularidades do maciço rochoso e tratamentos superficiais Aplicados.	162
7.2. AHE Jirau Barragem de concreto – Mapeamento e Seção Geológico-Geotécnica	168
7.3. AHE Jirau Tomada D'água/Casa de Força – Mapeamento e Seção Geológico-Geotécnica	169
7.4. UHE Serra do Facão Bloco 6, 7 e Muro de Encontro – Mapeamento Geológico-Geotécnico.	171
7.5. UHE Serra do Facão Muro de Encontro – Seções Geológico-Geotécnicas.....	172
7.6. UHE Serra do Facão Barragem margem direita - Mapeamento Geológico-Geotécnico.....	177
7.7. UHE Serra do Facão Barragem margem direita – Seção Geológico-Geotécnica.....	178
7.8. UHE Serra do Facão Barragem margem direita – Seções Geológico-Geotécnicas.....	179
7.9. Fundação no núcleo da barragem no leito do rio mica-xisto com CGM (classe III, 60 pontos), em fase inicial de lançamento do concreto dental.	175
7.10. Fundação no núcleo da barragem no leito do rio em mica-xisto classe III, com a execução dos tratamentos previstos atinge a CGM (classe II, 73 pontos).....	175
7.11. Correlação do maciço rochoso da UHE Serra do Facão, sondagens SR102,	

SRBL-02 e SRBL-04, para CGM-fase de projeto básico e o índice RMR, de Bieniawski (1989).....	183
7.12. Regressão linear entre os sistemas de classificação geomecânica CGM e RMR. Gráfico (a) maciço rochoso do AHE Jirau; Gráfico (b) maciço rochoso da UHE Serra do Facão e Gráfico (c) os maciços dos dois projetos.....	184

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 Estudos anteriores.....	03
1.2 Objetivo.....	09
1.3 Justificativa técnicas	09
1.4 Organização do trabalho.....	11
2. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Rocha e maciço rochoso	13
2.2 Caracterização e classificação geomecânica.....	14
2.3 Considerações sobre algumas classificações de maciços rochosos existentes	22
2.4 Sistemas de classificação de maciço rochoso	25
2.5 Geological Stress Index (GSI) -Índice de Resistência Geológica	51
3. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DE MACIÇOS ROCHOSOS - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	59
3.1 Aspectos do maciço rochoso e da rocha intacta.....	59
3.2 Investigação para determinação de parâmetros geomecânicos do maciço rochoso..	61
3.3 Parâmetros geomecânicos de descontinuidades do maciço rochoso.....	68
3.4 Critérios de resistência da rocha intacta,descontinuidades e do maciço rochoso	78
3.5 Correlações empíricas	87
4. MÉTODOS E ETAPAS	91
4.1 Desenvolvimento da pesquisa – Etapa 1: Coleta de dados.....	91
4.2 Desenvolvimento da pesquisa- Etapa 2: Tratamento dos dados.....	93
4.3 Desenvolvimento da pesquisa- Etapa 3: Sistematização dos dados e conclusões.....	94
5. CONHECIMENTO DO MEIO FÍSICO – ESTUDO DE CASOS	98
5.1 Considerações gerais	98
5.2 Localização das áreas do estudo de casos.....	99
5.3 AHE Jirau	100
5.4 UHE Serra do Facão.....	118
6. CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS – ESTUDO DE CASOS	130
6.1 Análises dos parâmetros classificatórios.	130
6.2 Escolha da base estrutural da proposta classificação geomecânica de maciços rochosos (CGM).....	132
6.3 Caracterização geomecânica de descontinuidades presentes nas fundações do maciço rochoso do AHE Jirau	135

6.4	Caracterização geomecânica das descontinuidades presentes nas fundações do maciço rochoso da UHE Serra do Facão.....	140
6.5	Determinação do ângulo de atrito básico em ensaios de campo.....	151
7.	PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICOS DE MACIÇOS ROCHOSOS	152
7.1	Classificação geomecânica de maciços rochosos, fase de projeto (viabilidade e básico)	153
7.2	Classificação geomecânica de maciços rochosos, fase de projeto executivo (obra)	158
7.3	Aplicação da proposta classificação geomecânica de maciços rochosos (CGM)....	166
7.4	Aplicação da CGM durante a fase de projeto executivo (obra) na UHE Serra do Facão	170
7.5	Determinação do <i>Geological Stress Index</i> (GSI), do módulo de deformabilidade (E_m) e correlações com a Proposta Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos (CGM)	180
7.6	Comparações e correlações entre RMR e CGM	183
8.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DAS PESQUISAS	186
8.1	Considerações	186
8.2	Conclusões	188
8.3	Sugestões para futuras pesquisas	191
9.	REFERÊNCIAS.....	193
10.	APÊNDICES.	208
10.1	Apêndice A.....	210
10.2	Apêndice B.....	220
10.3	Apêndice C.....	257

Capítulo 1

Introdução

Empreendimentos hidrelétricos, sobretudo de grande porte, são multidisciplinares, envolvendo as áreas de ciências exatas, naturais e humanas e, em sua implantação, demandam o desenvolvimento de projetos de engenharia, viabilizados a partir de intensas e demoradas campanhas de investigações e pesquisas geotécnicas.

As campanhas de investigações objetivam o conhecimento do meio físico para desenvolvimento do projeto civil em seus aspectos hidrométricos, geomorfológicos, e, especialmente geológico-geotécnicos; sócio-econômico e ambiental, no tocante à fauna, à flora, entre outros.

A necessidade do conhecimento da geologia e geotecnia do sítio de um barramento de um grande curso d'água vem ao encontro de critérios de segurança de um empreendimento hidrelétrico. Risco existe em qualquer obra de engenharia, mas em barragens as consequências são geralmente mais sérias, principalmente quando situadas próximas a áreas intensamente edificadas e populosas. Segundo Marques Filho e Geraldo (1998), de 30 a 40% dos acidentes em barragens são causados por fatores geológico-geotécnicos.

A concepção de um projeto em suas diversas fases de desenvolvimento, em seu estado da arte, tem seu momento relevante de definição quando sai dos arranjos teóricos para

os cálculos estruturais, que visam a segurança do empreendimento como um todo, sendo que a base de cálculo necessariamente se inicia pela fundação. Desta forma, é por meio de criteriosas prospecções de campo e de laboratório que são obtidos os parâmetros geomecânicos de projeto, que incluem os determinados diretamente de sondagens mecânicas, a exemplo da permeabilidade, da alteração, do fraturamento e das características das descontinuidades presentes nos testemunhos de sondagem.

Os mapeamentos geológico-geotécnicos de afloramentos rochosos, em parte substituem, ou, no mínimo, orientam as prospecções de subsuperfície. Em escala macroscópica, são obtidas as características estruturais e geométricas das descontinuidades, juntamente com os ensaios *in situ* ou de laboratório, fundamentais para caracterização da rocha intacta e do maciço rochoso.

Maciço rochoso é um meio descontínuo formado pelas porções da rocha intacta e pelas descontinuidades que o atravessam. As propriedades e parâmetros que vão controlar o comportamento das obras executadas ou escavadas neste maciço rochoso vão depender da escala relativa entre o padrão de fraturamento do meio e o tamanho da obra. Em alguns casos, serão predominantes as propriedades da rocha intacta, enquanto em outros, as propriedades das descontinuidades, e por fim, as do maciço rochoso como um todo.

A natureza do maciço rochoso é muito complexa. A diversidade e variabilidade geotécnica dos materiais tendem a se acentuar, notadamente em se tratando de obras lineares, sendo necessárias ferramentas teóricas que permitam analisar o controle de seu comportamento num tempo e espaço determinados, onde o bom senso e a experiência prática são partes importantes. Uma alternativa de caracterizar os maciços rochosos está nos sistemas de classificação geomecânica, como forma sistemática de catalogar experiências obtidas em outros lugares e relacioná-las com a situação ora encontrada. Citado por Infanti Júnior (1995), Barbosa (1977) mencionava nada menos que 24 sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos, sendo o mais antigo datado de 1913.

As obras subterrâneas têm aumentado devido a exigências de infra-estrutura e ambientais, e na priorização do espaço superficial urbano para fins mais nobres como moradias, locais de trabalho e lazer (ASSIS, 2001). Essa crescente demanda de obras subterrâneas ocasionou expressivo aumento de classificações geomecânicas de maciços rochosos a partir da década de 50. Conforme Ojima (1982), entre as variadas classificações aplicáveis a túneis, pode-se citar como mais representativas as seguintes: Rabcewicz (1957),

Lauffer (1958), Ikeda (1970), Aftes (1974), Pacher e Rabcewicz (1974) citado por Cunha (1978), Wickham *et al.* (1974), Barton *et al.* (1974), Bieniawski (1974) e Rocha (1976).

Várias hidrelétricas iniciadas nos anos de 2007/2008, como a da Foz do Chapecó, localizada no rio Uruguai na divisa dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul; Serra do Facão, situada no rio São Marcos, em Goiás; Batalha, no rio São Marcos, na divisa dos estados em Goiás e Minas Gerais; Simplício; no rio Paraíba do Sul, nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro incluem túneis no arranjo das obras civis.

Embora a execução de túneis seja uma tendência mundial, que já se faz sentir no Brasil, em se tratando de empreendimento hidrelétrico de grande porte, a exemplo do Complexo do Rio Madeira (FURNAS *et al.* 2004; 2005a), são remotas as possibilidades técnico-econômicas de arranjos com circuitos hidráulicos subterrâneos, não se eximindo a possibilidade de inclusão de pequenas galerias de injeção e drenagem, nesses projetos.

1.1. Estudos anteriores

Os sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos vêm sofrendo constantes modificações decorrentes da expansão dos conhecimentos e da experiência adquirida ao longo do tempo, sobretudo com a construção de obras subterrâneas. A seguir é apresentada esta evolução a partir da aplicação e uso de classificações geomecânicas para outros fins implementados por alguns autores.

Segundo Tammerick *et al.* (1994), a classificação de maciço rochoso mais antiga e mais utilizada para a determinação da escarificabilidade é baseada na velocidade de ondas sísmicas correlacionadas com a potência e rendimento de tratores; os autores referidos citaram a proposta de Weaver (1975) de sistema de classificação de maciços quanto à escarificabilidade baseado na classificação de Bieniawski (1973) de maciços rochosos para uso em projeto de túneis e minerações, bastante utilizada na África do Sul.

Bieniawski (1973), desenvolveu o *Rock Mass Rating* (RMR), formulado a partir de casos históricos, tendo sido originalmente muito utilizada em túneis e minerações na África do Sul, baseado no princípio da atribuição de pesos a seis parâmetros geomecânicos.

Barton *et al.* (1974) publicaram o *Tunnelling Quality Index* (Q) para suporte de túneis, tendo como base a observação de um grande número de escavações subterrâneas.

Rocha (1975, 1976) mencionou os problemas a serem enfrentados na Mecânica das Rochas, em se tratando de materiais de baixa resistência, a exemplo de rochas brandas, enfocadas na presente tese.

Davidovitsch *et al.* (1976) desenvolveram classificação e caracterização geomecânica de maciços rochosos com aplicação nos túneis da Ferrovia do Aço, ligação ferroviária Belo Horizonte – São Paulo. Nieble e Francis (1976) generalizaram os conceitos com a publicação “Classificação de Maciços Rochosos” e Nieble (1976) publicou trabalho sobre os “Aspectos geológicos e geomecânicos relativos ao projeto de túneis em maciços de rochas metamórficas”.

Tressoldi e Sathler (1981) enfocaram, a partir de casos práticos vivenciados na UHE Tucuruí, a importância de mapeamentos geológico-geotécnicos de detalhes na caracterização de maciços rochosos complexos, incluindo os aspectos geométrico-estruturais e a caracterização das descontinuidades.

Bertin (1980), Buosi *et al.* (1982), Sathler *et al.* (1984) e Mattos *et al.* (1984) apresentaram os critérios de preparo e liberação das fundações aplicados na Usina Hidrelétrica (UHE) Tucuruí, localizada no rio Tocantins, estado do Pará, tendo como base o zoneamento geológico-geotécnico (compartimentação) ou setorização das fundações, que condicionava a adoção de conceitos e critérios executivos distintos para os serviços de preparo, tratamento e liberação das fundações, em rochas metassedimentares consistentes, tendo o fraturamento e a coerência com os únicos parâmetros classificatórios.

Bieniawski e Orr (1976), complementados por Serafim e Pereira (1983), correlacionaram o índice *Rock Mass Rating* (RMR) com o módulo de deformação *in situ*, adequando a aplicação desse índice a fundações.

O Sistema RMR já vinha sendo aplicado largamente em minerações na África do Sul. Alguns trabalhos foram destaques: Laubscher (1975), na aplicação do RMR em minas a céu aberto, Laubscher e Taylor (1975), que usaram o sistema RMR para a estimativa do volume de minério de asbesto a ser escavado, e Ferguson (1979), que aplicou a classificação a minas subterrâneas e, posteriormente, Kendorski *et al.* (1983) adaptaram o sistema à classificação de minas e túneis profundos, tendo sido denominado *Modified Basic RMR* (MBR).

Kirsten (1982) publicou um sistema de classificação geomecânica de maciços rochosos para uso em escavação de materiais naturais e, com base na caracterização de casos históricos (1988), demonstrou a validade do sistema.

Vaz (1982) mostrou a aplicabilidade de investigações e de sistemas de classificação de maciços rochosos para obras subterrâneas e, mais tarde (1996), apresentou classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais.

Barton (1983) aplicou o sistema Q (BARTON, 1974) na estimativa do módulo de deformabilidade de maciços rochosos.

Monticelli (1984) enfocou a compartimentação do maciço rochoso à luz de três projetos de barragens, enfatizando ser essencial para os estudos de viabilidade técnico-econômico, desde orçamento, capacidade de carga, estanqueidade até as condições de escavação dos materiais. A compartimentação pode ser feita por meio de unidades geológico-geotécnicas ou de classes de maciço, sendo, para tanto, realizadas investigações de superfície, de subsuperfície e ensaios geotécnicos em qualidade e quantidade necessários e condizentes com as necessidades do projeto.

Romana (1985) propôs o *Slope Mass Rating* (SMR) para classificação de taludes, com base no *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1976, 1979).

Soares (1991) considerou as rochas denominadas no meio geotécnico de brandas, aquelas cujos valores de resistência à compressão simples estão situados na faixa entre 0,5 e 20 MPa.

Romana (1993) apresentou o SMR, cuja proposta é a obtenção de uma nota para o SMR, a partir da nota $RMR_{\text{básico}}$, pela soma de um fator dependente da relação entre determinada descontinuidade e o talude escavado, e de outro fator, referente ao método de escavação. A soma dos cinco parâmetros do RMR sem nenhum ajuste equivale ao chamado $RMR_{\text{básico}}$, que representa a qualidade do maciço propriamente dito (BIENIAWSKI, 1984).

Vinueza e Assis (1994) aplicaram um modelo numérico elástico-linear para descrever o comportamento geomecânico de uma mina subterrânea, utilizando os sistemas de classificação geomecânica RMR (BIENIAWSKI, 1988) e Q (BARTON, 1988); Almeida (1998) demonstrou o comportamento de túneis escavados em maciços terrosos por meio de simulação numérica.

Infanti Júnior (1995) desenvolveu pesquisa abordando 100 casos de erosão por fluxo turbulento de água em maciços rochosos a jusante de vertedouro de barragens, incluindo prognósticos geológicos e ambientais e ainda propondo classificação de maciços rochosos perante a erosão, tendo por base o sistema *Rock Structure Rating* – RSR, desenvolvido por Wickham *et al.* (1974).

Durand (1995) e Durand e Assis (1997) apresentaram estudo da estabilidade de taludes em mineração com base em classificação geomecânica e depois Hidalgo e Assis (2004) mostraram a determinação da estabilidade de túneis escavados em rocha e projetados por métodos de classificação geomecânica.

Cella *et al.* (1998) utilizaram a interação de ferramentas geofísicas e geomecânicas para qualificação geomecânica das fundações em rochas brandas (diamictitos) do Prédio do Reator da instalação nuclear da Marinha em São Paulo. Os parâmetros geomecânicos foram determinados, empiricamente, baseados nas correlações dos sistemas RMR e Q e da velocidade de Onda Compressional (Vp).

Costa (1999) adaptou o sistema RMR (BIENIAWSKI, 1976) para classificar o maciço rochoso de fundação na fase de viabilidade do projeto de Irapé, no rio Jequitinhonha, MG.

Lauro (2001) e Lauro e Assis (2002) aplicaram modelo probabilístico tridimensional para a previsão da distribuição de descontinuidades no interior de maciços rochosos fraturados, tendo utilizadas galerias de mineração para validação do modelo e Hidalgo *et al.* (2003) mostraram métodos de determinação da resistência da rocha intacta na caracterização de maciços rochosos.

Dinis da Gama e Borges (2002) utilizaram o *Rock Quality Designation* (RQD) para classificar maciços calcário-dolomíticos e, a partir do ábaco de Franklin *et al.* (1971), compartimentaram o maciço rochoso para fins de escavação, no projeto de ampliação da estação de tratamento da Guia, em Cascais, Portugal.

Freury (2001) e Freury e Assis (2002), por meio de ensaios uniaxial e de cisalhamento e utilização da técnica da fotoelasticidade em amostras artificiais, buscaram entender como as características da superfície de descontinuidades afetam o comportamento ao cisalhamento, avaliando o efeito da rugosidade na distribuição de tensões.

Furnas (2002) registrou a aplicação, na fase de projeto básico, do sistema *Rock Mass Rating* (RMR), desenvolvido por Bieniawski (1976), e uso do critério de Hoek e Brown (1980b, 1988) ambos adaptados às condições intrínsecas do maciço rochoso, a partir de sondagens rotativas, mapeamentos de trincheiras exploratórias e ensaios de compressão uniaxial em metarenitos conglomeráticos e metassiltitos do Grupo Cuiabá no Aproveitamento Múltiplo (APM) Manso, localizado no município de Chapada dos Guimarães - MT.

No projeto executivo do APM Manso, o sistema RMR foi ajustado com ênfase nos parâmetros geotécnicos característicos de maior relevância, de fácil assimilação e aplicação

no campo, nas etapas de tratamento e liberação das fundações, tendo como parâmetros classificatórios: o grau de alteração, espaçamentos das fraturas, a persistência e as características dos planos das descontinuidades (FURNAS, 2002).

Hidalgo (2002) e Hidalgo e Assis (2002) avaliaram a estabilidade de estruturas subterrâneas de barragens escavadas em maciços rochosos, projetadas a partir de sistemas de classificação geomecânica, tendo como estudo de caso o Aproveitamento Hidrelétrico Queimado, localizado em Unaí-MG, usando métodos numéricos de modelagem e simulação numérica.

Redondo (2003) desenvolveu pesquisa de classificação probabilística do padrão geomecânico de um maciço rochoso mineralizado com base no *Rock Quality Designation* (RQD).

Romana (2003a) sugeriu uma adaptação do RMR para fundações de barragens, denominada de *Dam Mass Rating* (DMR), tendo considerado, entre as dificuldades de uso do RMR em barragens, o efeito da pressão d'água por ser de difícil medição.

Maia (2003) e Maia e Assis (2004) aplicaram ferramentas estatísticas e probabilísticas no estudo do comportamento do maciço rochoso relativo à estabilidade de taludes, tendo como casos a mina de Timbopeba, Minas Gerais e túneis do AHE Queimado. Carvalho (2003) desenvolveu métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha e, posteriormente, Maia (2007) observou a aplicabilidade dos métodos probabilísticos frente aos tradicionais métodos determinísticos.

Fialho (2003) e Fialho e Assis (2004) pesquisaram o desempenho de vários sistemas de suporte em túneis, compostos de tirantes e concreto projetado, tendo empregado a metodologia com base em simulações numéricas da ferramenta Plaxis, que utilizavam parâmetros geomecânicos obtidos dos tradicionais sistemas de classificação de maciços rochosos.

Miranda (2003), após uma investigação aprofundada das metodologias de caracterização de maciços e do seu comportamento, desenvolveu um sistema computacional que integra conhecimento organizado e sistematizado sobre a obtenção de parâmetros geomecânicos de formações graníticas, que cobrem uma vasta área da região norte de Portugal.

Mackay (2004) avaliou o comportamento de diferentes projetos de sistemas de suporte para vários tipos de maciços rochosos, encontrados em cinco diferentes obras, por

meio de simulação numérica de elementos finitos em três dimensões, no programa Plaxis 3D Tunnel, desenvolvido por Brinkgreve e Vermeer (2001).

Miranda *et al.* (2005) desenvolveram modelação numérica de uma central hidrelétrica subterrânea, utilizando parâmetros geomecânicos obtidos com técnicas de inteligência artificial; e Miranda *et al.* (2006) apresentaram metodologias desenvolvidas para determinação de parâmetros geomecânicos em formações rochosas e maciços heterogêneos, tendo como estudos de caso os granitos da região do Porto, Portugal, utilizando os sistemas *Rock Mass Rating* (RMR), *Tunnelling Quality Index* (Q) e *Geological Strength Index* (GSI).

Falcão Neves *et al.* (2006) desenvolveram trabalho de pesquisa por meio de ensaios de cisalhamento direto e ensaios de durabilidade (Slake Durability Test), com objetivo de verificar as variações entre as características de cisalhamento e o índice de durabilidade (desgaste) de rochas brandas ou semi-brandas. Tendo como principal objetivo a avaliação de estabilidade de taludes, foram estabelecidas correlações entre os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito e o índice de durabilidade que reflete a degradação do material rochoso ao longo do tempo utilizando para tal uma análise de regressão multilinear.

Lopes *et al.* (2007) desenvolveram pesquisa para caracterização geotécnico-geomecânica de rochas brandas tipo filito na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG). Os índices físicos e a resistência ao cisalhamento dos filitos presentes em três minas apresentaram comportamentos diferenciados em termos de estabilidade, sendo que, na mina Cava Crista, a presença de rugosidade na superfície da xistosidade aumentou consideravelmente sua resistência.

Malafaia (2007) desenvolveu extensiva pesquisa no maciço rochoso constituído predominantemente de rochas brandas do Grupo Canastra, com camadas e/ou lentes métricas a submétricas de filito, filito grafitoso e quartzito para projeto executivo da Usina Hidrelétrica (UHE) Batalha (FURNAS *et al.* 2006), em construção no rio São Marcos, na divisa dos estados de Goiás e Minas Gerais, municípios de Cristalina/GO e Paracatu/MG. As recomendações metodológicas de investigações para obtenção de parâmetros geológico-geotécnicos, caracterização e compartimentação de maciços rochosos de Monticelli (1984) foram em síntese, ali seguidas, de forma que a referida pesquisa resultou no Sistema de Classificação Específico de Batalha.

A Classificação Batalha (MALAFAIA, 2007) foi uma solução encontrada no desenvolvimento do referido projeto, com túneis, taludes acentuados e fundações com baixo módulo de deformabilidade, de modo a criar uma ferramenta que possibilitasse a modelagem

das escavações a céu aberto, em seus aspectos geológico-estruturais, geométricos e de tratamento, em maciços complexos de rochas brandas. Em síntese, consiste em correlacionar os materiais em três grupos com base nas características de alteração, coerência e fraturamento, subdivididos em vinte subgrupos que levam em conta a litologia e a foliação, estando em fase de implementação na obra (setembro/2008), com ajustes na caracterização geomecânica dos taludes escavados e no controle executivo das escavações obrigatórias.

Existem inúmeras metodologias de classificação de maciços rochosos aplicáveis em obras subterrâneas, a exemplo de escarificabilidade; entretanto pouco se tem na literatura de uso em obras a céu aberto, como no caso de barragens, com raras exceções em minerações. Assim, é imperativo o desenvolvimento de um sistema de classificação geomecânica de maciços rochosos, abrangente e genérica, que considere os principais requisitos técnicos que caracterizam um barramento hidrelétrico, tais como maciços rochosos tipicamente superficiais e muitas vezes intemperizados, e os efeitos dos chamados tratamentos de fundações.

1.2. Objetivo

O objetivo principal da tese foi formular proposta de Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos em Projetos Hidrelétricos, de obras a céu aberto, tendo como estudo de casos o Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau e a UHE Serra do Facão, para duas fases distintas de concepção do empreendimento:

- Estudo de projeto de Viabilidade técnica-econômica e de Projeto Básico;
- Projeto Executivo de implantação das obras civis.

1.3. Justificativas técnicas

Mister se faz mencionar a importância da classificação geomecânica de maciços rochosos em empreendimentos hidrelétricos, tendo sempre em vista a fase em que se encontra o projeto.

Na fase de inventário, a compartimentação do maciço rochoso, conforme Monticelli (1984) poderá fornecer relevantes subsídios ao desenvolvimento do projeto, até mesmo na previsão de solução de projeto em casos especiais de fundação.

A adaptação de determinada classificação geomecânica desenvolvida para túneis em obras a céu aberto, embora seja uma prática comum no meio técnico consultor, imprime sempre uma dúvida se aquela adaptação é a mais coerente às condições intrínsecas de determinado projeto para aquele maciço rochoso específico. Tal fato se deve à frequência com

que projetistas, construtores e empreendedores se deparam com questionamentos e incertezas nas informações geológico-geotécnicas, originadas de programas de investigações deficitários e mal conduzidos.

A escolha dos parâmetros classificatórios, a forma e fonte de origem são de extrema importância. Erro na escolha e incertezas dos dados obtidos, somados às fórmulas empíricas comumente empregadas, poderão se converter em mudanças da concepção de projeto, refletindo no planejamento de construção, o que na maioria das vezes ocasionam problemas construtivos e financeiros. Desta forma, uma criteriosa seleção dos parâmetros classificatórios, a forma e a metodologia de obtenção, bem como os resultados obtidos, são fundamentais para o dimensionamento do projeto e se constituem um passo importante na minimização de erros grosseiros, muito comuns num passado recente e atual.

Porto (2005) e Marques *et al.* (2005) mencionam alguns problemas contratuais a partir de 1995, oriundos da entrada da iniciativa privada nas concessões de empreendimentos hidrelétricos, sob o controle da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em contratos do tipo *Engineering, Procurement and Construction* (EPC), também conhecidos por contratos *turn key* ou empreitada global, onde o empreendedor é responsável pelo projeto, construção, montagem, fabricação dos equipamentos etc., incluindo a garantia da qualidade, com preço e prazo fixos.

Na fase de viabilidade, a exemplo do AHE Jirau, localizado no rio Madeira, o projeto aprovado passa para a etapa de licitação (leilão), redobrando, portanto, a responsabilidade da qualidade do projeto, base desse processo e, conseqüentemente, dos respectivos quantitativos.

A classificação geomecânica para as fases de viabilidade e projeto básico objetivou subsidiar as consultoras na obtenção de parâmetros geomecânicos e definição dos critérios de projeto, fundamentais para determinação da geometria de escavação e elaboração das especificações técnicas dos serviços de preparo e liberação de fundação, possibilitando desta forma quantificar os serviços com relativa segurança.

As análises das especificações técnicas aplicadas nos serviços de preparo e liberação de fundações de empreendimentos hidrelétricos empregadas nas últimas três décadas, a exemplo de Tucuruí (1978-1982), de Balbina (1982-1984), de Samuel (1984-1987), de Manso (1999-2001), de Peixe-Angical (2004-2005) e de Serra do Facão (2007-2008) são generalizadas e normalmente transcritas e repassadas de projeto a projeto. Exceção se dá quando aparecem situações especiais de fundação, a exemplo das megafraturas do Aproveitamento Múltiplo

(APM) Manso (FURNAS, 2002) e das falhas tipo F3 da UHE Tucuruí (MATTOS *et al.* 1984), em que foram concebidos projetos de tratamento específicos, para solucionar problemas de deformabilidade, entre outros.

As especificações técnicas do APM Manso, referentes aos serviços de preparo e tratamentos superficiais de fundação das estruturas de concreto (FURNAS, 2002) incluíram em síntese:

- Limpeza mecânica e manual do material remanescente da escavação;
- Limpeza intensa da superfície de fundação com uso de alavancas e por meio de aplicação pneumática de ar comprimido, de água e ar (monitor com pressão de até 700 kPa ou 7 atm);
- Limpeza manual em fenda e caixa de falha com presença de materiais incoerentes;
- Tratamento com argamassa, calda de cimento ou concreto de regularização nas zonas de falha, cavidades, pequenas depressões, fraturas abertas e outras irregularidades.
- Tratamento, no todo ou em parte, com concreto dental, argamassa, gunita ou concreto projetado das paredes de escavação que apresentam cavidades, taludes negativos ou outras imperfeições.

A proposta de classificação geomecânica para a fase de projeto executivo é direcionada, sobretudo para as atividades de preparo, tratamento e liberação das fundações, podendo ser empregada na avaliação das especificações técnicas e aplicabilidade do projeto executivo nestas áreas específicas e no encaminhamento aos devidos ajustes dos critérios de projeto.

1.4. Organização do trabalho

A presente tese está estruturada em oito capítulos e três apêndices, conforme conteúdos sintetizados a seguir:

- Capítulo 1: expõe aspectos relevantes do uso de classificações geomecânicas aplicadas a túneis, bem como para outros fins, e o emprego de forma adaptada em projetos hidrelétricos, enfatizando o desenvolvimento de classificação própria e justificativas técnicas. Inclui-se também a estruturação da presente tese.
- Capítulo 2: aborda a caracterização e a classificação geomecânica de maciços rochosos, incluindo revisão bibliográfica de algumas classificações aplicadas em obras subterrâneas.

- Capítulo 3: trata da determinação de parâmetros geomecânicos de maciços rochosos, de forma direta, por meio de investigações de campo e de laboratório, e de forma empírica, com base em revisão bibliográfica.
- Capítulo 4: discute os métodos e etapas do desenvolvimento da pesquisa da tese.
- Capítulo 5: enfoca o conhecimento do meio físico, nos aspectos geológicos, geotécnicos e estruturais e localização dos sítios dos dois casos estudados: a Usina Hidrelétrica Serra do Facão e o Aproveitamento Hidrelétrico Jirau, este inserido regionalmente na área de abrangência dos estudos do Complexo do rio Madeira.
- Capítulo 6: realiza estudo de casos, de métodos de caracterização de parâmetros geomecânicos, bem como da pesquisa para seleção da escolha da classificação geomecânica tradicionalmente aplicada à túneis, para servir de base estrutural da classificação geomecânica proposta para maciços rochosos em projetos hidrelétricos.
- Capítulo 7: apresenta proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos de empreendimentos hidrelétricos, tendo como estudos de caso o Aproveitamento Hidrelétrico Jirau e a Usina Hidrelétrica Serra do Facão, objetivo da presente tese.
- Capítulo 8: discorre sobre as considerações e conclusões alcançadas nesta tese, e finalmente, propõe sugestões para o prosseguimento de pesquisas nessa área de interesse.
- Três apêndices (A, B e C) complementam a base técnica dos capítulos da presente tese, contendo ensaios geotécnicos, tabelas, gráficos, descrições e perfis individuais (logs) de sondagens mecânicas.

Capítulo 2

Caracterização e Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos - Revisão Bibliográfica

Os capítulos 2 e 3 apresentam uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos de classificação geomecânica, da caracterização de seus respectivos parâmetros, bem como as possíveis relações utilizadas para obtenção de parâmetros geomecânicos preliminares de maciços rochosos por meio de classificações. Esses fundamentos são importantes para constituir a base do método proposto nesta tese.

2.1. Rocha e maciço rochoso

Rocha é um corpo sólido natural formado por agregado de um ou mais minerais resultante de processos geológicos sob determinadas condições de temperatura e pressão; já o maciço rochoso é formado por blocos de rocha intacta, ou simplesmente rocha intacta, e por planos de fraqueza que os delimitam, aqui chamados de descontinuidades.

Uma simples junta ou uma extensa falha são exemplos extremos de descontinuidades, portanto, são quaisquer feições, de origem natural ou induzida, que apresentem quebra do padrão das propriedades geomecânicas, em relação àquele dos blocos de rocha intacta e, que podem controlar o comportamento da obra (macro-escala). Os blocos de rocha intacta é a parte do material que está coesa, maciça e sem a presença de descontinuidades predominantes no seu interior, podendo existir, em micro-escala, pequenas fraturas, fissuras e vazios.

Serra Júnior e Ojima (1998) definiram maciço rochoso como um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados, sendo a matriz composta pelos blocos da rocha intacta e, as superfícies que os delimitam são as descontinuidades.

Essa definição é usualmente empregada em engenharia, quando o conjunto de blocos justapostos e articulados de rocha intacta e descontinuidades controla, como um todo, o comportamento das obras escavadas ou apoiadas nessa massa de rocha. Relativo a mecânica das rochas, entende-se como ciência teórica e aplicada que estuda o comportamento mecânico das rochas e dos maciços rochosos, ou seja, é a parte da mecânica que estuda a resposta das rochas e maciços rochosos quando sujeitos à ação de esforços solicitantes externos, tais como força, temperatura etc. (ASSIS, 2003b).

Conforme Ruiz *et al.* (1998), de acordo com os estatutos da Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG, 1992) e da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 1990), a Geologia de Engenharia pode ser definida como a ciência dedicada à investigação, estudo e solução de problemas de engenharia e meio ambiente, decorrentes da interação entre a geologia e os trabalhos e atividades do homem, bem como a previsão e desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de acidentes geológicos.

2.2. Caracterização e classificação geomecânica

A caracterização é uma operação que tem por objetivo estudar as características previamente desconhecidas do maciço rochoso. Caracterização é o ato de por em evidência os atributos do meio rochoso que, isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento ante as solicitações impostas por uma dada obra.

Classificação geomecânica do maciço rochoso é entendida como o ato de se hierarquizar as características ou atributos do maciço rochoso, organizando-as individualmente ou em grupos ou classes, associando estes comportamentos diferenciados do meio rochoso nas condições de solicitações consideradas.

Descontinuidade, em termos práticos, é qualquer superfície natural onde a resistência à tração é nula ou muito baixa; incluindo-se os planos de estratificação, diáclases, fraturas ou falhas que dão contorno ao corpo do afloramento rochoso e individualizam os blocos.

Conforme Francis (1976), caracterizar é conhecer as propriedades físicas do maciço rochoso, que nem sempre assume expressões simples, traduzíveis em linguagem matemática e grandezas mensuráveis. As propriedades físicas, com suas grandezas determinantes, dependem de fatores internos e externos. Os fatores internos dependem da natureza do meio

rochoso, que incluem a litologia, a composição mineral, o arranjo estrutural do maciço rochoso e suas descontinuidades, entre outros; os fatores externos dependem do nível e do tempo de atuação das solicitações ambientais.

A caracterização geomecânica de maciços rochosos em engenharia se inicia com um bom conhecimento da geologia regional e local, que incluem: a litologia (conhecimento das rochas; a alteração (também denominada de decomposição); a coerência (também denominada de consistência); o fraturamento (expresso pela quantidade de descontinuidades medida no testemunho de sondagem ou em mapeamento geológico-geotécnico realizado em uma exposição rochosa); a água subterrânea, que influi no comportamento mecânico da rocha; o estado de tensão; e a trabalhabilidade do maciço rochoso.

Litologia é a parte da geologia que tem por objetivo estudar as rochas em geral (ígneas, sedimentares ou metamórficas) com vistas a definir a sua caracterização, constituição, gênese e evolução de sua composição mineralógica, especialmente do tamanho dos grãos e das partículas, da cor, textura, microestruturas e de suas características físicas e químicas.

A alteração da rocha em seu processo evolutivo depende de um conjunto de fatores e propriedades de natureza mineralógica, físico, químico, biológico e geotécnico. São basicamente dois tipos de alteração que afetam as rochas:

- Deutérica ou primária de origem magmática (a água residual do magma e elementos associados, ao permear fraturas e descontinuidades intergranulares e intragranulares, clivagens dos minerais magmáticos primários, promove diversas alterações, notadamente de hidratação e oxidação);
- Meteórica ou intempérica decorrente de fenômenos atmosféricos em ambientes exógenos, onde o clima é de grande importância.

Intemperismo é um processo ou conjunto de processos combinados químicos, físicos e/ou biológicos de desintegração e/ou degradação e decomposição de rochas causados por agentes geológicos diversos junto à superfície da crosta terrestre.

Teixeira (2003) e Toledo *et al.* (2003) mencionam três tipos de intemperismo:

- No Químico, onde se destaca a ação da água da chuva carregada de outros elementos atmosféricos, como o CO₂: a água ataca os minerais da rocha em sua superfície exposta e em suas fraturas e os decompõem dando origem a novos minerais, estáveis às condições da superfície terrestre, e a solutos que migram pelas fraturas da rocha ou nas águas superficiais em direção ao mar;

- No tipo de intemperismo físico ou mecânico, destaca-se a ação das variações de temperatura na superfície terrestre, o que ocasiona dilatações e contrações nas rochas que se fraturam, favorecendo a degradação por outros agentes; a dissolução de água em geleiras e sua cristalização em fraturas provocam o esfacelamento em blocos de rocha pelo aumento de volume da água ao formar o gelo de forma semelhante ao que pode ocorrer com a cristalização de sais com aumento de volume em fissuras de rochas e de minerais; e
- No intemperismo biogênico, é importante a ação dos seres vivos como as cracas e mexilhões no mar, as raízes de plantas na terra, e outros seres que promovem ou auxiliam no processo de intemperismo, podendo-se dizer que, em última análise, esses processos são, na realidade, químicos e/ou físicos como, por exemplo, ácidos úmicos (químico) e crescimento e expansão nas fraturas de rochas (físico) de raízes de plantas.

É marcante o intemperismo de regiões de clima tropical, como a Amazônia brasileira, a exemplos, os granitos situados na margem esquerda do sítio do projeto do Aproveitamento Hidrelétrico Santo Antônio, em Porto Velho, RO (FURNAS, 2005a), bem como os metassedimentos situados no canal de desvio do Aproveitamento Múltiplo (APM) Manso, MT, com manto de intemperismo da ordem de 50 m de profundidade, em maciços rochosos marcados por intenso fraturamento subvertical (FURNAS, 2002).

A alteração da rocha afeta diretamente sua resistência, além de promover transformações mineralógicas, gerando argilo-minerais. Por outro lado, uma rocha alterada tem os planos das fraturas também alterados, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do maciço rochoso foram afetadas, sendo plenamente justificável atribuir peso diferenciado às características de alterabilidade da rocha em regiões de clima tropical.

Coerência é caracterizada tátil-visualmente de acordo com a resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo do geólogo e ao risco com uma lâmina de aço. Apresenta um aparente grau de subjetividade, que pode ser dissipada ou minimizada pela experiência do profissional da área.

O fraturamento é expresso em número de fraturas por metro, onde são consideradas somente fraturas naturais, caracterizando, assim, a presença de testemunhos separados e distribuídos ao longo da manobra do furo de sondagem rotativa. Quebras mecânicas decorrentes do processo executivo da sondagem são marcadas normalmente nos testemunhos por experientes sondadores. Descontinuidades aparentemente seladas, com resistência (do selo) muito inferior ao da rocha matriz, a exemplo de calcita, manganês, etc., normalmente são abertas na execução do furo; o ensaio de perda d'água é um bom indicador para essa situação, devendo essas descontinuidades ser consideradas, com ressalvas.

Conforme a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM 1981), os diferentes tipos de descontinuidade (falhas, diáclases, clivagem, planos de acamamento etc.) podem ser descritas pelos parâmetros: orientação, persistência, rugosidade, espaçamento, resistência das paredes, abertura, preenchimento e condição de água nas descontinuidades. Já o maciço rochoso como um todo pode ser caracterizado pelo número de famílias de descontinuidades e tamanho dos blocos de rocha intacta.

A orientação deve ser especificada por meio do vetor sentido do mergulho/mergulho da linha de maior inclinação da descontinuidade. O sentido do mergulho é dado pelo azimute de uma linha perpendicular ao plano da descontinuidade. A atitude é medida usando bússola e clinômetro.

A bússola estrutural (tipo Kassel) é muito utilizada em mapeamentos geológicos de detalhe, sendo recomendada para situações de difícil acesso ao plano de leitura, comum em mapeamentos de túneis. Cuidados devem ser tomados na medição de atitudes de sistemas de descontinuidade com mergulho subvertical ($80-90^0$), bem como na plotagem em estereogramas. Nessas situações, sobretudo em mapeamento geológico a céu aberto, é recomendado o uso de leituras com bússola convencional (tipo Brunton), com medição da direção do plano/mergulho, em que o primeiro representa uma horizontal do plano em relação ao norte (azimute) e o segundo, a reta de maior inclinação com o plano horizontal.

Persistência é o comprimento do traço da descontinuidade no plano analisado, conforme observado em um afloramento, sendo determinada no campo com uso de trena de pelo menos 10 m. O grau de persistência das descontinuidades, orientadas desfavoravelmente em relação à estabilidade do maciço, determina a probabilidade de envolvimento da rocha sã em uma eventual ruptura (DURAND, 1995).

A rugosidade ou aspereza corresponde a ondulações nas superfícies das descontinuidades e influencia, especialmente, a resistência ao cisalhamento, em descontinuidades não-preenchidas, conferindo um incremento ao ângulo de atrito até um nível de tensões, a partir do qual se verifica a sua ruptura.

O espaçamento é a distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes pertencentes a uma mesma família (Figura 2.1). O espaçamento das descontinuidades condiciona o tamanho dos blocos individuais de rocha intacta. Um pequeno espaçamento confere ao maciço um comportamento mais próximo aos materiais granulares, modificando o modo de ruptura de translacional para circular, enquanto que para grandes espaçamentos tem-se fundamentalmente o efeito condicionante do tamanho dos blocos. Segundo Assis (2003a), esses efeitos estão relacionados com a persistência das descontinuidades. Para determinação

do espaçamento, utilizam-se trenas graduadas em milímetros de pelo menos 3 m, bússola e clinômetro.

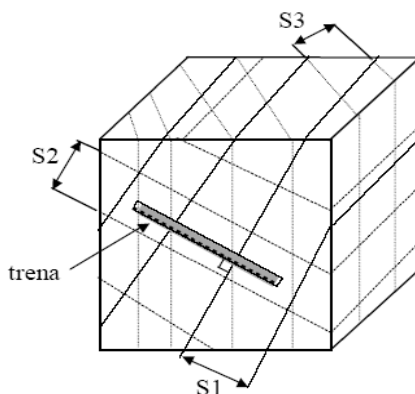


Figura 2.1. Método de medição do espaçamento de descontinuidades com uso de trena (ASSIS, 2003a). Observar a representação de três famílias de descontinuidades (S1, S2 e S3).

Abertura é a distância entre as paredes de uma mesma descontinuidade, medida no sentido ortogonal. Em um maciço rochoso com descontinuidades fechadas, as propriedades do maciço podem até ser equiparadas às da rocha intacta, que o constituem. Ocorrendo aberturas, suas características passam a ser condicionadas por estarem ou não preenchidas.

Preenchimento é o material contido nas descontinuidades, com influência direta no comportamento relativo ao cisalhamento e deformabilidade. As propriedades de resistência à erosão hidráulica, as condições de porosidade e a permeabilidade dos preenchimentos influenciam sobremaneira as características das descontinuidades e do maciço rochoso como um todo.

O número de famílias de descontinuidades é determinado com base no mapeamento geológico-geotécnico. Um conjunto de descontinuidades com mesma orientação e origem caracteriza uma família, enquanto um conjunto de famílias define um sistema.

O tamanho dos blocos é determinado pelo espaçamento das descontinuidades, por ocasião do mapeamento em afloramentos ou superfícies escavadas ou em testemunhos de sondagem rotativa. O fraturamento é expresso pelo número de fraturas que intercepta o testemunho, em trechos com espaçamento homogêneo.

A condição de água é descrita em termos de sua existência ou não, retratada por uma simples unidade, ao extremo, com elevada vazão do fluxo e o estado de pressão em que se encontra. A água subterrânea afeta o maciço rochoso distintamente: na matriz rochosa e no material de preenchimento das descontinuidades e nas superfícies das descontinuidades.

Em escavações de túnel e cavernas, com maciços desconfiados, instalam-se pressões intersticiais, podendo reduzir as tensões efetivas nas fraturas e causar o arraste de materiais incoerentes, dos preenchimentos finos, podendo instabilizar blocos e o próprio túnel. Essa situação aumenta de criticidade com a presença da água subterrânea que, dependendo do caudal e da pressão, em geral dificulta o andamento da obra.

Segundo Assis (2003b), a percolação de água nos maciços rochosos ocorre principalmente através de descontinuidades (permeabilidade secundária), mas em rochas sedimentares a permeabilidade primária do material pode ser significativa. A permeabilidade secundária é afetada pelo espaçamento e extremamente pela abertura das descontinuidades existentes nos maciços rochosos.

O túnel de injeção da falha da lagoa da Usina Hidrelétrica (UHE) Tucuruí (rio Tocantins, PA) apresentou em vários trechos surgências d'água generalizadas no piso, paredes e teto. Furos com diâmetro de 100 mm (4") para injeção apresentaram artesianismo com vazão de 145 l/min e pressão de 300 kPa e furos para instrumentação da falha (piezômetros), executados após a conclusão das injeções, ainda apresentaram artesianismo com vazão de 33 l/min e pressão de 240 kPa (MESQUITA *et al.* 1984).

Em se tratando de obras a céu aberto, a exemplo de escavações para fundações de barragens, onde as condições de confinamento do maciço em geral não existem, as pressões intersticiais são normalmente dissipadas, até mesmo porque o nível d'água na maioria dos casos se situa abaixo das escavações ou é naturalmente rebaixado.

Registram-se dois casos excepcionais de artesianismo em fundação de barragem de enrocamento do leito do rio: no canal central, região da falha da lagoa da UHE Tucuruí, onde ocorreram inúmeras surgências d'água com vazão de até 50 l/min (MESQUITA *et al.* 1984); no APM Manso, provocado por intenso fraturamento aberto com surgências d'água generalizadas. Os dois casos se mantiveram mesmos após a execução da cortina de injeções e grande quantidade de injeções rasas, somente controladas por meio de drenos temporários e poços de bombeamento, os quais permitiram o lançamento do núcleo argiloso, para mais tarde, com a estabilização do artesianismo, serem injetados (FURNAS, 2000; 2002).

De acordo com Ojima (1982), "a determinação das condições de água subterrânea deve ser efetuada conforme as características climáticas da região, procurando obter os elementos correspondentes ao período mais desfavorável".

Constitui-se uma prática bastante benéfica instalar medidores de nível d'água nos furos de sondagem executados durante os estudos de projeto e, sempre que possível, preservá-los até a fase de construção.

O estado de tensões virgens ou também denominado estado de tensões naturais é aquele existente a uma dada profundidade no maciço rochoso, na ausência de perturbação causada por obras de engenharia e minerações. Essas tensões são resultantes da complexa interação dos acontecimentos pertinentes à sua história geológica, associada às ações gravitacionais (PANITZ, 2007).

A determinação do estado de tensões em um maciço rochoso é uma tarefa complexa, visto que, no seu estabelecimento, tomam parte uma grande diversidade de fatores, cujo conhecimento, na exatidão necessária, é impraticável, o que impossibilita o seu cálculo analítico. A isso, adiciona-se ainda as simplificações e aproximações realizadas no estabelecimento das relações matemáticas constitutivas, que simulam o comportamento da rocha.

Para caracterização do maciço rochoso faz-se necessária a execução de ensaios de campo e laboratório para obtenção dos parâmetros geotécnicos requeridos:

- Descrição petrográfica em lâminas delgadas;
- Análises químicas;
- Índices físicos, que incluem basicamente porosidade, massa específica, absorção d'água, expansão e desgaste a úmido;
- Propriedades mecânicas, determinadas a partir de ensaios de resistência à compressão uniaxial, compressão triaxial, carga puntiforme, martelo de Schmidt, velocidade sônica, tração, entre outros.

A metodologia aplicada para caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso inclui a descrição e classificação de sondagens e mapeamentos geológico-geotécnicos de superfícies rochosas aplicados em empreendimentos hidrelétricos, a exemplo da UHE Tucuruí (Tucuruí, PA), UHE Samuel (Candeias do Jamarí, RO), APM Manso (Chapada dos Guimarães, MT), Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira (Porto Velho, RO) e nos estudos para projeto executivo da UHE Serra do Facão (Goiás). Essa metodologia é originária de traduções da *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) (ABGE/CBMR, 1983), estando em conformidade com as recomendações da ISRM (1981), sumarizadas nas Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

Tabela 2.1. Grau de alteração.

Siglas	Denominações	Características da rocha
A1	Rocha sã	Corpo da rocha inalterado, com juntas ligeiramente oxidadas.
A2	Rocha pouco alterada	Alteração insípiente do corpo da rocha, ao longo de fraturas.
A3	Rocha medianamente alterada	Menos de 1/3 da rocha está alterada.
A4	Rocha muito alterada	Até 2/3 da rocha apresenta alteração e todas as fraturas estão abertas e cheias de rocha alterada
A5	Rocha totalmente alterada	Somente com a estrutura remanescente da rocha original.

Tabela 2.2. Grau de coerência.

Siglas	Denominações	Características da rocha
C1	Coerente	Material que só pode ser fragmentado pelo martelo dando origem a fragmentos cortantes, sem produção de pó.
C2	Medianamente coerente	Material que só pode ser fragmentado pelo martelo originando fragmentos com produção de pó.
C3	Pouco coerente	Material que ao ser percutido pelo martelo, reduz-se a pó.
C4	Incoerente	Material que pode ser esfarelado com a pressão dos dedos.

Tabela 2.3. Grau de fraturamento.

Siglas	Denominações do maciço	Nº de fraturas por metro
F1	Muito pouco fraturado	0 a 1
F2	Pouco fraturado	2 a 6
F3	Medianamente fraturado	6 a 10
F4	Muito fraturado	11 a 20
F5	Extremamente fraturado	> 20

Tabela 2.4. Persistência das descontinuidades.

Descrição	Persistência (m)
Muito pequena	Menor que 1
Pequena	de 1 a 3
Média	de 3 a 10
Grande	de 10 a 20
Muito grande	Maior que 20

Os ensaios de Perda d'Água sob pressão em furo de sondagem rotativa seguiram as diretrizes da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1975, 1996, 1999). A classe de permeabilidade é determinada por equivalência a partir da perda d'água específica, conforme Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Classes de permeabilidade e correlação com a perda d'água específica

Classe	Perda d'água específica (l/min.m. kg/atm)	Permeabilidade equivalente (cm/s)	Designação
P1	< 0,1	$<10^{-5}$	Muito baixa
P2	0,1 a 1,0	10^{-5} a 10^{-4}	Baixa
P3	1,0 a 5,0	10^{-4} a 5×10^{-4}	Média
P4	5,0 a 10	5×10^{-4} a 10^{-3}	Alta
P5	> 10,0	$> 10^{-3}$	Muito alta

A Tabela 2.6 apresenta uma proposta de convenções que vem sendo utilizada na classificação de descontinuidades, verificadas em sondagens e mapeamentos geológico-geotécnicos.

Tabela 2.6. Convenções para classificação de descontinuidades do maciço rochoso em sondagens mecânicas e mapeamentos geológico-geotécnicos.

Tipo	Abertura	Preenchimento	Superfície (Paredes)	Aspereza (Paredes)	Tipo do Preenchimento
Diáclase (Di)	Aberta: A	Sem preenchimento: SP	Plana/Regular: Pr Irregular: Ir Curva: Cv	rugosa: r lisa: l estriada: e	Oxidada: ox Filmes de manganês: mn Outros: xx Alteração: al
Fratura (Fr)	Aberta: A	Com preenchimento: CP	Idem	Idem	Indeterminado: P0 Pétreo/granular: P1 Misto: P2 Argiloso: P3
Falha (Fa)	Fechada: F	Cimentada: C	Idem	-	Cimento: Carbonato: ca Epidoto: ep Ferruginoso: fe Sílica: si Outros: xx
Contato (L)	Fechada: F	Não cimentada: NC	Idem	-	Contato: Rocha x rocha: rr Película de argila: ar
Inclinação com a horizontal: Sub-horizontal (SH) 0° a 20°; Sub-vertical (SV) 70° a 90°; Inclinação (I) 20° a 70°. Ex.: Fratura Sub-horizontal, irregular, rugosa, aberta com preenchimento argiloso: (Fr): SH, Ir, r, CP, P3					

2.3. Considerações sobre algumas classificações de maciços rochosos existentes.

Conforme Infanti Júnior (1995), a crescente demanda de obras subterrâneas ocasionou expressivo aumento de classificações geomecânicas a partir da década de 50.

Considerando as citações de Ojima (1982), Bieniawski (1984) e Infanti Júnior (1995), são relacionadas, em sínteses, as classificações certamente mais representativas e conhecidas aplicadas, principalmente, em projetos de túneis nas três últimas décadas:

- *Rock Load Classification* (classificação de carga de rocha) foi introduzida por Terzaghi (1946) com bastante sucesso por mais de 35 anos, em projetos de túneis escorados por perfis metálicos;

- *Stand-up time*, tempo máximo em que uma determinada cavidade de túnel, em escavação, permanece estável foi introduzido por Lauffer (1958), tendo como base o trabalho de Stini (1950), considerado na época o pai da escola Austríaca de túneis e mecânica das rochas;
- *Rock Quality Designation* (RQD), introduzido por Deere (1963), prático e simples para descrever a qualidade de rocha a partir de testemunhos de sondagem;
- *Rock Structure Rating* (RSR), Classificação da Estrutura Rochosa, foi desenvolvida nos Estados Unidos por Wickham *et al.* (1972, 1974), no qual foi introduzido o conceito de rateio ou compartimentação da estrutura rochosa, com base em revisão de literatura e em casos históricos;
- *Rock Mass Rating* (RMR), Bieniawski (1973), também conhecido como Classificação Geomecânica RMR, formulada a partir da utilização de seis parâmetros medidos no campo ou em testemunhos de sondagem;
- *Tunnelling Quality Index* (Q), proposto por Barton *et al.* (1974), foi desenvolvido a partir do produto de três quocientes determinados a partir de parâmetros geotécnicos. Os sistemas RMR e Q foram os primeiros a quantificar projetos de suporte de escavações subterrâneas;
- *Slope Mass Rating* (SMR), proposta por Romana (1985, 1993), para classificação de taludes obtida a partir do sistema RMR de Bieniawski (1976, 1989) e;
- *Dam Mass Rating* (DMR), uma nova classificação geomecânica para fundação de barragens, que se constitui em uma adaptação do índice RMR de Bieniawski e Orr (1976), proposta por Romana (2003a, b).

Bieniawski (1973) menciona que um sistema de classificação para aplicações em obras de engenharia deve apresentar os seguintes atributos:

- Ser simples, fácil de compreender e de memorizar;
- Apresentar termos claros e a terminologia utilizada deve ser amplamente aceita por geólogos e engenheiros;
- Incluir as propriedades mais significativas dos maciços rochosos;
- Dotar de parâmetros mensuráveis que possam ser determinados por inspeção de campo e ensaios de baixo custo;
- Apresentar sistema de pesos que possa ponderar a importância relativa de cada parâmetro adotado;
- Ser funcional e fornecer dados quantitativos para o projeto.

A utilidade e a objetividade do sistema de classificação geomecânica se devem ao seu caráter empírico, que é resultado da aplicação de experiências adquiridas em projetos anteriores (Bieniawski, 1984).

Bieniawski (1993) enfoca o tema classificação de maciços rochosos, apresentando como objetivos:

- Identificação dos principais parâmetros inerentes ao comportamento da massa rochosa;
- Distinção de um mesmo maciço em diferentes setores, de qualidade variável;
- Fornecimento de dados básicos para a identificação das características de cada classe em que for dividido o maciço rochoso;
- Possibilidade de dedução de parâmetros quantitativos, preliminares, para o projeto propriamente dito;
- Estimativa de sistemas de suporte para túneis e taludes;
- Formação de uma linguagem comum entre equipes de geologia e engenharia;
- Correlação entre a experiência adquirida, em casos anteriormente estudados, com futuros projetos, e ainda sugere que a classificação de maciços rochosos se constitua a espinha dorsal do processo de análise de escavações em rocha, incluindo tanto seu dimensionamento geométrico quanto seu sistema de tratamento.

Infanti Júnior (1995) faz menção comparativa dos índices Q e RMR, tendo como foco a erosão em bacias a jusante de vertedouros de barragens:

- Considera como problema no *Tunnelling Quality Index* (Q) a grande variabilidade de parâmetros classificatórios, por dificultar a interpretação e a comunicação entre os profissionais e por não considerar a orientação das descontinuidades;
- O sistema RMR, apesar de aparentemente mais simples, por envolver apenas cinco classes de maciço rochoso, é menos adequado para obras civis, em decorrência de derivar de obras nas quais a segurança é menos importante, em virtude do efeito localizado de eventuais rupturas e de não considerar o número de famílias de descontinuidades, essencial para definir o grau de liberdade de movimentação dos blocos do maciço rochoso;
- O autor conclui que o parâmetro condição das descontinuidades de Bieniawski é muito simplificado e neste aspecto a classificação de Barton *et al.* (1974) é muito superior, com os parâmetros Jr (rugosidade) e Ja (alteração das paredes). Desta forma, verifica-se que nenhum sistema é perfeito, embora o Sistema Q de Barton seja mais completo.

Segundo Vaz (1982), o desenvolvimento de uma classificação universal tem sido procurado, porém sem sucesso. A comissão de classificação de rochas e maciços rochosos da

Internacional Society of Rock Mechanics (ISRM 1980), após analisar as numerosas classificações existentes, com objetivo de estabelecer um sistema universal, decidiu recomendar, inicialmente, apenas um sistema de descrição geotécnica de maciços rochosos, para uso geral. A própria Comissão reconheceu que, com o uso da descrição geotécnica básica de maciços rochosos, seria possível desenvolver descrições e/ou classificações especiais para diferentes tipos de obras ou condições geológicas.

Considera-se que uma suposta classificação universal seja dificultada pela heterogeneidade e anisotropia dos maciços rochosos, ainda sujeitos às variáveis de comportamento aleatório, tais como alteração diferencial, espessura e tipo de preenchimento, comportamento espacial de falhamentos, espessura de zonas cisalhadas etc. Em consequência, especialmente para o projeto de obras subterrâneas, é sempre necessária a experiência, a técnica e até um pouco de arte.

Justifica-se toda a dificuldade de adotar uma determinada ou mais classificações, dificilmente na íntegra como formulada pelos autores, em decorrência, entre outras, das características intrínsecas do maciço rochoso. A situação ganha maior foco quando se trata de obras a céu aberto, cujas características e parâmetros exigidos de projeto são bastante diferenciados daqueles impostos por obras confinadas, a exemplo de túneis.

2.4. Sistemas de classificação de maciço rochoso

As metodologias para caracterização e classificação geomecânica de maciços rochosos, mais conhecidas e utilizadas, que serviram de base para o desenvolvimento da presente tese, estão sintetizadas a seguir.

2.4.1. *Rock Quality Designation* (RQD)

O *Rock Quality Designation*, na presente tese, será identificado simplesmente pelas letras iniciais consagradas no meio técnico, RQD, que foi desenvolvido originalmente por Deere (1963), como classificação geomecânica de maciços rochosos.

O RQD representa uma medição indireta do número de descontinuidade do maciço rochoso, a partir de testemunhos de sondagem rotativa com diâmetro NX (54 mm), executada com barrilete duplo. É baseado na percentagem de recuperação, considerando somente os testemunhos com comprimentos superiores a 10 cm e dividindo o somatório dos testemunhos de cada manobra pelo comprimento total perfurado em cada manobra, expresso em porcentagem.

Para a determinação do RQD, consideram-se apenas testemunhos de rocha sã e coerente, excluindo-se aqueles que apresentem elevado grau de alteração e para os quais se considera $RQD = 0\%$. A determinação do comprimento dos testemunhos deverá ser feita segundo o eixo central do furo.

O cálculo do RQD é realizado para cada manobra do furo, conforme expressão:

$$RQD = (\sum C_{10} / C) \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

C_{10} - representa os testemunhos com comprimentos maiores ou iguais a 10 cm.

C - comprimento total da manobra (cm).

Deere (1968) propôs uma relação entre o valor do RQD e a qualidade da rocha, conforme Tabela 2.7.

Tabela 2.7. Qualidade do maciço rochoso a partir do RQD (DEERE *et al.* 1969)

Qualidade da Rocha	RQD (%)
Muito ruim	< 25
Ruim	25 – 50
Regular	50 -75
Bom	75 – 90
Excelente	90 – 100

O RQD deverá ser determinado, conforme proposto por Deere (1968) e recomendações da *Internacional Society of Rock Mechanics* (ISRM 1981):

- A perfuração da sondagem deverá ser executada com sonda rotativa, coroa diamantada, com uso de barrilete duplo giratório com comprimento de no máximo 200 cm e diâmetro maior ou igual a 54,7mm (NX);
- As medidas deverão ser realizadas tendo como referência o eixo do testemunho, com especial atenção para fraturas com direção subparalelas ao eixo do testemunho. Nesse caso, somente considerar os pontos de intersecção da fratura com o eixo; no restante, o comprimento é zero;
- Deverão ser consideradas todas as fraturas presentes, excluindo-se somente aquelas provocadas pelo sondador (quebra no final da manobra e, normalmente, para acondicionar o testemunho na caixa).

Rochas brandas, a exemplos de (filitos, siltitos e arenitos não silicificados) em condições normais, tendem a se fraturar mecanicamente na perfuração mais intensamente que rochas consistentes, apresentando RQD baixo, retratando desta forma as reais características

destes litotipos em termos de resistência, quando comparados, por exemplo, a granitos, basaltos e gnaisses.

No Brasil, o RQD na grande maioria é utilizado em desacordo com as recomendações da IRSM, por considerar somente as fraturas naturais e, também, testemunhos de sondagem com diâmetros menores que os recomendados.

O RQD, com a denominação IQR (Índice de Qualidade da Rocha), é uma forma brasileira não tão utilizada, a qual considera os trechos do furo de sondagem em que o espaçamento das discontinuidades é homogêneo, com comprimento mínimo de 0,50 m, ao invés do comprimento da manobra (Serra Junior *et al.* 1998).

Bieniawski (1989) pondera que com alguns cuidados é possível utilizar testemunhos com diâmetros de 85, 47,5 e 36,5 mm.

Com relação às restrições impostas ao comprimento do barrilete, considera-se que os modelos atualmente no mercado e em uso de empresas especializadas, do tipo duplo giratórios sem comunicação da água de circulação com o testemunho, são muito superiores aos fabricados no passado. A experiência mostra que em sondagens realizadas com boas técnicas e controles de qualidade em rocha consistente, maciça, com projeção do valor do RQD superior a 75%, permite-se o uso de barriletes duplo giratórios de 2,5 e 3,0 m, sobretudo nos últimos trechos de perfuração, a exemplo do Complexo Hidrelétrico do Madeira.

A classificação de maciços rochosos baseada no RQD, embora útil, é muito limitada, visto que não considera as condições geotécnicas das fraturas e nem a presença de outras estruturas da rocha, a exemplo da estratificação, xistosidade, que normalmente imprimem comportamento diferenciado ao maciço rochoso.

As classificações geomecânicas de maciços rochosos mais conhecidas e utilizadas na atualidade (Barton *et al.* 1974; Bieniawski, 1973, 1976, 1989) utilizam o RQD como um dos seis parâmetros geomecânicos classificatórios. Na Figura 2.2, consta o esquema de medir e calcular o RQD.

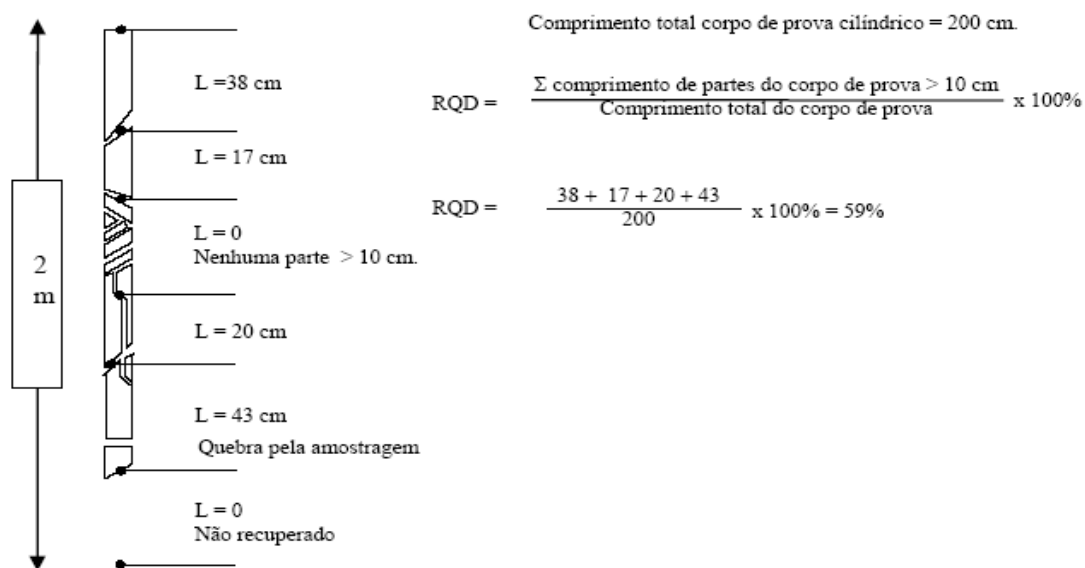


Figura 2.2. Forma de medir e calcular o RQD (Modificado de Deere, 1989)

Outra forma de determinar o RQD é por meio de correlações empíricas, a partir de mapeamento de detalhe das fraturas em afloramentos ou em superfícies escavadas, conforme proposto por Palmström (1982), de acordo com a expressão:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (2.2)$$

Onde J_v é um parâmetro que representa o índice volumétrico (número total de descontinuidades por unidade de comprimento), que interceptam uma unidade de volume do maciço rochoso (1 m^3).

Considerando que nem sempre é fácil ter a percepção tridimensional do afloramento, o valor de J_v pode ser determinado contando as descontinuidades de cada família que interceptam o maciço rochoso ao longo de um determinado comprimento, medido perpendicularmente à direção de cada uma das famílias presentes o que é dado por:

$$J_v = \sum n^\circ \text{ descontinuidades/comprimento medido} \quad (2.3)$$

Sendo:

$$J_v = (n^\circ J_1/L_1) + (n^\circ J_2/L_2) + (n^\circ J_3/L_3) \quad (2.4)$$

A determinação do índice RQD também pode ser feita conforme proposto por Priest e Hudson (1976), a partir da frequência das descontinuidades, contando-se o número de

descontinuidades que interceptam um comprimento L , em qualquer direção. O valor teórico mínimo para o RQD é obtido por meio da expressão:

$$RQD \approx 100.e^{-0,1f} (0,1 f + 1) \quad (2.5)$$

Onde f é o número de descontinuidades por metro e a menor dimensão considerada do testemunho de sondagem na determinação do RQD é de 0,1m.

2.4.2. Classificação *Tunnelling Quality Index* (Q) de Barton

O *Tunnelling Quality Index* (Q), na presente tese, simplesmente identificado como sistema Q, foi desenvolvido por Barton *et al.* (1974) para projeto de suporte de túneis, tendo como base a observação de um grande número de escavações subterrâneas.

2.4.2.1. Desenvolvimento do sistema Q

O sistema Q utiliza seis parâmetros para definir a qualidade de um determinado maciço rochoso, a saber:

- RQD - Índice RQD;
- J_n - Índice dos números de famílias de fraturas;
- J_r - Índice de rugosidade das fraturas;
- J_a - Índice de alteração das paredes das fraturas;
- J_w - Índice do caudal afluyente;
- SRF - Índice do estado de tensão do maciço (*Stress Reduction Factor*).

A qualidade do maciço rochoso *Tunnelling Quality Index* (Q) é obtida a partir do produto dos três quocientes:

$$Q = (RQD / J_n) . (J_r / J_a) . (J_w / SRF) \quad (2.6)$$

Onde:

RQD/J_n - representa o tamanho dos blocos do maciço rochoso;

J_r/J_a - características de resistência ao cisalhamento das superfícies das fraturas;

J_w / SRF – representa o estado de tensão existente no maciço rochoso.

O valor de Q, que pode variar entre aproximadamente 0,001 e 1000, é função dos valores dos parâmetros que constituem os fatores, os quais, por sua vez, podem variar dentro da gama de valores indicados nas Tabelas 2.8 a 2.13.

O RQD é qualificado conforme Tabela 2.7, sendo adotado em intervalos de 5 (cinco) (100, 95, 90,...). Quando o RQD for menor que 10 (inclusive 0), é considerado um valor nominal de 10 no cálculo de Q.

Tabela 2.8. Índice da família de juntas (Jn)

Descrição	Valor
A – Nenhuma ou poucas fraturas presentes	0,5 – 1,0
B – Uma família presente	2
C – Uma família mais fraturas esparsas presentes	3
D – Duas famílias presentes	4
E – Duas famílias mais fraturas esparsas presentes	6
F – Três famílias presentes	9
G – Três famílias mais fraturas esparsas presentes	12
H – Quatro ou mais famílias presentes	15
I – Rocha esmagada	20
Notas: (1) Nas interseções utilizar 3 x Jn. (2) Nos emboques utilizar 2 x Jn.	

Tabela 2.9. Índice de rugosidade das juntas (Jr)

Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha a rocha entre as paredes das fraturas	
Descrição	Valores
A – Fraturas descontínuas	4
B – Fraturas ásperas ou irregulares , onduladas	3
C – Fraturas lisas onduladas	2
D – Fraturas polidas, onduladas.	1,5
E – Fraturas ásperas ou irregulares, planas.	1,5
F – Fraturas lisas, planas	1,0
G – Fraturas polidas, planas.	0,5
Fraturas onde ocorreu deslocamento relativo. Não há contato rocha–rocha entre as paredes das fraturas	
Descrição	Valores
H – Fraturas com minerais argilosos	1,0
I – Zonas esmagadas	1,0

Tabela 2.10. Índice de alteração das paredes das fraturas (Ja)

Fraturas onde não houve deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas		
Descrição	Ja	Ø °aprox.
A – Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto)	0,75	-
B – Paredes sem alteração, somente leve descoloração.	1,0	25 ° – 35 °
C – Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas.	2,0	25 ° – 30 °
D – Paredes com películas siltosas ou areno – argilosas	3,0	20° – 25°
E – Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito (talco, grafite, etc.) e pequena quantidade de minerais expansivos	4,0	8° - 16°
Fraturas sem deslocamento relativo (menos de 10cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas		
Descrição	Ja	Ø °aprox.
F – Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas	4,0	25 ° – 30 ° -
G – Fraturas com preenchimento argiloso sobre-consolidado (espessura 5 mm)	6,0	16 ° – 24 °
H – Fraturas com preenchimento argiloso sub-consolidado (espessura 5 mm)	8,0	12° – 16°
I – Fraturas com preenchimento argiloso expansivo como por exemplo, a montmorilonita (espessura 5 mm)	8,0 - 12,0	6° – 12°
Fraturas onde houve deslocamento relativo. Não há contacto rocha-rocha entre as paredes das fraturas		
Descrição	Ja	Ø °aprox.
J, K, L– Zonas com rochas desintegradas ou esmagadas, com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6 – 8 8 – 12	6 ° – 24°
M – Zona siltosa ou areno-argilosa com pequena quantidade de argila	5,0	
N, O, P – Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10 – 13 13 – 20	6° – 24°

Tabela 2.11. Índice do caudal afluyente (Jw)

Descrição	Valor
A – Caudal afluyente nulo ou pequeno (< 5 L/min) – pressão < 1 kg/ cm ²	1,0
B – Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arrasta o preenchimento das fraturas – pressão = 1,25 Kg / cm ²	0,66
C – Caudal grande ou alta pressão em rochas competentes sem preenchimento – pressão = 2,5 Kg / cm ²	0,5
D – Caudal grande ou alta pressão, considerável arrastamento do preenchimento das fraturas – pressão = 2,5 – 10 Kg / cm ²	0,33
E – Caudal excepcionalmente grande ou pressão explosiva, decaindo com o tempo – pressão > 10 Kg / cm ²	0,2 – 0,1
F – Caudal excepcionalmente grande ou pressão contínua, sem decaimento notável – pressão > 10 Kg / cm ²	0,1 – 0,05

Tabela 2.12. Índice do estado de tensão do maciço (SRF)

Zonas alteradas	
Descrição	Valor
A – Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer).	10,0
B – Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação ≤ 50 m)	5,0
C – Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação > 50 m)	2,5
D – Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila (profundidade qualquer)	7,5
E – Zona esmagada em rocha competente , sem argila (profundidade da escavação ≤ 50 m)	5,0
F – Zona esmagada em rocha competente , sem argila (profundidade da escavação > 50 m)	2,5
G – Fraturas abertas, fraturação muito intensa (profundidade qualquer)	5,0
Rocha competente, problemas de tensões de rochas	
Descrição	Valor
H – Tensões baixas, próximo a superfície ($\sigma_c / \sigma_1 > 200$)	2,5
J – Tensões médias ($\sigma_c / \sigma_1 = 200 - 10$)	1,0
K – Tensões altas ($\sigma_c / \sigma_1 = 10 - 5$)	0,5 – 2
L – Explosões de rocha moderado ($\sigma_c / \sigma_1 = 5 - 2,5$)	5,0 – 10,0
M – Explosões de rocha intenso ($\sigma_c / \sigma_1 = 2,5$)	10,0-20,0
Rocha esmagada: Plastificação de rochas incompetentes sob influência de altas pressões	
Descrição	Valor
N – Pressão moderada	5,0 - 10,0
O – Pressão elevada	10,0-20,0
Rochas expansivas, atividade química expansiva devido à presença de água	
Descrição	Valor
P – Pressão de expansão moderada	5,0 - 10,0
R – Pressão de expansão elevada	10,0-15,0
Sendo: σ_c = resistência a compressão simples e σ_1 = tensão principal máxima	

O maciço é classificado segundo nove qualidades enumeradas na Tabela 2.13, de acordo com o valor de Q.

Tabela 2.13. Qualificação do maciço rochoso do sistema Q.

Descrição	Valor de Q
1. Maciço de excepcional má qualidade	0,0001 – 0,01
2. Maciço de extrema má qualidade	0,01 – 0,1
3. Maciço de muito má qualidade	0,1 – 1,0
4. Maciço de má qualidade	1,0 – 4,0
5. Maciço de qualidade regular	4,0 – 10,0
6. Maciço de boa qualidade	10,0 – 40,0
7. Maciço de muito boa qualidade	40,0 – 100,0
8. Maciço de extrema qualidade	100,0 – 400,0
9. Maciço de excepcional qualidade	400,0 – 1000,0

2.4.2.2. Suporte por meio do sistema Q

Barton *et al.* (1974) relacionam o valor de Q com as necessidades exigidas de suporte de determinado túnel, definido como Dimensão Equivalente (D_e) da escavação. Essa grandeza é obtida pela divisão do vão (B), correspondente ao diâmetro ou altura da escavação e pelo índice *ESR* (*Excavation Support Ratio*):

$$D_e = B/ESR \quad (2.7)$$

Os valores de *ESR* estão diretamente relacionados à finalidade e grau de segurança da escavação, estando apresentados na Tabela 2.14. As dimensões do suporte são obtidas por meio da relação entre Q e a dimensão equivalente (D_e), conforme Figura 2.3.

Tabela 2.14. Índice de suporte (ESR) por tipo de escavação (BARTON *et al.* 1974).

Tipo de escavação	ESR
A – Escavações temporárias em minas	3 – 5
B – Poços verticais (shafts): Seção circular	2,5
Seção retangular ou quadrada	2,0
C – Escavações permanentes em minas, túneis com fluxo d'água para hidrelétricas (excluindo túneis de adução de alta pressão), túneis de desvio, túneis pilotos e frentes de avanço de grande porte.	1,6
D – Cavernas de armazenagem, túneis de acesso em geral, câmaras de equilíbrio, pequenas rodovias e linhas ferroviárias subterrâneas e acesso a cavernas subterrâneas.	1,3
E – Usinas hidrelétricas, grandes auto-pistas e linhas ferroviárias subterrâneas, cavernas para fins militares, portais, interseções.	1,0
F – Escavações para fins nucleares, estações ferroviárias subterrâneas e fábricas.	0,8

O comprimento das ancoragens (L) pode ser estimado a partir do vão da escavação (B) em metros e do valor do índice de suporte da escavação (ESR) por meio da expressão de Barton *et al.* (1974):

$$L = (2 + 0,15 \cdot B) / \text{ESR} \quad (2.8)$$

O máximo vão auto-sustentável (M_{VA}) é estimativamente determinado pela expressão:

$$M_{VA} \approx 2 \text{ ESR} \cdot Q^{0,4} \quad (2.9)$$

sendo:

M_{VA} - máximo vão auto-sustentável (m);

ESR - índice de suporte da escavação;

Q - índice de Barton.

As classes de suporte permanentes definidas para o sistema Q também poderão ser determinadas com base no ábaco (Figura 2.3) e Tabela 2.15, que inclui soluções de suporte com concreto projetado reforçado com fibras de aço, largamente aplicado na atualidade, em decorrência do ganho de resistência desse revestimento, conforme Grimstad e Barton (1993).

Tabela 2.15. Categorias de suporte permanentes conforme Figura 2.3 (Modificado de Grimstad e Barton, 1993).

(1) – Sem suporte	(6) – Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 90-120mm, e tirantes.
(2) – Tirantes curtos e esporádicos	(7) – Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 120-150mm, e tirantes.
(3) – Tirantes sistemáticos	(8) – Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 150mm, reforçado com tirantes e arcos de concreto.
(4) – Sistema de tirantes com concreto projetado, espessura 40-100mm.	
(5) – Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 50-90mm, e tirantes.	(9) – Estrutura de concreto

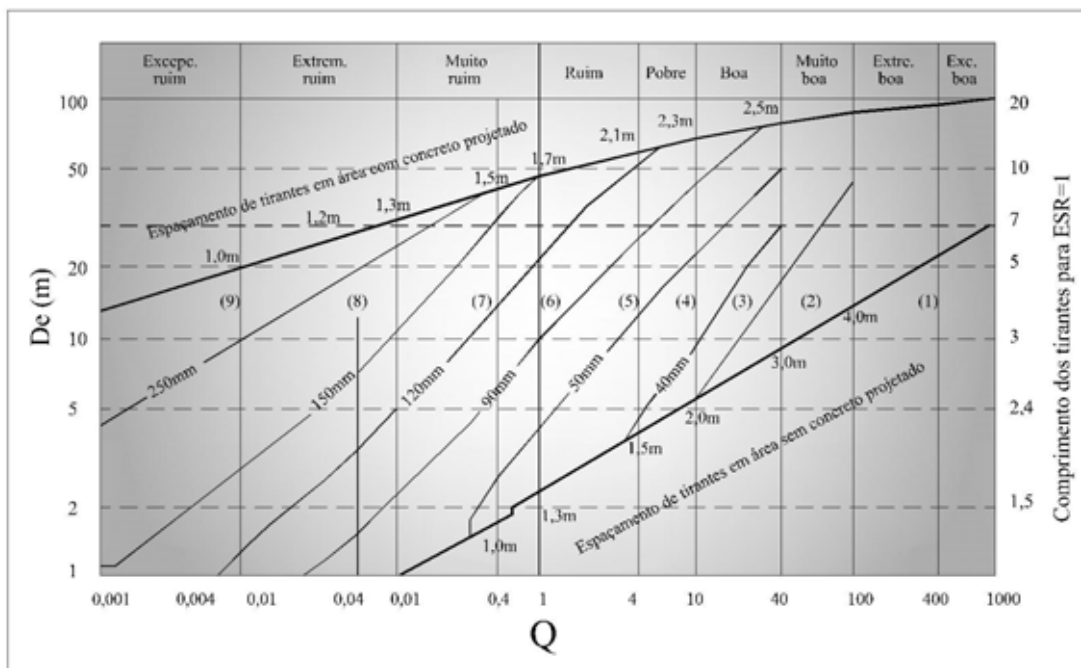


Figura 2.3. Classes de suporte permanentes definidas para o sistema Q (Grimstad e Barton, 1993).

A exemplo de um túnel de adução de uma hidrelétrica com vão 10 m, em maciço rochoso com Q igual a 1, de acordo com a Figura 2.3, situa-se na classe (5) do ábaco, limite de maciço ruim, com suporte previsto para estabilização constituído de uma malha de tirantes com 3 m de comprimento, distribuídos em malha de 2,5 m e aplicação de uma camada com 9 cm de concreto projetado com fibra de aço (Tabela 2.15).

Barton *et al.* (1974) e Grimstad e Barton (1993) apresentaram uma relação entre o valor de Q e a pressão permanente de suporte no teto da escavação (P_{roof}), de acordo com a expressão:

$$P_{\text{roof}} = 200 / (J_r Q^{1/3}) \quad (2.10)$$

onde:

P_{roof} - pressão de suporte permanente no teto da escavação (kPa);

J_r - índice de rugosidade das fraturas;

J_n - índice de família de juntas.

2.4.2.3. Convergência do Túnel

Barton (1998), com base no sistema Q, apresenta cálculos estimativos dos deslocamentos medidos de convergência do túnel. Esses deslocamentos são relacionados com o vão e a altura do túnel (ou diâmetro no caso da seção ser circular), através das seguintes expressões:

$$\Delta_v \approx B/100.Q. (\sigma_v / \sigma_c)^{1/2} \quad (2.11)$$

$$\Delta_h \approx H/100.Q. (\sigma_h / \sigma_c)^{1/2} \quad (2.12)$$

sendo:

B - vão da escavação;

H - altura do túnel (ou diâmetro);

σ_v - tensões verticais;

σ_h - tensões horizontais;

σ_c - resistência à compressão uniaxial.

2.4.2.4. Subsistema Q_{TBM}

Baseado no sistema Q, Barton (2000) estabeleceu uma metodologia empírica para previsão do desempenho de escavações com tuneladoras TBM que operam essencialmente em maciços rochosos e de modo aberto, denominado de Subsistema Q_{TBM} .

A base dessa metodologia consiste na utilização de um índice Q_0 , que é calculado substituindo na expressão de cálculo de Q o valor de RQD por um outro obtido, segundo o eixo do túnel (RQD_0), e pela utilização da relação J_r/J_a (que representa a resistência ao cisalhamento das descontinuidades), relativa à família de descontinuidades que mais influencia o processo de cisalhamento:

$$Q_0 = (RQD_0 / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w / SRF) \quad (2.13)$$

O valor de Q_{TBM} é calculado a partir de Q_0 com a inclusão de outros parâmetros que estão relacionados com o desempenho da tuneladora. Essa metodologia, específica a escavações de túneis com tuneladora (TBM), não foi incluída nos estudos desta tese.

2.4.3. Classificação de Bieniawski (Sistema RMR)

Rock Mass Rating (RMR), sistema de classificação de maciços rochosos desenvolvido por Bieniawski (1973, 1976), é também conhecido como Classificação Geomecânica RMR, formulada a partir de casos históricos, tendo sido originalmente muito utilizada em túneis e mineração na África do Sul. Nesta tese, o sistema *Rock Mass Rating* será identificado pelas letras iniciais RMR.

O RMR é atualmente muito divulgado e tem sido sucessivamente refinado à medida que são incluídos os resultados de análises de um maior número de casos práticos. É baseado no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros, que o autor considerou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos. O somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui o RMR, ao qual corresponde uma das cinco classes de qualidade de maciços rochosos.

Os parâmetros utilizados, que podem ser medidos no campo ou em testemunhos de sondagem, são os seguintes:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- RQD;
- Espaçamentos das descontinuidades;
- Condição das descontinuidades;
- Influência da água;
- Orientação das descontinuidades.

Implementar determinada classificação a um maciço rochoso implica na divisão deste em várias regiões estruturais (zonas) a serem classificadas separadamente. As fronteiras dessas regiões coincidem usualmente com estruturas geológicas principais, tais como falhas ou contatos litológicos. Algumas situações, dentro do mesmo tipo de rocha, como mudanças significativas no espaçamento das descontinuidades, ou das características destas, podem obrigar à subdivisão do maciço rochoso num maior número de regiões estruturais de menor dimensão.

A Tabela 2.16 reúne os 5 parâmetros classificatórios com os respectivos pesos relativos. O peso relativo da condição das descontinuidades pode ser determinado, com base na Tabela 2.17 se houver uma descrição mais detalhada das juntas. Nesse caso, o valor do peso é determinado com base na soma de 5 condições características. Não havendo valores disponíveis para utilização da Tabela 2.17, deverá ser escolhida a descrição da Tabela 2.16 mais próxima da realidade.

A orientação das descontinuidades corresponde a um fator de correção com peso negativo, determinado a partir da Tabela 2.18. A direção das descontinuidades aqui referida corresponde à direção do plano (atitude) dessas. Exemplificando-se: a escavação de um túnel poderá ocorrer com a abertura no sentido da inclinação da descontinuidade ou a abertura contra a inclinação.

De acordo com a Tabela 2.19, classifica-se o maciço rochoso em cinco classes de acordo com o valor do índice *RMR*, dando ainda indicações do tempo médio de auto-sustentação para vãos não revestidos em túneis (períodos de tempo durante os quais deverá ser colocado o suporte sob risco de ocorrer o colapso previsível da cava).

Na Figura 2.4, está apresentado o ábaco para determinação do período de auto-sustentação do túnel sem revestimento, em função do *RMR* e do vão do teto.

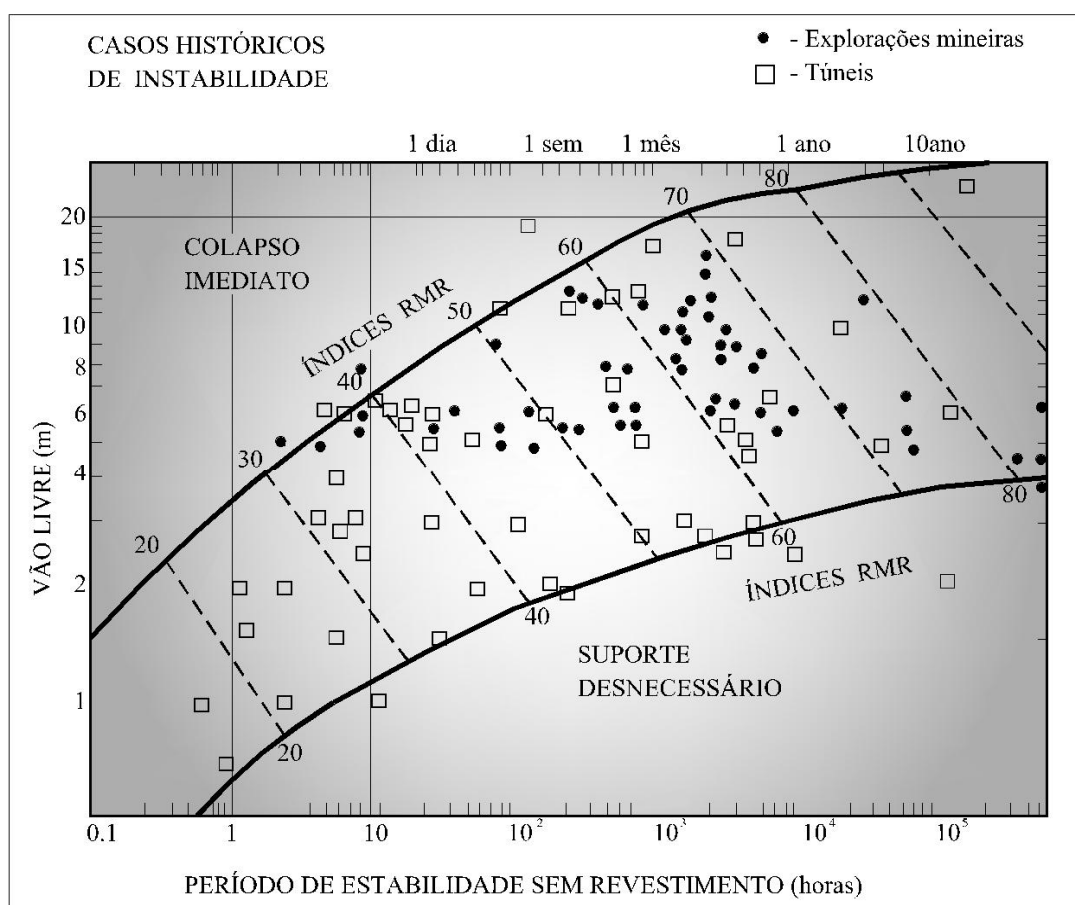


Figura 2.4. Ábaco para determinação do período de estabilidade sem revestimento do *RMR* (modificado de Bieniawski 1989).

Tabela 2.16. Parâmetros e respectivos pesos da classificação geomecânica RMR (1989).

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Resistência à compressão Pontual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-2510 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Preenchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Vazão por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água / σ_1 tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Infiltração moderada	Problemas graves de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Tabela 2.17. Caracterização da condição das descontinuidades RMR (1989).

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente Alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Tabela 2.18. Ajuste da orientação das descontinuidades *RMR* (1989)

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

Conforme poderá ser visto na Tabela 2.18, o sexto parâmetro da classificação de Bieniawski (1989), de acordo com os autores, Steffen (1976), Romana (1993), Hack (2002) apud (MALAFAIA, 2007), penaliza em excesso a nota final do *RMR*, quando aplicada a taludes.

Tabela 2.19. Classes de maciço rochoso *RMR* (1989)

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

Bieniawski (1989) recomendou métodos de escavação (uso de explosivos) e tipo de suporte definitivo de túneis com cerca de 10 m de vão e tensão vertical menor que 25 MPa, conforme Tabela 2.20.

Tabela 2.20. Método de escavação e suporte para túneis com 10m de largura RMR (1989).

Maciço	Escavação	Suporte		
Classes	Método	Tirantes (d=2cm, com calda de cimento)	Concreto projetado	Cambotas metálicas
I RMR: 81 – 100	Face completa Avanço: 3m	Geralmente não precisa suporte, exceto tirantes localizados.		
II RMR: 61 - 80	Face completa Avanço: 1 -1,5m. Suporte pronto a 20m da frente.	Tirantes exporáticos no teto, L=3m e S=2,5m. Malha de aço opcional	Teto espessura=5cm, onde precisar	Nulo
III RMR: 41 - 60	Frente em bancadas Avanço: 1-1,5m na calota. Suporte pronto a 10m da frente, instalado a cada avanço de fogo.	Tirantes no teto e paredes com S=1,5-2m e L=4m. Malha de aço no teto.	Teto e=5-10cm. Paredes e=3cm.	Nulo
IV RMR: 21 - 41	Frente em camadas Avanço: 1 -1,5m na calota. Suporte pronto a 10m da frente, instalado de forma paralela com a escavação.	Tirantes com S=1,5-2m e L=4,5m. Malha de aço no teto e paredes.	Teto e=10-15cm. Paredes e=10cm.	Cambotas metálicas leves e médias, S=1,5m, onde precisar.
V RMR: < 20	Múltiplas frentes. Avanço: 0,50 -1,5m na calota. Suporte instalado concomitantemente à escavação. Concreto no menor tempo após o fogo.	Tirantes com S=1,0-1,5m e L=5-6m. Malha de aço no teto e paredes. Tirantes no arco invertido.	Teto e=15 - 20cm. Paredes e =15cm. Frente e=5cm.	Cambotas metálicas médias a pesadas, S=0,75m e aduelas. Arco invertido.

2.4.4. Classificação de Manoel Rocha (MR)

Conforme Ojima (1982), o sistema de classificação geomecânico de Rocha (1976), identificado por MR para maciços rochosos fraturados, foi proposto essencialmente para a fase de projeto de túneis, com a possibilidade de ajustes durante a construção, a partir das observações de campo e avaliação mais precisa dos parâmetros.

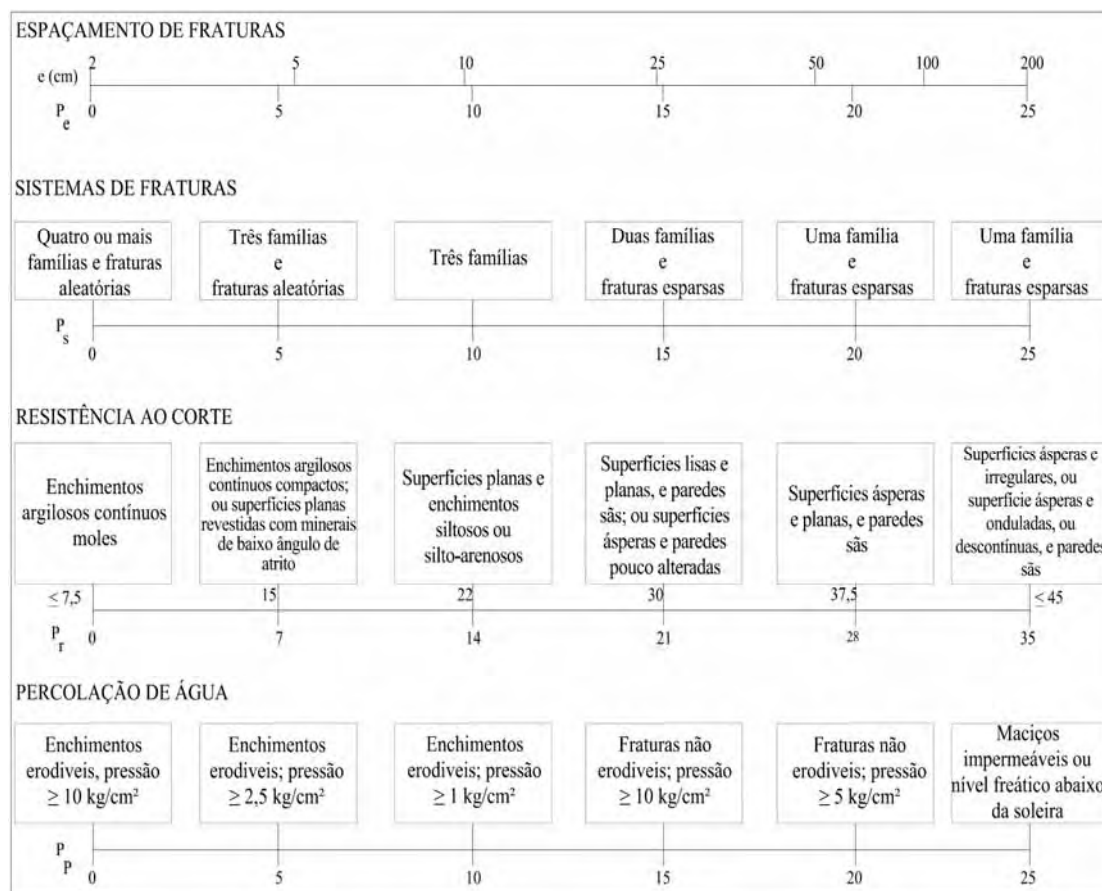
O maciço rochoso é analisado a partir de quatro parâmetros classificatórios característicos das descontinuidades:

- Espaçamento de fraturas (Pe);
- Sistemas de fraturas (Ps);
- Resistência ao cisalhamento do plano de fratura (Pr);
- Condições de percolação de água (Pp).

Conforme Tabela 2.21 a cada parâmetro é atribuído um peso, sendo a somatória dos pesos o MR:

$$MR = Pe + Ps + Pr + Pp \quad (2.14)$$

Tabela 2.21. Parâmetros de classificação do sistema MR (Modificada de OJIMA, 1982)



A classificação de Rocha introduziu uma constante K que se relaciona com espessuras do coroamento do vão do túnel (h_c) e das paredes (h_n), de acordo com as Figuras 2.5 e 2.6 e expressões a seguir:

$$MR \geq 60, \text{ para } h_n = 0 \quad (2.15)$$

$$50 \leq MR < 60, \text{ para } 0 \leq h_n \leq h_c/2 \quad (2.16)$$

$$MR < 50, \text{ para } h_n = h_c/2 \quad (2.17)$$

$$h_c = K.L \quad (2.18)$$

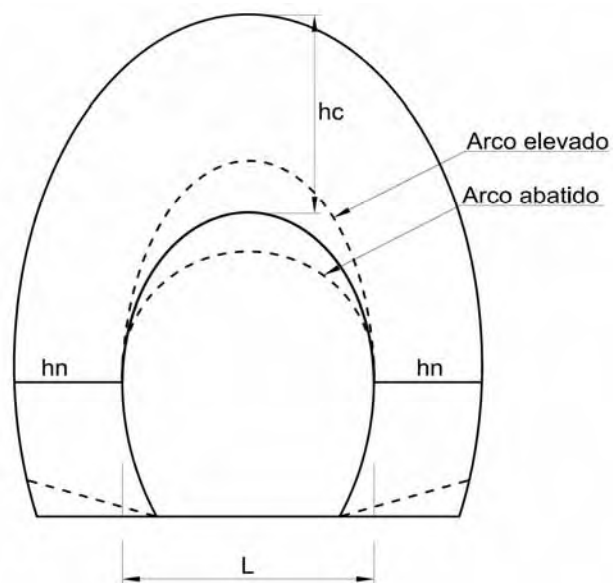


Figura 2.5. Classificação de maciços rochosos fraturados do MR: Seção tipo esquemática (OJIMA, 1982).

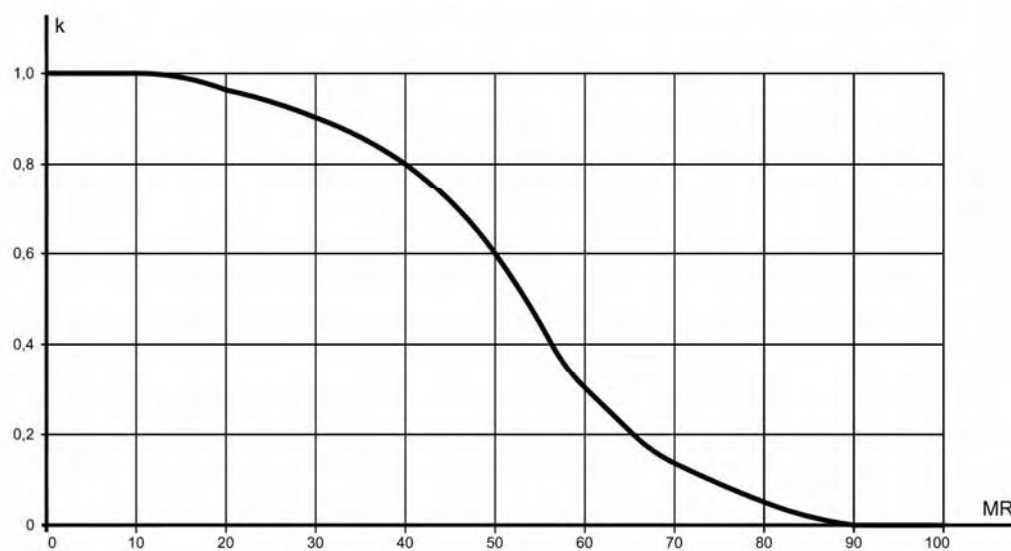


Figura 2.6. Sistema MR - Ábaco para determinação do K (Ojima, 1982).

Determinado o valor de MR , os valores de K podem ser obtidos por meio do ábaco da Figura 2.6 e o maciço rochoso pode ser enquadrado numa das cinco classes da classificação de Rocha e avaliado o sistema de suporte, conforme Tabela 2.22.

Tabela 2.22. Classificação de maciços rochosos fraturados, classes de MR e definição de suporte.

Classes	MR	K	Necessidade de Suporte
I	80 - 100	0 - 0,05	Esporádico no teto (Ex. Ancoragem)
II	60 - 80	0,05 - 0,3	Sistemático no teto
III	50 - 60	0,3 - 0,6	Sistemático no teto Esporádico nos pés-direitos
IV	30 - 50	0,6 - 0,9	Sistemático no teto e pés-direitos
V	0 - 30	0,9 - 1	Sistemático no teto e pés-direitos

2.4.5. Rock Mass Index (R_{Mi})

Palmström (1996a, 1996b), a partir dos parâmetros dos sistemas RMR (Bieniawski, 1976) e Q (Barton, 1974), formulou o sistema R_{Mi} para caracterizar a resistência de maciços rochosos em projetos de túneis.

O *Rock Mass Index*, identificado nesta tese pelas letras iniciais R_{Mi}, é definido a partir da equação:

$$R_{Mi} = \sigma_{ci} \cdot JP \quad (2.19)$$

Onde:

R_{Mi} - índice do maciço rochoso;

σ_{ci} - resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;

JP - parâmetro de descontinuidade, que é composto pelo volume do bloco e três características (rugosidade, alteração e dimensões) das descontinuidades, podendo variar entre 0 (zero) para rochas muito fraturadas e 1 (um) para rocha intacta.

A influência do valor de *JP* na resistência do maciço rochoso foi obtida por meio de oito ensaios de calibração de grande escala e uma retro-análise, resultando na seguinte expressão:

$$JP = 0,2 \cdot \sqrt[3]{JC} \cdot V_d^D \quad (2.20)$$

Onde:

JP - Fator de condição da descontinuidade;

V_d - volume do bloco (m³);

D - diâmetro do bloco de prova (m), calculado a partir da equação:

$$D = 0,37 \cdot JC^{-0,2} \quad (2.21)$$

O volume do bloco (V_d) pode ser determinado de várias formas e a partir de várias características do maciço, como mostrado por Palmström (1996a). O volume do bloco pode ser medido: (1) diretamente *in situ* ou por testemunhos de sondagem; (2) determinado a partir do espaçamento das descontinuidades; (3) a partir de medidas da frequência das descontinuidades; (4) calculado através da contagem volumétrica das descontinuidades e (5) estimado a partir dos tipos e formas dos blocos.

O fator de condição da descontinuidade, que depende do comprimento e persistência das descontinuidades, assim como da rugosidade e alteração da superfície dessas, é expresso pela seguinte fórmula:

$$JC = JL \cdot \left(\frac{JR}{JA} \right) \quad (2.22)$$

Sendo:

JL - fator de comprimento e persistência da descontinuidade;

JR - fator de rugosidade da descontinuidade; e

JA - fator de alteração da descontinuidade.

Os parâmetros JR , JL e JA podem ser obtidos, respectivamente, a partir das Tabelas 2.23 a 2.26.

JC varia entre 1 e 2, podendo o valor de JP variar entre $0,2 \cdot V_d^{0,37}$ e $0,28 \cdot V_d^{0,32}$. Desta forma, considerando que $JC = 1,75$, o JP poderá ser determinado com base na expressão:

$$JP = 0,25 \cdot V_d^{0,37} \quad (2.23)$$

Tabela 2.23. Valores do fator de rugosidade (JR) do RMI (modificado de Palmström, 1996a)

Rugosidade a pequena escala	Rugosidade de grande escala				
	Planar	Ligeiramente	Fortemente	Com degraus	Embricados
Muito rugosa	3	4	6	7,5	9
Rugosa	2	3	4	5	6
Ligeiramente	1,5	2	3	4	4,5
Lisa	1	1,5	2	2,5	3
Polida	0,75	1	1,5	2	2,5
Espelhada ⁽¹⁾	0,6-1,5	1-2	1,5-3	2-4	2,5-5
Para descontinuidades preenchidas: JR = 1. Para descontinuidades irregulares é sugerido JR = 5					
(1) Para descontinuidades espelhadas o valor de JR depende da ocorrência das situações, os maiores valores são usados para superfícies com expressivo estriamento.					

Tabela 2.24. Fator de tamanho e continuidade (JL) do RMI (modificado de Palmström, 1996a)

Comprimento da descontinuidade (m)	Termo	Tipo	JL	
			Descontinuidade não persistente (2)	Descontinuidade persistente
<0,5	Muito curta	Acamamento ou foliação	3	6
01-1,0	Curta/ pequena	Descontinuidade	2	4
1-10	Mediana	Descontinuidade	1	2
10-30	Longa/ comprida	Descontinuidade	0,75	1,5
> 30	Muito comprida	Preenchida, cisalhada (1)	0,5	1
Obs.: (1) Quando da existência de uma única descontinuidade, deve-se tratar separadamente. (2) Descontinuidades não persistentes em rochas maciças.				

Tabela 2.25. Fator de alteração da descontinuidade (JA) do R_{Mi} (modificado de Palmström, 1996a)

CONTRATO ENTRE AS PAREDES DA DESCONTINUIDADE			
Termo		Descrição	JA
Descontinuidades limpas			
Descontinuidades fechadas ou soldados	Preenchimento mole impermeável (quartzo, epidoto, etc.)		0,75
Paredes de rocha fresca	Sem recobrimento ou preenchimento da superfície da descontinuidade, exceto por degradação (staining).		1
Alteração das paredes	A superfície da descontinuidade exibe alteração maior que a rocha		2
	Superfície da descontinuidade com dois tipos de alteração maior que a rocha		4
Cobertura ou preenchimento fino			
Areia, silte, calcita etc. Argila, clorita, talco etc.	Cobertura de material granular sem argila		3
	Cobertura de minerais mole e coesivos		4
DESCONTINUIDADE PREENCHIDAS, CONTATO PARCIAL OU SEM CONTATO.			
Tipo de material do preenchimento	Descrição	JA	
		Parcial Preenchimento Fino <5 mm (*)	Nulo Preenchimento espesso >5 mm
Areia, silte, calcita etc.	Preenchimento de material granulares sem argila	4	8
Materiais argilosos compacto	Preenchimento de materiais argilosos duros	6	10
Materiais argilosos moles	Preenchimento de argila com médio ou baixa relação de pré-adensamento	8	12
Materiais argilosos expansivos	Material de preenchimento com claras propriedades expansivas	8-12	12-20
Obs. (*) Baseado na divisão de espessuras do sistema RMR (Bieniawski, 1974).			

O valor do R_{Mi} varia entre 0,001 e 100, de acordo com os intervalos relacionados com a resistência do maciço rochoso indicados na Tabela 2.26.

Tabela 2.26. Classificação do R_{Mi} (modificado de Palmström, 1996a)

Discriminação do R _{Mi}	Relacionado à resistência do maciço rochoso	Valor de R _{Mi}
Extremamente baixo	Extremamente fraco	<0,001
Muito baixo	Muito fraco	0,001-0,01
Baixo	Fraco	0,01-0,01
Moderado	Médio	0,1-1,0
Alto	Resistente	1,0-10
Muito alto	Muito resistente	10-100
Extremamente alto	Extremamente resistente	>100

2.4.6. Índice *Slope Mass Rating* - SMR

O índice *Slope Mass Rating* (Romana, 1985), identificado nesta tese pelas letras iniciais SMR, foi desenvolvido para classificação de taludes a partir do RMR, de Bieniawski (1976, 1979).

Determinam-se as descontinuidades mais desfavoráveis do talude em análise e as classificam de acordo com os fatores de ajustes (F1, F2, F3 e F4), que dependem da geometria e direção do talude, das atitudes das descontinuidades e do tipo de escavação empregada, conforme Tabela 2.27.

Tabela 2.27. Fatores de ajustes do índice SMR, F1, F2 e F3.

Casos		Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável
P	$ \alpha_j - \alpha_t $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
T	$ (\alpha_j - \alpha_t) - 180^\circ $					
P/T	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
P	F2	0,15	0,40	0,70	1	1
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_t$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_t$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60
Obs.: P = ruptura plana; T = tombamento; α_t = azimuth do mergulho do talude; α_j = azimuth do mergulho da junta; β_t = inclinação do talude; β_j = mergulho da junta.						

Determina-se, para cada descontinuidade, o índice SMR, utilizando-se a fórmula ajustada para o talude:

$$SMR = [RMR_{\text{básico}} - (F1 \times F2 \times F3)] + F4 \quad (2.24)$$

Onde:

$RMR_{\text{básico}}$ – é o valor do RMR, versão 1989, sem nenhum tipo de ajuste na orientação das juntas;

F1 - reflete o paralelismo entre o talude e a direção da descontinuidade;

F2 - referente ao mergulho da descontinuidade no plano de escorregamento;

F3 - referente à relação entre o ângulo do talude e o mergulho da descontinuidade;

F4 - o ajuste para esse fator é função do tipo de escavação realizada (Tabela 2.28).

Tabela 2.28. Fator de ajuste F4, função do método de escavação.

Método de escavação	Talude natural	Pré-fissuramento	Pós-fissuramento	Detonação regular	Detonação deficiente
F4	+15	+10	+10	0	-8

Em função da geometria e do caráter provisório ou definitivo do talude, é recomendado ponderar os resultados do *Slope Mass Rating* (SMR) obtido, multiplicando-o por um dos seguintes fatores da Tabela 2.29.

Tabela 2.29. Ponderação do SMR.

Tipo de Talude	Fator
Taludes provisórios verticais com menos de 10,0m de altura	1,3
Taludes provisórios verticais com mais de 10,0m de altura	1,0
Taludes provisórios inclinados	1,5
Taludes definitivos inclinados, limitados inferiormente por berma com largura de 4,0m ou mais	1,3
Taludes definitivos verticais com menos de 10,0m de altura em que os blocos mais instáveis já caíram ou foram removidos	1,3
Taludes definitivos verticais com mais de 10,0m de altura	0,9
Taludes definitivos subjacentes a estruturas pesadas de concreto	0,7

As condições de estabilidade do talude e a previsão de suportes para estabilização são definidas a partir da classe do SMR, conforme Tabela 2.30.

Tabela 2.30. Classes de maciço do SMR e previsão dos tratamentos de taludes

Classes	I	II	III	IV	V
Descrição	muito bom	bom	razoável	ruim	muito ruim
SMR	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20
Estabilidade	totalmente estável	estável	parcialmente estável	instável	muito instável
Rupturas	nenhuma	alguns blocos	planas em algumas juntas ou muitas cunhas	planar ou grandes cunhas	grande ruptura planar ou circular
Suportes	sem tratamentos ou localizados	tratamentos ocasionais ou localmente sistemáticos	tratamentos sistemáticos	retaludamento parcial remoção blocos instáveis, tratamentos sistemáticos	retaludamento

2.4.7. DMR - uma adaptação do RMR

Conforme Romana (2003a), a classificação geomecânica RMR de Bieniawski (1973) foi proposta originalmente para túneis, taludes e fundações. Seu uso de fato é muito variável, com maior frequência em obras subterrâneas, ocasionalmente em taludes, e muito raramente em fundação de barragens. A adaptação do RMR para fundações é basicamente no parâmetro relativo à influência da água, considerado pelo autor a grande dificuldade de uso desse índice em barragens.

É habitual definir um RMR básico (RMR_b), independente da obra a construir, com a soma dos cinco parâmetros do RMR sem aplicar nenhum ajuste. O quinto parâmetro, WR, está relacionado com a água e tem peso no RMR_b de 15 pontos (15% do total). Dessa forma, o melhor método para determinar a influência da água deste parâmetro é usar as relações das pressões intersticiais (ROMANA, 2004), a partir da expressão:

$$r_u = u/\sigma_u \quad (2.25)$$

Onde:

u - é a pressão intersticial;

σ_u - a tensão vertical

O valor WR indicado na Tabela 2.31 pode ser estimado por meio da equação:

$$WR = 10\text{Log}(1/r_u) - 1,5 \quad (2.26)$$

Tabela 2.31. Relação entre WR e r_u

WR	15	10	7	4	0
r_u (BIENIAWSKI, 1978)	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
r_u (1)	0 – 0,2	0,07	0,14	0,28	0,7
Obs (1). Válida para $0,02 < r_u < 0,7$					

Segundo Romana (2004), nas proximidades da barragem, o valor r_u varia em cada ponto dependendo da geometria do barramento, da altura da lâmina d'água e da eficiência da cortina de injeção (se existe). Dessa forma, seria necessário um modelo de fluxo de três dimensões da barragem e seu entorno para determinar os valores exatos de r_u . Em qualquer caso, para $r_u > 0,4$, referente a maior parte da zona à montante, o parâmetro WR não atinge valores superiores a 2,5.

2.5. Geological Stress Index (GSI) - Índice de Resistência Geológica

2.5.1. Considerações gerais

Miranda (2003) menciona os sistemas RMR de Bieniawski, (1989) e Q de Barton *et al.* (1974) como os mais utilizados, por terem uma larga e bem estudada base de dados de casos de obra e de serem de aplicação relativamente fácil.

De 1980 a 1994, os sistemas RMR e Q foram utilizados na estimativa das constantes m e s para maciços rochosos do critério de ruptura de Hoek-Brown (1980 b). Para determinação dos parâmetros constantes da equação, Hoek (1994) introduz o *Geological Stress Index*, para uso em mineração a partir da simplificação dos índices RMR e Q, que nesta tese será identificado pelas letras iniciais GSI. Esse sistema é baseado no conceito de que a resistência de um maciço rochoso depende não só das propriedades da rocha intacta, mas também da liberdade que os blocos de rocha têm de escorregar ou rodar sob diferentes condições de tensão (MIRANDA, 2003).

O GSI, desenvolvido originalmente para maciços rochosos homogeneamente fraturados, tem passado por seguidos ajustes: Hoek *et al.* (1995); Hoek e Brown, (1997); Hoek *et al.* (1998); Marinos e Hoek, (2000); Marinos e Hoek, (2001); Hoek e Marinos (2005); Hoek e Diederichs (2006). Contudo, os trabalhos de Hoek *et al.* (1998), Marinos e Hoek (2000 e 2001) possibilitaram sua aplicação a maciços rochosos fraturados e heterogêneos, resultando, portanto, um grande avanço (MAIA, 2007).

2.5.2. Conceituação do GSI

O índice GSI desenvolvido por Hoek (1994) permite, a partir da determinação de índices geomecânicos obtidos pelos sistemas RMR ou Q, a obtenção de parâmetros para o critério de resistência do maciço rochoso, aproximado como meio contínuo, de Hoek e Brown (1980b).

As versões Q' e RMR' não consideram as condições de carregamento externo do maciço rochoso, nem a orientação das descontinuidades (MILNE *et al.* 1998). RMR' é o valor original de RMR, na versão de Bieniawski (1976), considerando o maciço seco e a orientação das descontinuidades muito favorável e Q' é o valor de Q modificado, adotando o valor 1 (um) para a relação SRF/J_w , portanto, simplificado para a expressão:

$$Q' = RQD/J_n \cdot J_r/J_a \quad (2.27)$$

Dessa forma, o GSI assume as seguintes expressões:

$$\text{GSI} = \text{RMR}', \text{ se } \text{RMR} > 18 \quad (2.28)$$

$$\text{GSI} = 9 \cdot \log Q' + 44, \text{ se } \text{RMR} < 18 \quad (2.29)$$

Excetuando-se os maciços rochosos de muito má qualidade, o valor do GSI de determinado maciço pode ser estimado a partir do valor do RMR, na versão de Bieniawski (1989), utilizando um peso de 15 para a condição da presença da água e de 0 (zero) para a orientação das descontinuidades (MIRANDA, 2003).

Para maciços com $\text{RMR} \geq 23$, o valor do GSI poderá ser obtido a partir da expressão:

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{89} - 5 \quad (2.30)$$

Sendo RMR_{89} a versão da classificação de Bieniawski (1989).

Para maciços rochosos de muito má qualidade com valores de $\text{RMR} < 23$, a correlação é expressa pela expressão:

$$\text{GSI} = \ln Q' + 44 \quad (2.31)$$

onde Q' é o valor de Q modificado, adotando o valor 1 para a relação SRF/J_w , portanto, simplificado para a expressão:

$$Q' = \text{RQD}/J_n \cdot J_r/J_a \quad (2.32)$$

Os valores de GSI variam entre 10, para maciços rochosos extremamente pobres, e 100 para rocha intacta.

2.5.3. Limitações e ponderações do GSI

Marinos e Hoek (2000) mencionam o termo *flysch* (derivado da palavra alemã *fliessen*, que significa escorregamento), do ábaco para maciços heterogêneos, (Figura 2.8).

A estrutura *flysch*, comum nas rochas sedimentares, é caracterizada pela alternância rítmica de camadas finas com texturas diferenciadas, granulares (inclusive conglomerado), sílticas e argilosos (muito comum em rochas xistosas).

A partir do conhecimento e entendimento da estrutura *flysch* intrínseca aos valores do GSI estimados no ábaco da Figura 2.8, faz-se necessária a seleção dos parâmetros da rocha intacta, como a constante do material da rocha intacta (m_i) e a resistência de compressão uniaxial do material da rocha intacta (σ_{ci}). Em decorrência das camadas granulares a exemplo de arenitos estarem usualmente separadas por fracas camadas de siltitos ou argilitos, o contato entre as partículas de rocha se torna restrito. Portanto, é extremamente desaconselhável a determinação da resistência do maciço rochoso a partir das propriedades do arenito. Da mesma forma, o uso apenas das propriedades do silito ou argilito será por demais conservador, visto que o arenito certamente contribuirá com a resistência do maciço rochoso.

O GSI, como a grande maioria dos sistemas de classificação, tem suas limitações e ponderações. Marinós e Hoek (2000) apresentaram como sugestão de ponderação dos parâmetros da rocha intacta para camadas de arenitos, siltitos, e siltitos ou xistos, consideradas na definição da rocha intacta, conforme Tabela 2.32.

O GSI está baseado na hipótese de que o maciço rochoso deve ser suficientemente fraturado para possuir um comportamento isotrópico, ou seja, o comportamento do maciço independe da direção de aplicação do carregamento. Marinós *et al.* (2005) citam dois exemplos em que o GSI não deverá ser aplicado com propriedade:

- Não se aplica aos maciços rochosos com presente domínio estrutural (ruptura de blocos ou cunhas), a exemplo de um maciço formado por uma ardósia sem perturbações que detém um comportamento mecânico altamente anisotrópico, onde esse fator impossibilita a determinação de um valor para o GSI oriundo dos ábacos das Figuras 2.7 e 2.8.
- Um túnel (ou talude) escavado, em um maciço rochoso altamente resistente e com poucas descontinuidades com espaçamentos compatíveis com o tamanho da obra, apresentará uma estabilidade estrutural em decorrência do embricamento entre as famílias de descontinuidades e a face livre do talude ou parede do túnel.

Mesmo assim e com certa cautela, o critério de ruptura de Hoek-Brown e os ábacos do GSI podem ser aplicados, se a ruptura de tal maciço rochoso não se encontre sob o controle de sua anisotropia.

Tabela 2.32. Ponderação dos parâmetros da rocha intacta (m_i e σ_{ci}), quando aplicado o ábaco de maciço rochoso heterogêneo (tipo “*Flysch*” da Figura 2.8).

Tipo de “ <i>Flysch</i> ”	Ponderação dos parâmetros da rocha intacta: m_i e σ_{ci} .
A e B	Aplicar os valores totais das camadas de arenito.
C	Redução de 20% para arenitos e aplicação dos valores totais para siltitos.
D	Redução de 40% para arenitos e aplicação dos valores totais para siltitos.
E	Redução de 40% para arenitos e aplicação dos valores totais para siltitos.
F	Redução de 60% para arenitos e aplicação dos valores totais para siltitos.
G	Aplicar os valores totais dos siltitos ou xistos.
H	Aplicar os valores totais dos siltitos ou xistos.

2.5.4. Obtenção de dados geológico-geotécnicos e uso de ábacos no GSI

Deverá ser considerado o fato de que o índice GSI é obtido indiretamente a partir dos sistemas RMR ou Q, com base em determinados conceitos e restrições. Enquanto esses sistemas qualificam o maciço rochoso a partir de determinados parâmetros geotécnicos e ainda apresentam metodologias de aplicações de sistemas de contenção e suporte de obras subterrâneas, o GSI se limita à obtenção, estimativamente de propriedades do maciço rochoso, considerado como meio isotrópico equivalente.

A coerência de valores de parâmetros obtidos a partir do GSI está diretamente relacionada ao nível da fonte que incluem os profissionais envolvidos nos estudos, a fase do empreendimento e, em consequência, os recursos. Nas fases preliminares do projeto, as sondagens mecânicas e mapeamentos de afloramentos rochosos, inclusive paredes naturais, normalmente encontradas nos sítios de projetos hidrelétricos, são as fontes mais comuns de informação para a estimativa inicial do valor do GSI.

Na fase inicial do projeto executivo, com a implantação da obra, quando se dispõem de maior número de sondagem, as exposições de taludes escavados em rocha, inclusive escavação de túneis de circuitos hidráulicos, são provavelmente as mais relevantes fontes de informação de conhecimento do maciço rochoso para determinação do valor do GSI.

Maia (2007) menciona que se os processos de escavação mecanizada e desmontes a fogo porventura venham mascarar a real condição do maciço, torna-se, imprescindível, extrapolar os valores do GSI além da superfície danificada, na tentativa de estimar valores do GSI coerentes para maciço rochoso. Esse problema se torna menos relevante em maciços fracos ou com perturbações tectônicas, onde o processo de escavação é cercado por cuidados e, conseqüentemente, a quantidade de danos gerada é desprezível frente ao já existente.

A escolha de um valor de GSI representativo do maciço rochoso deverá, obrigatoriamente, ser obtida a partir da análise visual de campo e descritivos dos ábacos, podendo ocorrer casos em que o valor representativo do GSI se situará no intervalo entre diferentes formas figurativas e/ou descritivas dos ábacos. Assim a descrição geológica nos ábacos do GSI vem ao encontro da experiência do profissional e, sobretudo bom senso na extrapolação e interpretação dos dados obtidos de campo.

Obter o GSI por meio de ábacos, devido à ausência de parâmetros capazes de serem medidos para ajustar a estimativa do valor do GSI, causa certo desconforto no meio técnico. Todavia, a experiência do profissional na obtenção dos dados a partir da inspeção de campo e mapeamentos geológicos e ainda a possibilidade do GSI ser determinado com base nas classificações geomecânicas, utilizando os parâmetros referentes ao maciço rochoso, minimizam este problema. O GSI, por ser um índice mensurável, ganha importância como suporte de projetos civis.

Maia (2007) faz menção aos ábacos do GSI que não apresentam referências diretas à abertura das descontinuidades, que afetam a resistência e deformação do maciço rochoso. Dessa forma (Hoek *et al.* 2002) introduziram, no critério de ruptura generalizado, o fator de distúrbio (D), em que as propriedades do maciço rochoso são calculadas, considerando certo nível de abertura das descontinuidades, ou seja, um maciço intacto ($D=0$) possuirá suas descontinuidades seladas, diferentemente de um maciço extremamente perturbado ($D=1$) em que as descontinuidades estão abertas, e os blocos se encontram desagregados.

Ábacos do GSI podem ser usados na estimativa das características dos maciços rochosos com descontinuidades preenchidas, a partir das descrições das condições da superfície das descontinuidades apresentadas nas colunas pobre e muito pobre. Tendo-se preenchimentos sistemáticos e finos (milimétricos a poucos centímetros) ou com zonas cisalhadas com material argiloso, é recomendado o uso do ábaco do GSI para maciços rochosos heterogêneos, Figura 2.8.

2.5.5. Uso do GSI em maciços rochosos intemperizados e de baixa resistência e a influência da água

Maciços de rochas calcárias argilosas, argilitos, siltitos e arenitos fracos, xistos com poucas descontinuidades, mesmo com a presença de planos de acamamento, em geral não apresentam superfícies de descontinuidades bem definidas. Nesses casos, o ábaco do GSI

(Figura 2.7) é aplicável aos maciços rochosos com estruturas definidas como fraturada ou intacta.

No caso em que o intemperismo atinge a rocha intacta, a constante (m_i) e a resistência de compressão uniaxial do material da rocha intacta (σ_{ci}) do critério de ruptura de Hoek-Brown, obrigatoriamente, devem ser depreciadas. Climas quentes e úmidos favorecem as reações químicas e, conseqüentemente, os processos de intemperismo, dando origem a solos residuais espessos, a exemplo da região Amazônica, em que o intemperismo é intenso e atinge grandes profundidades; as estruturas da rocha são perdidas, de forma que o maciço rochoso passa ter comportamento de solo, não se aplicando nessas situações o GSI.

Maia (2007) menciona o efeito do intemperismo e a presença de água nas fraturas da rocha, com ou sem preenchimentos, que ocasiona maior plastificação e lisura das superfícies dos planos das discontinuidades, reduzindo a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso. O GSI assumirá novo valor a ser obtido na coluna à direita do ábaco da Figura 2.8 (Pobre a muito pobre). Finalmente, a poropressão não é influenciada pela determinação do GSI, porém, casos onde a poropressão exista, deverão ser tratados por meio de análises de tensões efetivas.

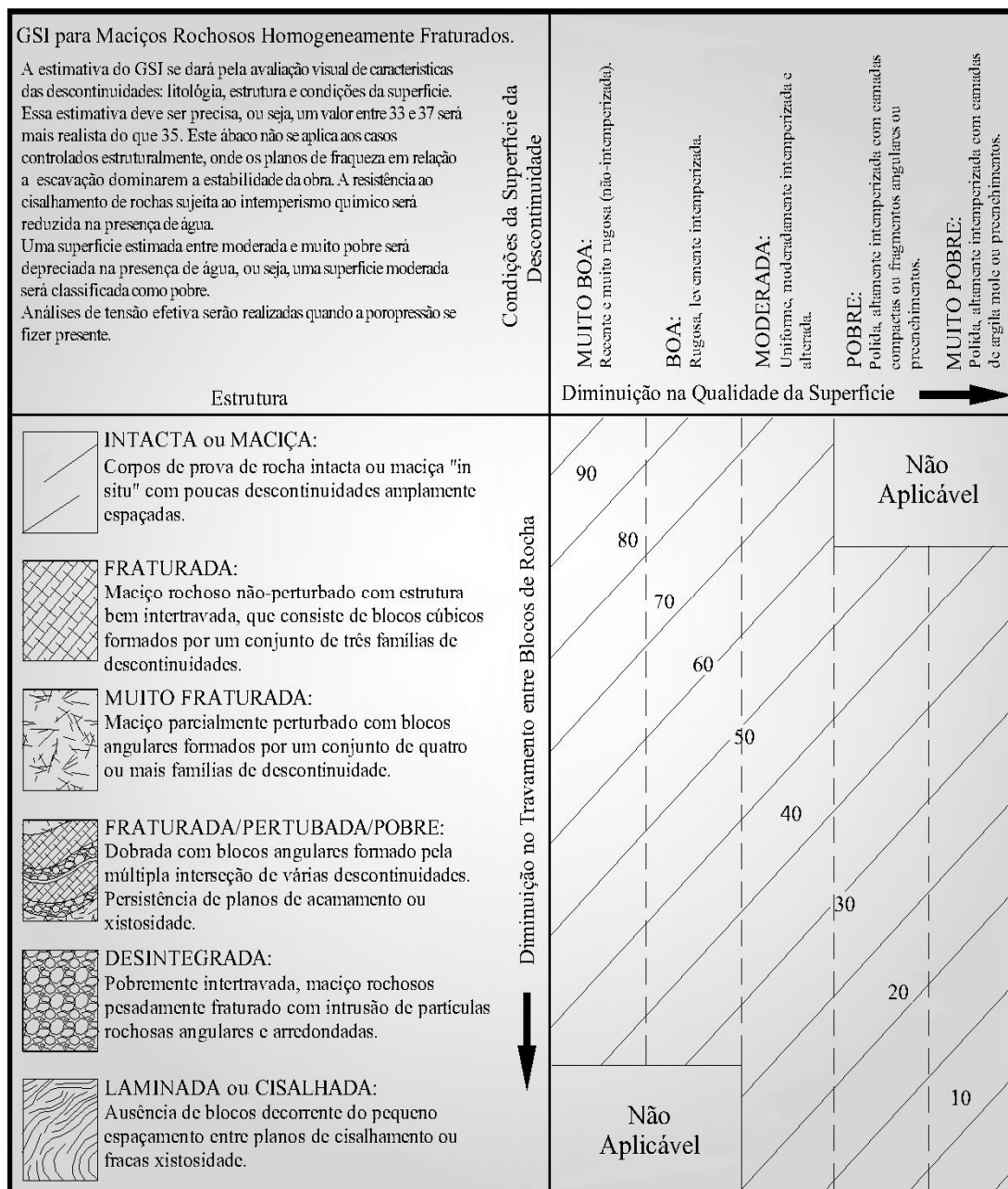


Figura 2.7. GSI - Ábaco para maciços rochosos fraturados e homogêneos, (transcrito de Marinis e Hoek, 2000)

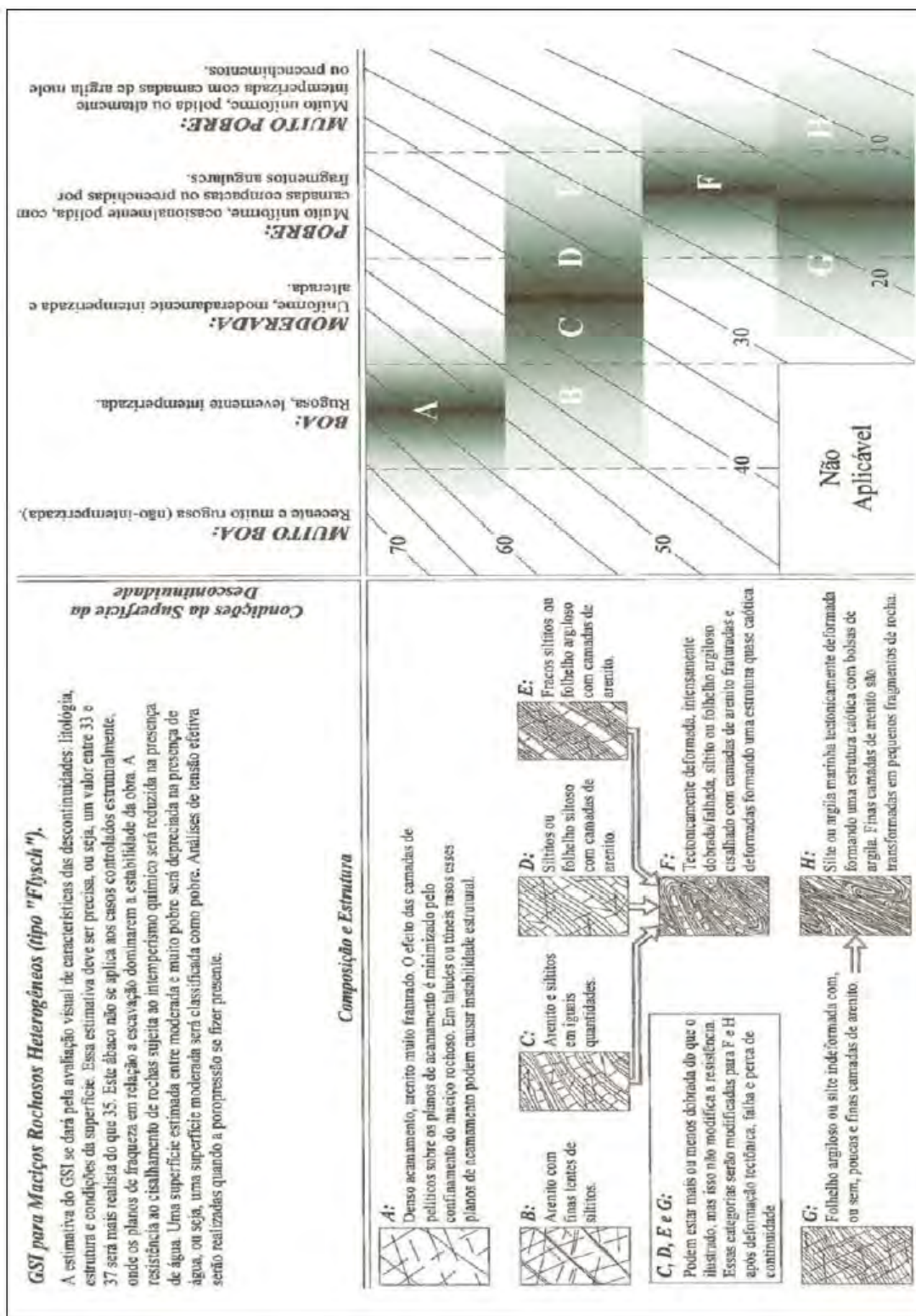


Figura 2.8. GSI- Ábaco para maciços rochosos heterogêneos, (transcrito de Marinos e Hoek, 2000)

Capítulo 3

Determinação de Parâmetros Geomecânicos de Maciços Rochosos - Revisão Bibliográfica

3.1. Aspectos do maciço rochoso e da rocha intacta

Conforme Assis (2003a), o comportamento de um maciço rochoso será função da rocha intacta e das descontinuidades. No caso da permeabilidade de um maciço rochoso, essa será função da permeabilidade primária (da rocha intacta) e da permeabilidade secundária (das descontinuidades). No entanto, dependendo do tamanho da obra (escala) em relação ao tamanho dos blocos de rocha intacta ou do grau de fraturamento do maciço (número de famílias de descontinuidades e seus respectivos espaçamentos), determinada propriedade, da rocha intacta, das descontinuidades ou do maciço rochoso como um todo, pode ser preponderante, dominante sobre as demais; ou seja, poderá controlar o comportamento da obra e conseqüentemente o projeto.

A Figura 3.1 ilustra as propriedades dominantes de um maciço rochoso com várias famílias de descontinuidades:

- Um poço de pequeno diâmetro poderá ser somente afetado pela rocha intacta;
- Um túnel de pequeno diâmetro poderá ser afetado por uma ou duas descontinuidades;

- Uma caverna de grandes dimensões terá seu comportamento afetado por um grande número de descontinuidades; ou seja, caracteriza-se um maciço rochoso formado por blocos de rocha intacta, imbricados, e delimitados pelas descontinuidades, mostrando o efeito escala entre tamanho da obra e grau de fraturamento do maciço rochoso, constituindo-se uma propriedade relevante da rocha para fins de comportamento de determinada obra.



Figura 3.1. Efeito escala entre tamanho da obra e grau de fraturamento do maciço rochoso (ASSIS, 2003a, modificado de Hoek, 1983).

Em fundações de barramentos hidrelétricos a céu aberto, as propriedades mais relevantes na caracterização do maciço rochoso nos estudos de projeto e para fins de controle do comportamento da obra são a deformabilidade, a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade. Em obras superficiais, a ruptura e a deformação são controladas pelas propriedades das descontinuidades, enquanto que em obras profundas são tensões atuantes e a resistência da rocha intacta que as controlam (HUDSON E HARRISON, 2000).

Bandis *et al.* (1983) e Barton *et al.* (1985), com base em resultados de ensaios laboratoriais, concluíram que, dependendo dos níveis de esforços que ocorrem em escavações superficiais, a deformação das descontinuidades domina a deformação elástica da rocha intacta, e que sob altos níveis de esforços associados com estruturas pesadas, o deslizamento e fechamento de descontinuidades constituem a maior parte dos deslocamentos na rocha. A rigidez normal e a cisalhante apresentam tendência não linear, entretanto, quando o esforço normal atinge níveis extremamente altos ou baixos apresentam tendência linear.

Face ao exposto, considerando os níveis de esforço normal de interesse em engenharia civil, a relação esforço-deformação pode ser aproximada pelo modelo conceitual de uma rigidez constante (HIDALGO, 2002).

Conforme Naylor *et al.* (1981), apud (HIDALGO, 2002), o comportamento mecânico da rocha intacta está mais ou menos bem entendido e em geral são aceitas as simplificações feitas quando essa é considerada como um meio contínuo de comportamento elástico linear, sendo os parâmetros obtidos a partir de ensaios laboratoriais.

Da mesma forma, quando o maciço é altamente fraturado, é possível considerá-lo como um meio contínuo equivalente, sem incorrer em grandes erros (HOEK, 1998; BARLA e BARLA, 2000).

3.2. Investigação para determinação de parâmetros geomecânicos do maciço rochoso

As investigações, na fase inicial dos estudos de viabilidade de um empreendimento hidrelétrico, possibilitam definir que tipo de propriedade do maciço rochoso é a predominante para o comportamento da obra, devendo-se a partir deste momento implementar um programa de ensaios adequados à obtenção dos parâmetros geomecânicos, em função dos modelos constitutivos e critérios de resistência mais adequados a cada tipo de maciço.

Conforme Assis (2007), um programa geral de ensaios para determinação de parâmetros de maciço rochoso deve seguir os seguintes princípios básicos:

- Descrever a resposta da rocha intacta sob uma faixa de solicitações que represente aquelas impostas pela construção e operação da obra (carregamentos e temperatura);
- Prever a influência de um ou mais conjuntos de descontinuidades no comportamento (anisotropia), caso essas sejam relevantes;
- Medir, ou estimar ou modelar, as propriedades do maciço rochoso fraturado, quando não for possível a realização de ensaios devido ao efeito-escala (escala dos blocos do maciço rochoso maior do que a capacidade de ensaios diretos).

3.2.1. Determinação de parâmetros geomecânicos da rocha intacta

O comportamento geomecânico da rocha intacta é normalmente assumido como materiais ideais, ou seja, contínuos, homogêneos, isotrópicos, lineares e elásticos. No entanto, mesmo as rochas intactas podem não ser ideais por diversos motivos. Por conterem poros e fissuras, uma vez que, dependendo da quantidade, o comportamento dessas microestruturas pode ser tão ou mais importante, em relação às propriedades da rocha, do que sua própria constituição mineralógica. Conjuntamente, poros e fissuras são responsáveis por criar uma resposta não-linear da curva tensão x deformação; por reduzir parâmetros de resistência,

principalmente a tração; por gerar uma dependência do nível de tensão nas propriedades da rocha; e por produzir variabilidade e dispersão nos resultados dos ensaios (ASSIS, 2007).

As estruturas e descontinuidades em geral induzem propriedades anisotrópicas na rocha. No entanto, essas influências no comportamento geomecânico de rochas intactas são minimizadas a partir de ensaios com medição direta de seus parâmetros. A resposta do ensaio é medida, tratada e transformada em parâmetros geomecânicos, em função dos modelos constitutivos e critérios de resistência adotados, reproduzindo as solicitações da obra.

Caso as propriedades de rocha intacta sejam as predominantes para o comportamento da obra, o modelo geomecânico do maciço é assumido como contínuo e isotrópico ou anisotrópico, sendo os ensaios mais comumente indicados para a determinação dos parâmetros geomecânicos de rochas intactas, segundo Assis (2007), os constantes da Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Ensaios utilizados para caracterização de rocha intacta.

Tipo de Ensaio - Referência	Parâmetros Obtidos
Ensaio Brasileiro (NBR-7222-94)	Resistência à tração
Esclerômetro (martelo de Schmidt) – (ISRM,1981)	Resistência à compressão uniaxial (medida indireta)
Ensaio de Carga Puntiforme – (ISRM,1985)	Resistência à compressão uniaxial (medida indireta)
Ensaio Compressão Simples – (ISRM,1981)	Resistência à compressão uniaxial Parâmetros de deformabilidade (módulos e coeficiente Poisson)
Ensaio Triaxial – International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981)	Parâmetros de resistência (diversos critérios de resistência) Parâmetros de deformabilidade (diversos modelos constitutivos)

3.2.1.1. Efeito escala dos corpos de prova

Alguns ensaios como os de carga puntiforme e compressão uniaxial são executados em corpos de prova obtidos de sondagens rotativas com diâmetros diferentes dos recomendados em normas.

A *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) recomenda que o diâmetro do corpo de prova seja no mínimo 10 vezes o tamanho do maior grão. Para solucionar esta inconformidade, são utilizadas relações empíricas para correções. Para os ensaios de compressão uniaxial, vem sendo utilizada a expressão proposta por Hoek e Brown (1980a):

$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50} \cdot (50/d)^{0,18} \quad (3.1)$$

Onde:

- σ_{cd} - resistência à compressão uniaxial do corpo de prova com diâmetro d ;
 σ_{c50} - resistência a compressão uniaxial do corpo de prova com diâmetro padrão (50 mm);
 d - diâmetro do corpo de prova.

3.2.1.2. Ensaio de carga puntiforme

Reichmuth (1963), Bieniawski (1975) e *International Society for Rock Mechanics* (ISRM 1973, 1985), apud Hidalgo (2002), postularam que o ensaio de carga puntiforme foi inicialmente utilizado como uma forma indireta na determinação da resistência à tração, de acordo com a expressão:

$$\sigma_1 = 0,96 \cdot P/D^2 \quad (3.2)$$

Onde:

σ_1 - resistência à tração da rocha (kPa);

P - carga puntiforme de ruptura (kN);

D - diâmetro do corpo de prova (m).

Essa forma indireta não é mais praticada para determinação da resistência à tração, entretanto, vem sendo atualmente muito utilizado em mecânica das rochas, como também na determinação da resistência de concreto.

Bieniawski (1975) recomenda que os ensaios sejam realizados em corpos de prova obtidos de testemunhos de sondagem com diâmetro NX (54mm) e carregados diametralmente (similar ao ensaio brasileiro) sendo determinado pela expressão:

$$I_s = P/D^2 \quad (3.3)$$

Onde:

I_s - índice de resistência puntiforme (kPa);

P - carga na ruptura da amostra (kN);

D - diâmetro da amostra, medido na direção do carregamento (m).

3.2.1.3. Ensaio de resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial (σ_c) é definida como a máxima tensão que suporta um corpo de prova cilíndrico, cuja relação entre a altura e o diâmetro varia de 2,5 a 3,

quando submetido a um carregamento de compressão axial até a ruptura, utilizado para rochas e concretos (ISRM, 1981).

Conforme se pode observar na Figura 3.2, a partir do ensaio de compressão uniaxial em laboratório, são determinados: a resistência à compressão simples, o coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade (E) e deformação específica ($\mu\text{m}/\text{m}$).

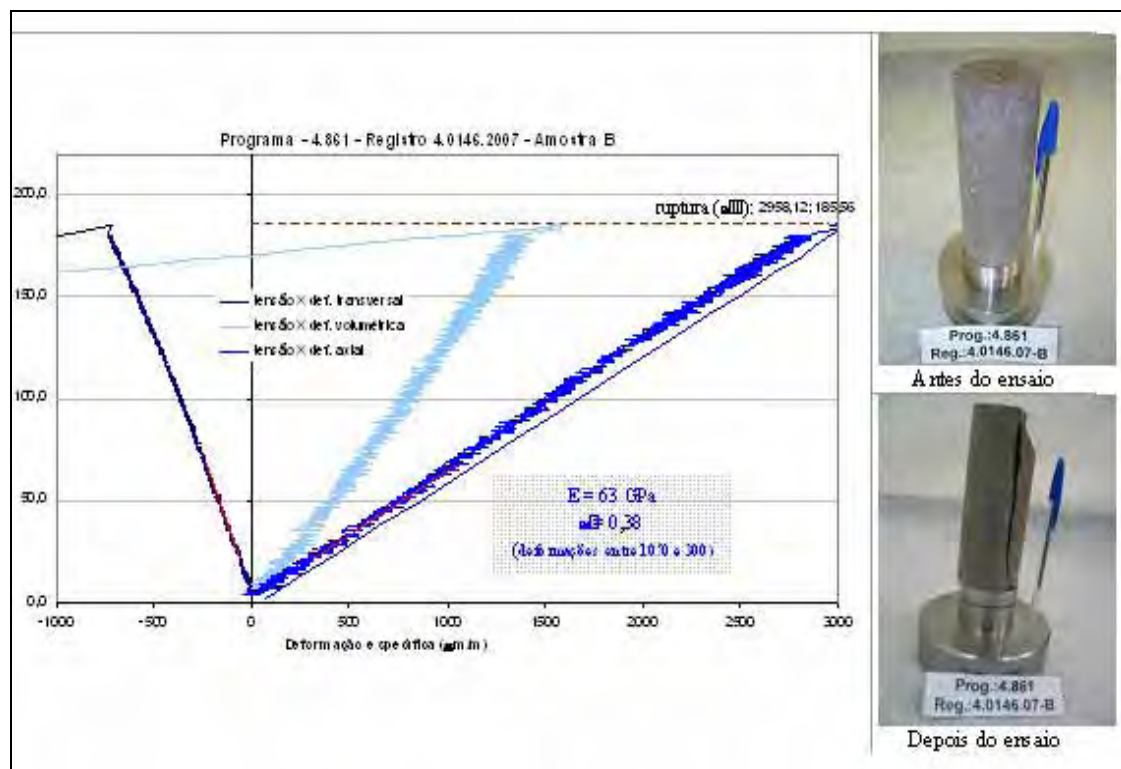


Figura 3.2. Ensaio de compressão simples em corpo de prova de sondagem em riolito do AHE Jirau (FURNAS *et al.* 2004).

3.2.1.4. Ensaio de resistência à compressão triaxial

O ensaio triaxial consiste na compressão axial do cilindro de rocha com a aplicação simultânea de pressão confinante, realizada por meio de aplicação de óleo sob pressão em câmara especial (ISRM, 1981).

O ensaio triaxial possibilita determinar a resistência (tensão desviadora) e a deformação específica, sob condições variadas de carregamento, variando a tensão confinante, simulando as condições que ocorrem no campo (Figura 3.3).

Ao medir, em laboratório, a deformabilidade da rocha intacta, são empregados os mesmos métodos utilizados na determinação da resistência, só que as amostras devem ser instrumentadas de modo que possam ser medidas as deformações.

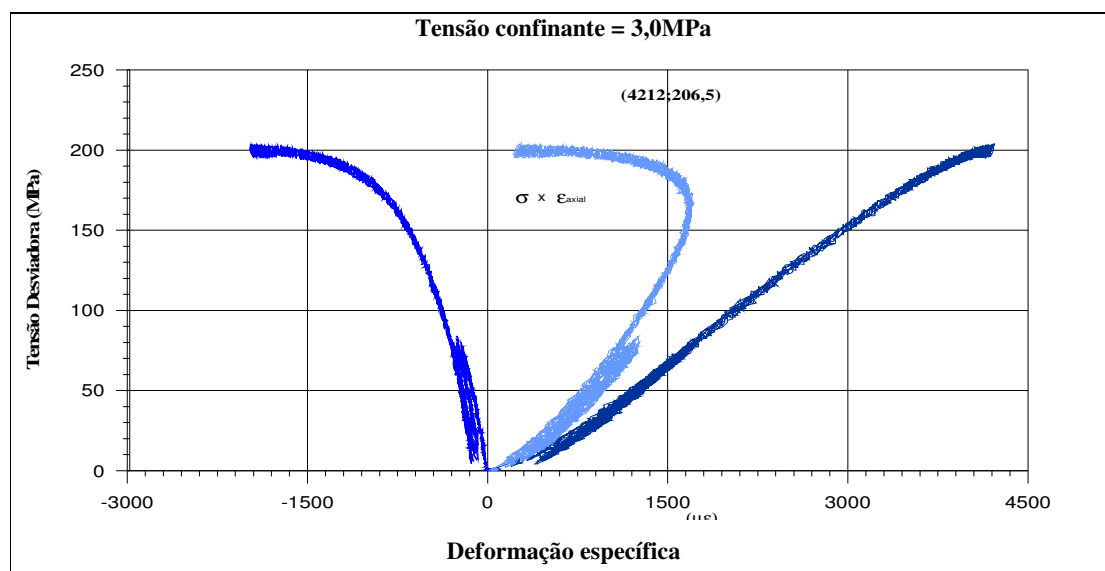


Figura 3.3. Apresentação de resultado de ensaio de compressão triaxial de amostra de sondagem (Furnas *et al.* 2005a).

Conforme Assis (2003a) ao medir a deformabilidade da rocha intacta no laboratório, são empregados os mesmos métodos utilizados na determinação da resistência, entretanto, as amostras devem ser instrumentadas para medição das deformações, sendo os ensaios uniaxial e triaxial os normalmente utilizados. Ocorre certa dificuldade em avaliar o valor do parâmetro E (módulo de elasticidade), visto que no primeiro carregamento aparecem, além das deformações elásticas, deformações plásticas (Figura 3.4). A curva de descarregamento ou recarregamento, após um ciclo completo carregamento-descarregamento, é a melhor forma de se obter o módulo de elasticidade (E).

Quando o valor de (E) for calculado diretamente como a tangente à curva do primeiro carregamento, este valor deve ser referido como módulo de deformação em vez de módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade (E) e o módulo de deformação (D) são determinados por meio das expressões a seguir:

$$E = \frac{\sigma_N}{\varepsilon_e} \quad (3.4)$$

$$D = \frac{\sigma_N}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} \quad (3.5)$$

Sendo:

σ_n - tensão normal;

ε_p - deformação plástica;

ε_e - deformação elástica.

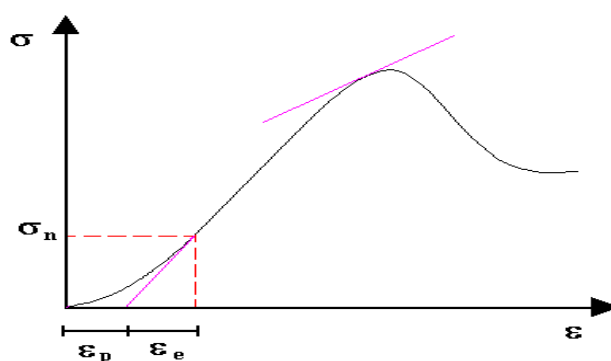


Figura 3.4. Gráfico tensão(σ) versus deformação (ε) com a representação das retas que determinam os módulos secantes e tangente

Quando o valor do módulo de elasticidade (E) for calculado diretamente como a tangente à curva do primeiro carregamento, esse valor deve ser referido como módulo de deformação em vez de módulo de elasticidade. O módulo de deformação tangente é dado pela inclinação de uma reta tangente a um ponto do gráfico, que representa uma certa tensão ou deformação de interesse:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{50\%}} \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

3.2.1.5. Correlação entre ensaios de resistência

Hidalgo (2002) mencionou que vários autores têm verificado a existência de relação direta entre a resistência à compressão uniaxial (σ_c) e o índice de resistência puntiforme (I_s), a exemplo de Bieniawski (1975), que propôs, para fins práticos, a seguinte relação:

$$\sigma_c \approx 25 \cdot I_s \quad (3.7)$$

Grimstad e Bhasin (1996), apud Miranda (2003), apresentaram uma proposta de correlação entre o valor de Q e a resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso (σ_c):

$$\sigma_c = 7 \cdot \gamma \cdot f_c \cdot Q^{1/3} \quad (3.8)$$

Onde:

Q - índice de Barton (1974);

f_c - factor correctivo = $\sigma_c/100$ para $Q > 10$;

$\sigma_c > 100$ MPa ou $f_c = 1$;

γ em gramas/cm³ e σ_c em MPa.

A *International Society For Rock Mechanics* (ISRM 1981) recomenda classificar a rocha intacta em função da resistência à compressão uniaxial proposta por Deere (1968), de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Classificação de rochas em função da resistência à compressão uniaxial

Descrição	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
Rocha extremamente fraca	0,25 – 1,0
Rocha fraca	1,0 – 25
Rocha medianamente forte	25 – 50
Rocha forte	50 – 100
Rocha muito forte	100 – 250
Rocha extremamente forte	> 250

3.2.1.6. Estimativa da resistência de material rochoso por métodos expeditos

Ensaio expedito (Tabela 3.3) são empregados, a exemplo da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra do Facão, localizada no rio São Marcos, GO, para estimar a resistência à compressão simples (σ_c) de materiais rochosos, para uso no dimensionamento de contenções de taludes escavados, conforme recomendado pela ISRM (1981).

Tabela 3.3. Estimativa da resistência de material rochoso

Descrição		Identificação de campo	Valor Aprox. de σ_c (MPa)
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada com a unha	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalhada com golpes firmes com a ponta do martelo de geólogo e pode ser raspada com canivete.	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada com dificuldade com canivete e marcas podem ser feitas com a ponta do martelo de geólogo.	5,0 – 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser raspada ou riscada com canivete, mas as amostras podem ser fraturadas com golpes de martelo de geólogo.	25 – 50
R4	Rocha resistente	As amostras necessitam de mais que um golpe com martelo de geólogo para ser fraturada.	50 – 100
R5	Rocha muito resistente	As amostras necessitam de muitos golpes com martelo de geólogo para ser fraturada.	100 – 250
R6	Rocha extremamente resistente	As amostras podem somente ser lascadas com martelo de geólogo	> 250

3.3. Parâmetros geomecânicos de descontinuidades do maciço rochoso

As descontinuidades em rocha, em geral, induzem propriedades anisotrópicas na mesma, ou seja, diferentes valores da mesma propriedade em direções diferentes. Para avaliação das resistências, são analisadas as estruturas presentes e atitudes preferenciais, em micro e macroescalas, tais como: o acamamento, o alinhamento de cristais (bandeamento), as microfissuras, essas muitas vezes imperceptíveis a olho nu. Também devem ser analisadas as macroestruturas, incluindo fraturas e falhas, abertas ou fechadas, com ou sem preenchimentos, bem como as características das superfícies dos planos e dos preenchimentos.

Um maciço de fundação que contenha uma descontinuidade numa certa orientação, o comportamento da fundação em sua maior parte será dominado pelas propriedades da rocha intacta, entretanto na região vizinha à descontinuidade, o comportamento da mesma será controlado por suas propriedades, tanto de resistência como de módulos. Sendo assim, devem-se medir as propriedades da rocha intacta e também as da descontinuidade (ASSIS, 2007).

Os ensaios para determinação das propriedades das descontinuidades são bem mais limitados, quando comparados com os utilizados para a rocha intacta, devido ao efeito escala. Pode-se empregar o ensaio triaxial, mas o mais utilizado é o ensaio de cisalhamento direto realizado em laboratório.

Os ensaios em laboratório são realizados em corpos de prova com dimensões de até 60 cm, enquanto que os de campo em blocos de 1 a 2 m. Esses ensaios, corriqueiramente, fornecem somente os parâmetros de resistência, mas quando instrumentados adequadamente, podem também fornecer parâmetros de deformabilidade (rigidez normal e rigidez cisalhante) da descontinuidade. As Figuras 3.5 a 3.7 ilustram amostragens na UHE Serra do Facão.



Os aspectos metodológicos e ensaios empregados na estimativa dos parâmetros geomecânicos de descontinuidades do maciço rochoso são apresentados a seguir.

3.3.1. Ensaio de resistência ao cisalhamento em descontinuidade de rocha

O ensaio de cisalhamento direto executado em amostras de rocha com fraturas abertas para determinação do ângulo de atrito básico tem como referência o método da *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) - *Suggested Methods for Determining Shear Strength*, com uso de uma prensa de carga controlada, com capacidade de aplicação de 100 kN de cargas axial e normal, conforme mostrado na Figura 3.8.

Os corpos-de-prova são preparados de forma que a fratura se localize na horizontal, paralela ao plano de cisalhamento. O carregamento normal é aplicado através de peso-morto e o cisalhante através de um conjunto macaco-manômetro, registrado em uma célula de carga, e os deslocamentos verticais e horizontais são medidos em seis controles (quatro verticais e dois horizontais).

Os resultados do ensaio são normalmente apresentados em termos de envoltória da tensão cisalhante versus tensão normal, conforme mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.8. Conjunto de equipamentos utilizados no ensaio de cisalhamento direto - Laboratório de Furnas em Aparecida de Goiânia-GO.

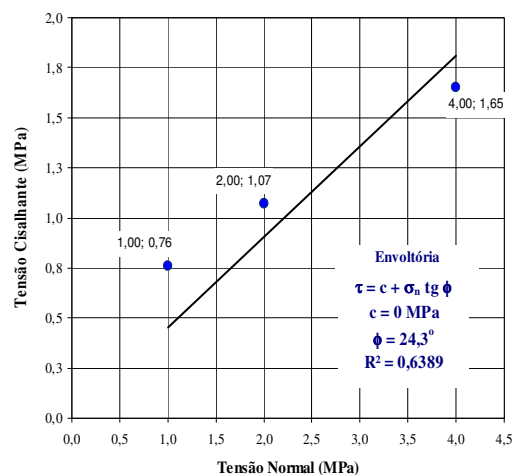


Figura 3.9. Apresentação dos resultados de ensaio de cisalhamento.

3.3.2. Ensaio de resistência em descontinuidade de rocha por meios indiretos

Quando esses ensaios *in situ* e laboratório não são passíveis de execução, pode-se optar por uma caracterização da resistência da descontinuidade por meios indiretos, seguindo modelos de resistência, tais como o tradicional Mohr-Coulomb ou de Barton e Choubey (1978), sintetizados na Tabela 3.4 e **apresentados no item 3.4.**

A resistência de uma descontinuidade depende dos seguintes fatores, dentre outros:

- Resistência da rocha da parede que conforma a descontinuidade;
- Rugosidade da parede da descontinuidade (ondulação e aspereza);
- Abertura (distância entre paredes) da descontinuidade;
- Preenchimento (material terroso, pétreo ou misto) de origem diversa.

A resistência do preenchimento e a relação entre sua espessura e a amplitude da ondulação da parede da descontinuidade devem ser consideradas. De forma geral, quando a espessura de preenchimento exceder à amplitude da ondulação da descontinuidade, a resistência do preenchimento domina o seu comportamento.

Em síntese, dependendo das características de rugosidade, abertura da descontinuidade e da presença de preenchimento (Figura 3.10), o critério predominante de resistência será determinado conforme mostrado na Tabela 3.4.

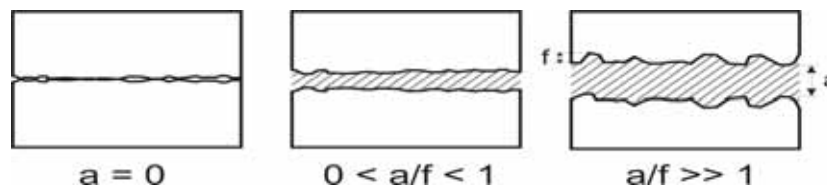


Figura 3.10. Efeito da abertura (a), da amplitude (f), da rugosidade e do preenchimento no comportamento de descontinuidades (ASSIS, 2007).

Tabela 3.4. Critérios de resistência normalmente utilizados para descontinuidades, em função da abertura e do preenchimento.

Descontinuidade	Modelo de Resistência	Observações
Selada, abertura = 0	$\tau = \sigma \cdot \text{tg}[\phi_b + \text{JRC} \cdot \log(\text{JCS}/\sigma)]$	Se o $\text{JRC} = 0$, a equação de Barton e Choubey converge para a de Mohr-Coulomb.
Parcialmente preenchida	$\tau = \sigma \text{tg}\phi$	Neste caso $\text{tg}\phi$ ($\text{tg}\phi = J_r / J_a$) é assumida igual à razão entre os parâmetros J_r e J_a da classificação de Barton <i>et al.</i> (1974).
Preenchimento dominante	$\tau = c_p + \sigma \text{tg}\phi_p$	Os parâmetros de resistência dominantes são os do preenchimento

No caso de preenchimento dominante ou de descontinuidades de pequena escala, o ensaio indicado é o de cisalhamento direto.

São utilizados os seguintes ensaios e procedimentos para caracterização indireta da resistência da descontinuidade pelo modelo de Barton e Choubey (1978):

- Ensaio em mesa inclinada (*tilt test*) para determinação do ângulo de atrito básico (ϕ_b);
- Esclerômetro para determinação da resistência uniaxial da parede da descontinuidade (JCS);
- Mapeamento da ondulação da parede da descontinuidade para obtenção do índice de rugosidade JRC, uso de perfilômetro, fotografia digital, scanner a laser e posterior comparação com os padrões de Barton e Choubey (1978) ou realização de ensaio de cisalhamento direto, depois de já conhecidos os parâmetros mencionados.

3.3.3. Determinação dos ângulos de atrito básico (ϕ_b) e residual (ϕ_r), do coeficiente de rugosidade (JRC) e da resistência uniaxial da parede da descontinuidade (JCS).

O ângulo de atrito básico é função da textura da rocha, de forma que Barton *et al.* (1985) desenvolveram um ensaio para determinação da resistência ao atrito, fazendo deslizar corpos de prova em um plano inclinado (*tilt test*), conforme mostrado nas Figuras 3.11 e 3.12.



Figura 3.11. Ensaio de resistência ao deslizamento em plano inclinado (*tilt test*), para obtenção do ângulo de atrito básico. Equipamento do Laboratório de FURNAS em Aparecida de Goiânia-GO.

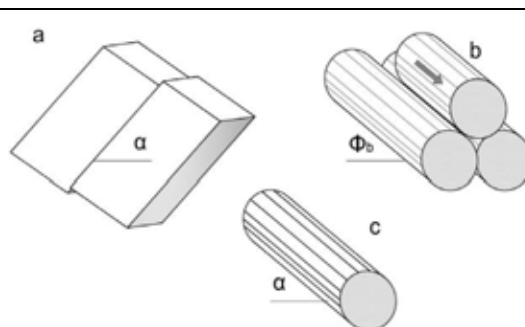


Figura 3.12. Montagem de corpos de prova do ensaio em rampa inclinada (Hidalgo, 2002):

- (a) Deslizamento de blocos sobre uma descontinuidade.
 (b) Testemunhos de sondagem rotativa sem polimentos.
 (c) Corpo de prova com descontinuidade longitudinal.

O ângulo de atrito básico poderá também ser estimado por tipo litológico (Tabela 3.5), conforme proposto por Barton e Choubey (1978).

Tabela 3.5. Estimativa do ângulo de atrito básico (ϕ_b) por tipo de rocha.

Table 1: Basic Friction Angles of Various Unweathered Rocks Obtained From Flat and Residual Surfaces			
Rock type	Moisture condition	Basic friction angle ϕ_b	Reference
A. Sedimentary Rocks			
Sandstone	Dry (seco)	26-35	Patton, 1966
Sandstone	Wet (úmido)	25-33	Patton, 1966
Sandstone	Wet	29	Ripley & Lee, 1962
Sandstone	Dry	31-33	Krsmanović, 1967
Sandstone	Dry	32-34	Coulson, 1972
Sandstone	Wet	31-34	Coulson, 1972
Sandstone	Wet	33	Richards, 1975
Shale	Wet	27	Ripley & Lee, 1962
Siltstone	Wet	31	Ripley & Lee, 1962
Siltstone	Dry	31-33	Coulson, 1972
Siltstone	Wet	27-31	Coulson, 1972
Conglomerate	Dry	35	Krsmanović, 1967
Chalk	Wet	30	Hutchinson, 1972
Limestone	Dry	31-37	Coulson, 1972
Limestone	Wet	27-35	Coulson, 1972
B. Igneous Rocks			
Basalt	Dry	35-38	Coulson, 1972
Basalt	Wet	31-36	Coulson, 1972
Fine – grained granite	Dry	31-35	Coulson, 1972
Fine – grained granite	Wet	29-31	Coulson, 1972
Coarse - grained granite	Dry	31-35	Coulson, 1972
Coarse - grained granite	Wet	31-33	Coulson, 1972
Porphyry	Dry	31	Barton, 1971 b
Porphyry	Wet	31	Barton, 1971 b
Dolerite	Dry	36	Richards, 1975
Dolerite	Wet	32	Richards, 1975

Tabela 3.5. Estimativa do ângulo de atrito básico (ϕ_b) por tipo de rocha (cont.).

<i>C. Metamorphic Rocks</i>			
<i>Amphibolite</i>	<i>Dry</i>	32	<i>Wallace et al. 1970</i>
<i>Gneiss</i>	<i>Dry</i>	26-29	<i>Coulson, 1972</i>
<i>Gneiss</i>	<i>Wet</i>	23-26	<i>Coulson, 1972</i>
<i>Slate</i>	<i>Dry</i>	25-30	<i>Barton, 1971 b</i>
<i>Slate</i>	<i>Dry</i>	30	<i>Richards, 1975</i>
<i>Slate</i>	<i>Wet</i>	21	<i>Richards, 1975</i>

O ângulo de atrito residual (ϕ_r) poderá ser obtido a partir da fórmula proposta por Barton e Choubey (1978):

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20r/R \quad (3.9)$$

sendo R o número de percussões do martelo de Schmidt na rocha intacta em condição natural, e r o número de percussões na rocha alterada (o valor de r é tão menor que R, quanto maior for o grau de intemperismo na parede da descontinuidade).

Conforme *International Society For Rock Mechanics* (ISRM 1981), o coeficiente de rugosidade JRC pode ser obtido por comparação do perfil de descontinuidade com perfis típicos (Figura 3.13), apresentado por Barton e Choubey (1978), ou por meio do ensaio em rampa inclinada (tilt test) desenvolvido por Barton *et al.* (1985), a partir da expressão:

$$JRC = (\alpha - \phi_b) / \text{Log}(JCS/\sigma'_{no}) \quad (3.10)$$

Onde:

α - ângulo de inclinação da rampa quando ocorre deslizamento;

σ'_{no} - tensão normal efetiva quando ocorre deslizamento;

JCS - resistência à compressão uniaxial da rocha na parede da descontinuidade;

ϕ_b - Ângulo de atrito básico igual ao ângulo de inclinação da rampa quando ocorre deslizamento ao longo da descontinuidade ensaiada.

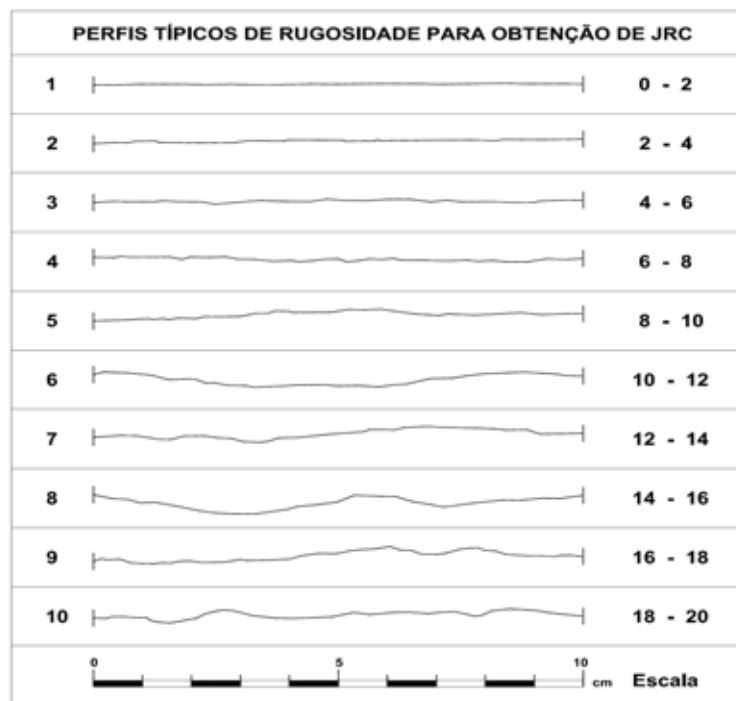


Figura 3.13. Perfis de rugosidade padrão e os respectivos intervalos de valores para estimativa visual de JRC_{10} , na escala de 10cm (BARTON e CHOUBEY, 1978, modificado - ISRM, 1981)

Outra forma de obtenção do JRC é por meio do ábaco (HOEK, 2007), mostrada na Figura 3.14, onde o perfil e a amplitude da rugosidade da descontinuidade são obtidos no campo.

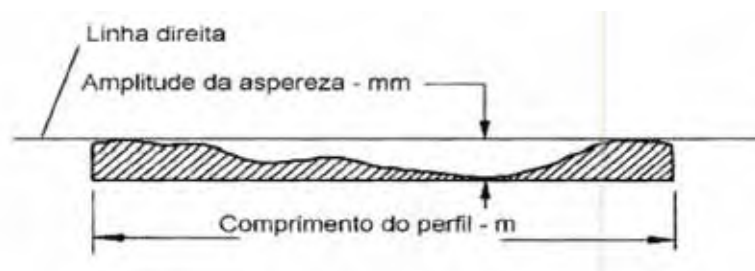


Figura 3.14. (a) Método de medir a amplitude da rugosidade e comprimento do perfil da descontinuidade para determinação da faixa de valores de JRC.

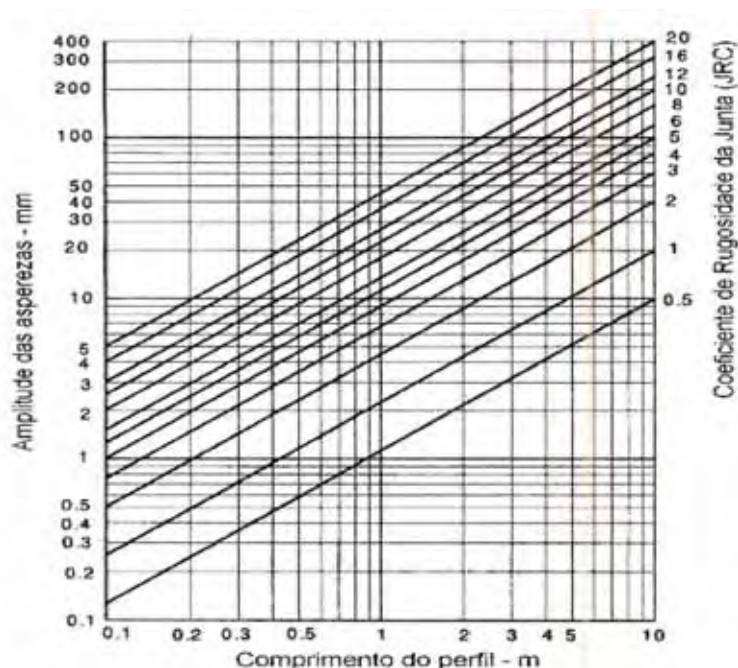


Figura 3.14. (b) Ábaco para determinação da faixa de valores de JRC a partir da amplitude da rugosidade e comprimento do perfil da descontinuidade conforme (b) (BARTON, 1982 in HOEK, 2007- modificado).

A resistência à compressão uniaxial das paredes de uma descontinuidade é menor que da rocha intacta, em decorrência da alteração das superfícies. A resistência das paredes é função das condições do contato e preenchimentos. Com o esclerômetro, provido de gráfico para corrigir a orientação do esclerômetro e tabela de conversão do resultado medido, obtém-se a resistência uniaxial estimada. A Figura 3.15 ilustra o uso do esclerômetro.

Deve-se também ser obtida a massa específica seca, a partir de pequenas amostras de rocha. O ábaco a ser utilizado como referência encontra-se na Figura 3.16.

O valor da resistência da parede da descontinuidade (JCS) é estimativamente determinado a partir da expressão proposta por Barton e Choubey (1978):

$$\log(JCS) = 0,00088 \cdot \gamma_d \cdot r + 1,01 \quad (3.11)$$

onde:

γ_d - peso específico seco (kN/m^3);

r - valor obtido no esclerômetro de *Schmidt*, média de seis determinações (de um total de dez), sendo as quatro de maior valor descartadas.



Figura 3.15. Detalhe da leitura com o Esclerômetro de *Schmidt* em descontinuidade sub-vertical.

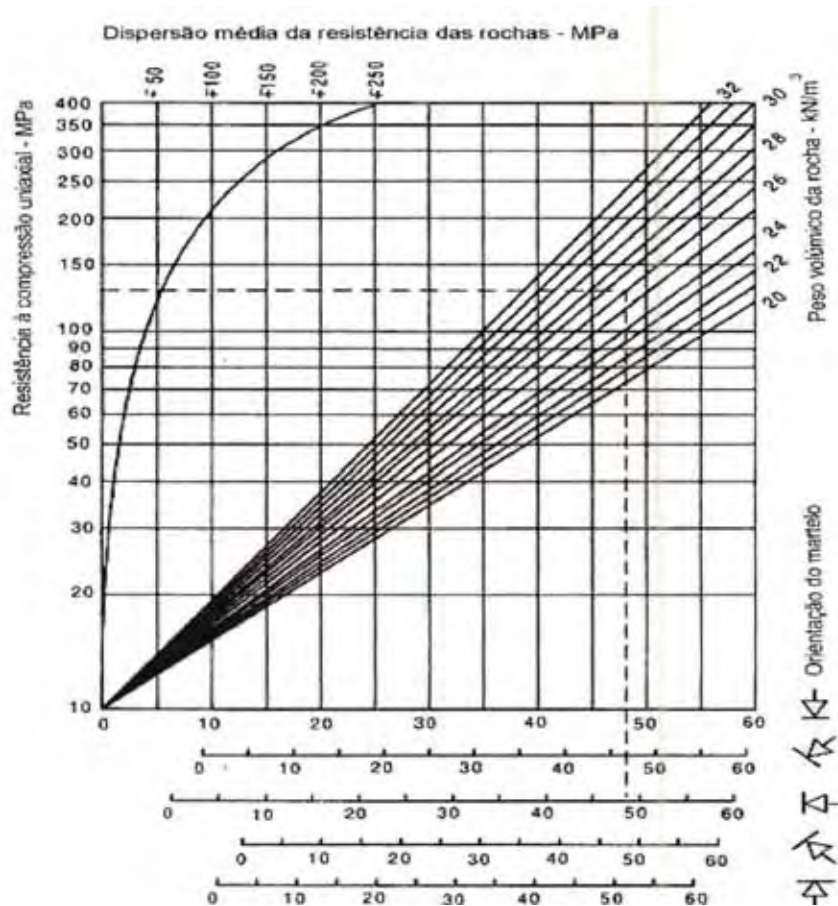


Figura 3.16. Ábaco de correlação para obtenção da resistência a compressão com uso do esclerômetro de Schmidt e do peso específico da rocha (modificado - HOEK e BRAY, 1981)

Os índices JRC e JCS são influenciados pelo efeito escala, de forma que, com o incremento da persistência da descontinuidade, ocorre uma redução nos valores de JRC e JCS. Barton e Bandis (1982), para minimizar o efeito escala, apresentaram as seguintes expressões que relacionam os coeficientes de rugosidade (JRC) e a resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha nas paredes da descontinuidade (JCS):

$$JRC_n = JRC_o [L_n/L_o]^{-0.02 JRC_o} \quad (3.12)$$

$$JCS_n = JCS_o [L_n/L_o]^{-0.03 JRC_o} \quad (3.13)$$

As siglas “o” e “n” expressam a distinção entre a escala de laboratório e a de campo, respectivamente, sendo o JRC_o o coeficiente de rugosidade da descontinuidade, determinado numa linha de amostragem de comprimento L_o (i.e. para um comprimento de 10cm, escreve-se JRC_{10}) e L_n o traço da descontinuidade medido no campo para obtenção do valor JRC_n . De forma análoga, verifica-se com a resistência à compressão uniaxial da rocha na superfície da descontinuidade (JCS), ao considerar uma medição de uma amostra no laboratório (JCS_o), e se ajusta à escala da descontinuidade in situ (JCS_n), conforme ilustrado na Figura 3.17.

3.3.4. Determinação do ângulo de atrito a partir do sistema Q

Barton *et al.* (1974) e Barton (1995) sugeriram uma fórmula empírica para determinação do ângulo de atrito residual (ϕ_r) de descontinuidades, a partir dos índices rugosidade (J_r) e alteração (J_a) do Sistema Q:

$$\phi_r = \arctan(J_r/J_a) \quad (3.14)$$

O valor do ângulo de atrito determinado é similar ao obtido por meio do cálculo com a coesão e atrito combinados, conforme expressão:

$$\phi_r = \arctan(\tau/\sigma) \quad (3.15)$$

Sendo:

τ - tensão cisalhante;
 σ - tensão normal

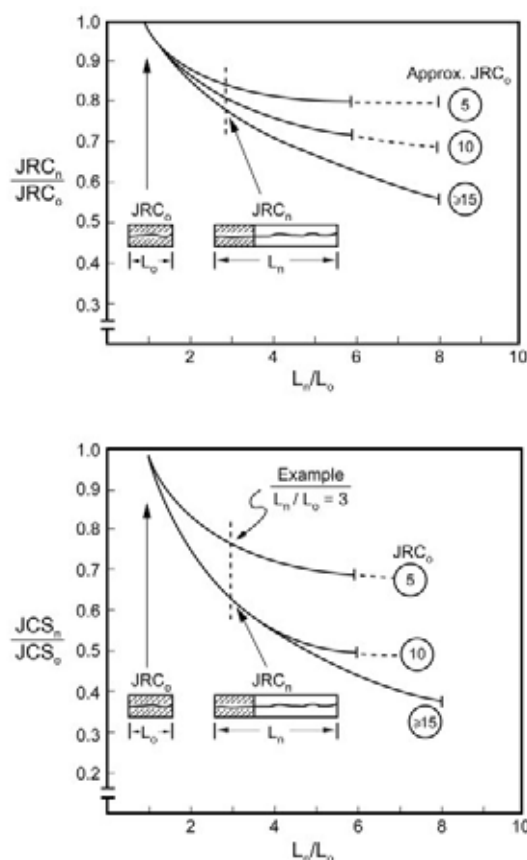


Figura 3.17. Gráficos demonstrativos do efeito escala de JRC e JCS, que dependem da relação das dimensões consideradas de campo L_n/L_0 (BARTON e BANDIS, 1982).

3.4. Critérios de resistência da rocha intacta, descontinuidade e do maciço rochoso.

Vários critérios têm sido introduzidos na determinação da resistência da rocha intacta, de descontinuidades ou do maciço rochoso. Para rochas intactas, pode-se recorrer a ensaios triaxiais ou de cisalhamento direto; em descontinuidades, são grandes as dificuldades na extração da amostra, e *in situ* são demorados e muitos onerosos.

Em maciços rochosos, é muito rara a obtenção direta de parâmetros a partir de ensaios, sendo mais comum recorrer à metodologia indireta utilizando classificação geomecânica.

Conforme Assis (2003b), alguns critérios são mais adequados, para cada caso, independentemente de como são obtidos os parâmetros, da rocha intacta, de descontinuidades e do maciço rochoso, estando estes critérios e suas aplicações sintetizados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Critérios de resistência normalmente aceitos para cada tipo de material rochoso.

Material Rochoso		Critério de Resistência	Obtenção de Parâmetros
Rocha Intacta		Mohr-Coulomb	Direta: ensaio de cisalhamento direto, ou ensaios triaxiais.
		Hoek e Brown	
Descontinuidade	Contato parede/parede	Barton e Choubey	Semi-direta (ensaio simples)
	Parcialmente preenchida	Mohr-Coulomb	Indireta (parâmetros J_r e J_a da classificação de Barton <i>et al.</i> 1974).
	Preenchimento dominante	Mohr-Coulomb	Direta (ensaio de cisalhamento no material do preenchimento)
Maciço Rochoso		Mohr-Coulomb	Indireta (parâmetros a partir de classificação geomecânica e do GSI)
		Hoek e Brown	

Supondo-se que possam ser estimadas as tensões preexistentes (iniciais) no maciço rochoso e que se possa prever como estas tensões serão modificadas pela construção e operação das obras de engenharia, utiliza-se um critério de ruptura para determinar o comportamento do maciço.

Critérios de ruptura são relações entre as tensões correspondentes ao estado de ruptura de um material. Um estado de ruptura muitas vezes é difícil definir, sendo comum associar esse estado às tensões correspondentes ao pico da curva tensão-deformação (resistência de pico). Após o pico da curva tensão-deformação, a rocha não perde completamente sua capacidade de resistência, podendo atingir um estado de tensões denominado resistência residual (ASSIS, 2003b).

3.4.1. Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

Conforme Fiori *et al.* (2001), o mais conhecido e mais simples critério de ruptura, Mohr-Coulomb, consiste em uma reta envoltória tangenciando o círculo de Mohr que representa as condições críticas de combinações dos esforços principais. Esse critério foi originalmente aplicado a solos, mas pode ser utilizado para alguns tipos de rocha intacta, descontinuidades planas e lisas, ou aquelas rochas controladas por preenchimentos, e até mesmo, em alguns casos, para maciços rochosos, que pode ser escrito em termos da tensão de cisalhamento (τ) e da tensão normal (σ) atuantes no plano representado pelo ponto de tangência de um círculo de Mohr (Figura 3.18).

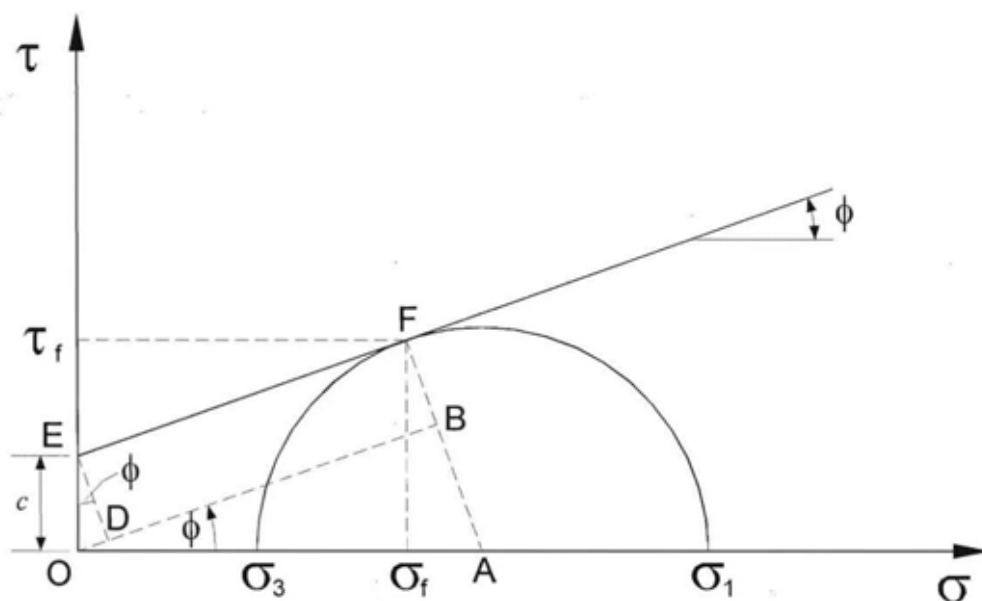


Figura 3.18. Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

Com base na Figura 3.18, o critério de Mohr-Coulomb, poderá ser expresso em termos de tensões principais e da coesão:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (3.16)$$

Sendo:

σ_1 - tensão principal maior;

σ_3 - tensão principal menor;

c - a coesão.

Conforme Assis (2003b), simulando a determinação dos parâmetros, a partir de ensaios em um certo número de amostras coletadas de determinado maciço rochoso, e submetidas cada uma delas a uma tensão normal (σ), aplica-se uma tensão cisalhante, τ , medindo-se o deslocamento d , conforme ilustrado na Figura 3.19a. Plotando-se os valores de τ para os respectivos deslocamentos d , obtém-se um gráfico, conforme mostrado na Figura 3.19b.

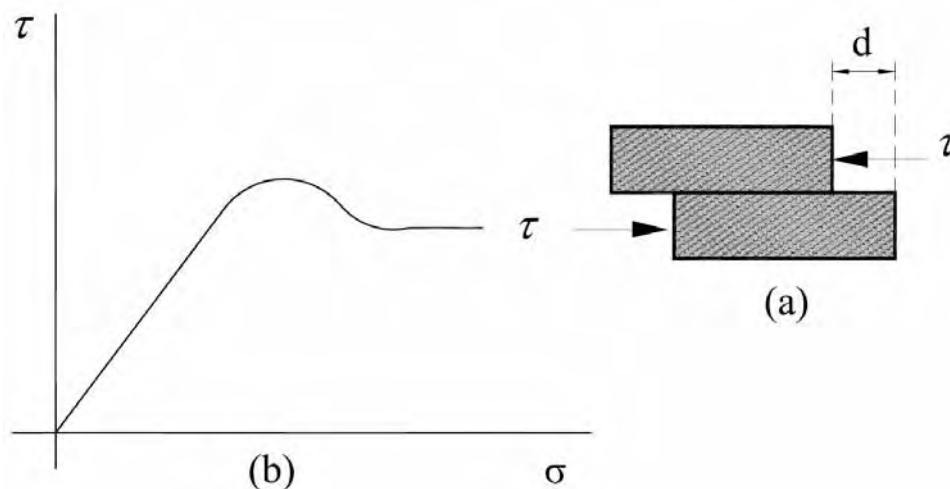


Figura 3.19. Representação do Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Para pequenos deslocamentos, a amostra se comporta de modo elástico e a tensão cisalhante é linear. À medida que as forças resistentes ao movimento são superadas pela tensão cisalhante, a curva torna-se não-linear e alcança um ponto máximo chamado τ_{\max} . Após este valor, a tensão cisalhante necessária para causar um deslocamento decresce rapidamente até um valor que se torna constante, chamado tensão cisalhante residual ou última, τ_r .

Plotando os valores de τ_{\max} ou τ_r para os diversos valores de tensões normais em que foram realizados os ensaios, são encontradas curvas como a da Figura 3.20, onde a inclinação da reta é o ângulo de atrito e a interseção com o eixo τ é a coesão do material cimentante existente na descontinuidade, ou seu grau de embricamento (c).

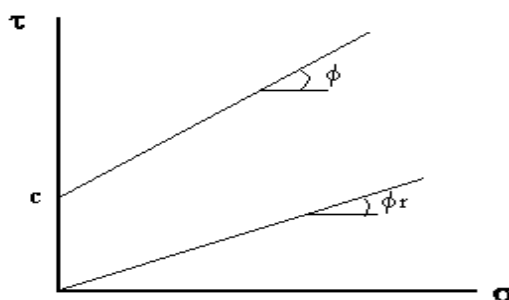


Figura 3.20. Envolvórias de ruptura de pico e residual no gráfico de Mohr-Coulomb. Na abscissa são representadas as tensões normais e na ordenada os intervalos de tensões cisalhantes.

O valor da resistência ao cisalhamento pela Lei de Mohr-Coulomb é obtida com base nas expressões:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (3.17)$$

$$\tau_r = \sigma \operatorname{tg} \phi_r \quad (3.18)$$

sendo:

τ_{\max} - tensão cisalhante máxima;

τ_r - tensão cisalhante residual;

c - coesão do material;

σ - tensão normal;

ϕ - o ângulo de atrito de pico;

ϕ_r - o ângulo de atrito residual.

A tensão cisalhante residual ocorre após a coesão do material cimentante da descontinuidade ter sido inteiramente perdida. Observar que o atrito residual é normalmente menor que o atrito para tensões cisalhantes máximas, ou seja $\phi \geq \phi_r$.

3.4.2. Critério de Barton e Choubey

Patton (1966), apud Hidalgo (2002), com base em ensaios de cisalhamento direto em amostras artificiais, constatou que a envoltória da resistência ao cisalhamento é bilinear. A resistência ao cisalhamento é função do ângulo de atrito do material (ϕ_b), da inclinação e das características da superfície do plano da descontinuidade (i).

Conforme poderá ser visualizado na Figura 3.21, inicialmente a superfície rugosa submetida a tensões normais exibe um ângulo de atrito alto ($\phi_b + i$). Com o incremento da tensão normal e do deslocamento, as asperezas sofrem cisalhamento e o ângulo de atrito diminui progressivamente até atingir o valor mínimo residual.

O ângulo de atrito total (ϕ) é igual à somatória do ângulo de atrito básico e ao ângulo médio das irregularidades (rugosidade) ($\phi = \phi_b + i$). Desta forma a envoltória de ruptura da descontinuidade, conforme mostrado na Figura 3.20, pode ser definida pela expressão:

$$\tau = \sigma_n t_g (\phi_b + i) \quad (3.19)$$

O critério de Barton e Choubey (1978) é dado pela expressão semi-empírica 3.20, baseada em observações e ensaios realizados em superfícies artificialmente rugosas, sendo i o ângulo de inclinação das rugosidades, representada pela equação 3.21, (BARTON, 1976; 1995):

$$\tau = \sigma_n \cdot t_g [JRC \log (JCS/\sigma_n) + \phi_b] \quad (3.20)$$

$$i = JRC \log (JCS/\sigma_n) \quad (3.21)$$

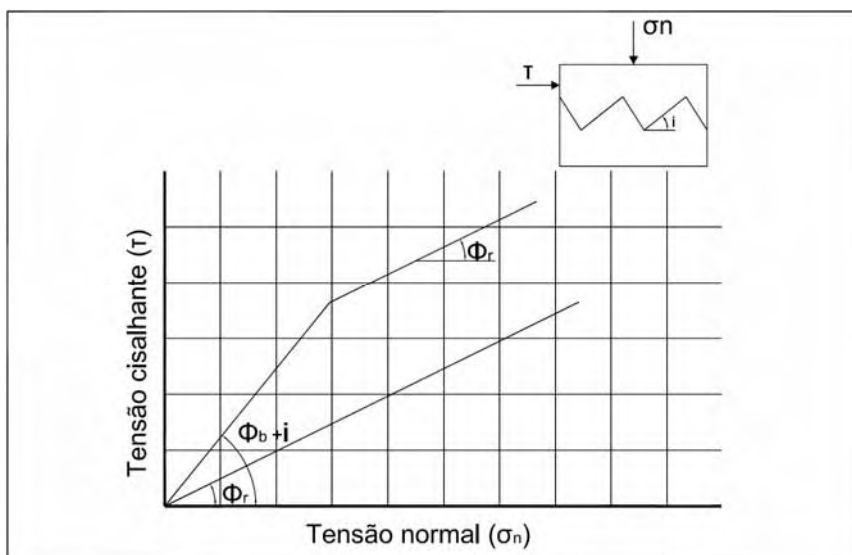


Figura 3.21. Envoltórias de ruptura de descontinuidades (modificado de HIDALGO, 2002)

Considerando o efeito escala de acordo com Barton e Bandis (1982), a expressão 3.20 passa ser escrita como segue:

$$\tau = \sigma_n \cdot t_g (JRC_n \log (JCS_n / \sigma_n) + \phi_b) \quad (3.22)$$

Onde:

τ - tensão cisalhante ao longo da descontinuidade;

σ_n - tensão normal no plano da descontinuidade;

ϕ_b - ângulo de atrito básico da superfície;

JCS_n - resistência à compressão uniaxial da rocha na parede da descontinuidade, na escala de campo;

JRC_n - coeficiente de rugosidade da descontinuidade, na escala de campo.

O ângulo de atrito de pico ($\phi_{(f)}$) da descontinuidade pode ser estimado com base na equação 3.21 e de acordo com a expressão empírica a seguir:

$$\phi_{(f)} = JRC \cdot \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r \quad (3.23)$$

3.4.3. Critério de ruptura de Hoek-Brown

Conforme Assis (2003b), a Lei de Coulomb é normalmente válida para solos, alguns tipos de rocha intacta e descontinuidades lisas e planas ou aquelas preenchidas por solos de granulometria fina. No entanto, para maciços rochosos e para uma grande variedade de tipos de rocha, nota-se claramente uma não linearidade para o gráfico tensão normal (σ) versus tensão cisalhante (τ).

Hoek e Brown (1980 b), com base na análise de um grande número de resultados de ensaios triaxiais em rocha intacta, propuseram um critério empírico de ruptura, em termos das tensões principais.

A hipótese principal do critério de Hoek-Brown é considerar a rocha como um material frágil (teoria de Griffith), em que a envoltória de ruptura da rocha intacta é não linear e pode ser representado de acordo com na seguinte expressão:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_i \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

Onde:

σ'_1 - tensão principal efetiva maior na ruptura;

σ'_3 - tensão principal efetiva menor na ruptura;

σ_{ci} - resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;

m_i - constante do material para rocha intacta.

No mesmo trabalho, Hoek e Brown (1980b) verificaram a possibilidade de relacionar as constantes m e s com o sistema de classificação RMR de Bieniawski (1976). Assim, Hoek-Brown (1988) definiram as constantes m_b , s e a do maciço rochoso e sugeriram que essas constantes poderiam ser relacionadas a partir do sistema de classificação RMR, com determinação dos parâmetros no campo, assumindo condição completamente seca do maciço rochoso e com orientação favorável das famílias de juntas.

Em seqüência, Hoek *et al.* (1992) apresentaram propostas mais gerais do critério para maciços rochosos perturbados e não perturbados, assumindo as seguintes expressões:

(1) Maciços perturbados:

$$m = m_i e^{(RMR-100)/28} \quad (3.25)$$

$$s = e^{(RMR-100)/9} \quad (3.26)$$

(2) Maciços não perturbados:

$$m = m_i e^{(RMR-100)/14} \quad (3.27)$$

$$s = e^{(RMR-100)/6} \quad (3.28)$$

Sendo m_i o valor de m para rocha intacta.

Para aplicar o GSI, utiliza-se a relação m_b/m_i , onde m_i é uma constante da rocha intacta, que pode ser definida por ensaios nessa mesma rocha ou estimada a partir das tabelas (ex. Tabela 3.7) propostas por Hoek *et al.* (1995, 1998):

$$m_b/m_i = e^{(GSI-100)/28} \quad (3.29)$$

A relação das constantes s e a em relação a GSI são:

- para $GSI > 25$ (maciço rochoso não alterado) e $a = 0,5$

$$s = e^{(GSI-100)/9} \quad (3.30)$$

- para $GSI < 25$ (maciço rochoso alterado) e $s = 0$

$$a = 0,65 - GSI/200 \quad (3.31)$$

Douglas (2002) apud Miranda *et al.* (2006), baseado nos resultados de uma extensa base de dados de ensaios, contesta os valores publicados para m_i por Hoek (1994) para os diferentes tipos litológicos, já que este valor não parece estar relacionado com o tipo de rocha.

Sempre que possível, os valores das constantes do critério de Hoek - Brown para a rocha intacta devem ser determinados por meio de análise estatística de resultados de uma série de ensaios triaxiais, segundo as recomendações da ISRM (1981). Entretanto, a relação dada pela resistência à compressão uniaxial e a resistência à tração é uma aproximação mais razoável para m_i e tem sido utilizada com sucesso, em casos práticos, em formações graníticas do projeto do Metrô do Porto (NORMETRO, 2001, apud MIRANDA *et al.* 2006).

Tabela 3.7. Estimativa dos valores de m_i (Modificada de Hoek *et al.* 1998)

Tipo de rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grossa	Média	Fina	Muito Fina
Sedimentar	Cárstica		Conglomerado (22)	Arenito 19	Siltito 9	Argilito 4
			Grauvaca (18)			
	Não-cárstica	Orgânico	Giz (18) Carvão (8-21)			
		Carbonatada	Brecha (20)	Calcário compacto (10)	Calcário grosso 8	
		Química		Gesso 16	Anidrito 13	
Metamórfica	Não foliada		Mármore 9	Hornfels (19)	Quartzito 24	
	Levemente foliada		Migmatito (30)	Anfibolito 25 - 31	Milonito (6)	
	Foliada*		Gnáise (33)	Xisto 4-8	Filito (10)	Ardósia 9
Ígnea	Clara		Granito 33		Riolito (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorito (30)		Dacito (17)	
			Diorito (28)		Andesito 19	
	Escura		Gabro 27	Doleito (19)	Basalto (17)	
			Norito 22			
	Piroclástica extrusiva		Aglomerado (20)	Brecha (18)	Turfa (15)	

Notas: 1. Valores entre parênteses são estimados. (2) (*) Rocha ensaiada direção normal à estratificação. (3) Os valores de m_i serão significativamente diferentes se ocorrer ruptura ao longo da superfície de baixa resistência.

O critério de ruptura de Hoek-Brown foi, posteriormente, expandido (Hoek *et al.* 1995) para representar o comportamento de maciços rochosos com a introdução de fatores que levam em consideração as características das descontinuidades, passando a ser

denominado de critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.32)$$

Onde:

m_b - valor da constante m para maciço rochoso;

s ; a - constantes do maciço rochoso

A partir da constatação da inadequabilidade do RMR, sobretudo para maciços rochosos muito fracos, Hoek *et al.* (1995) introduziram o *Geological Stress Index* (GSI).

Hoek *et al.* (2002) definiram que as constantes mencionadas assumem as expressões:

$$m_b = e^{(GSI - 100 / 28 - 14D)} \quad (3.33)$$

$$s = e^{(GSI - 100 / 9 - 3D)} \quad (3.34)$$

$$a = 1/2 + 1/6 [e^{-GSI / 15} - e^{-20 / 3}] \quad (3.35)$$

Onde m_b é um valor reduzido da constante m para o maciço rochoso; s e a são constantes que dependem das características do maciço rochoso e D é o fator de distúrbio do maciço rochoso, que varia de zero para maciços rochosos não perturbados a 1 (um) para maciços rochosos bastante perturbados.

Para maciço de boa qualidade, descontinuidades fechadas, pouco alterado, blocos angulares, o valor de a é assumido igual a 0,5 ($a = 0,5$). No caso de maciço de qualidade ruim, muito alterado ou intemperizado, descontinuidades cisalhadas, onde a resistência à tração é assumida nula, o valor de s é assumido igual a zero ($s = 0$).

Para um maciço rochoso intacto ($s = 1$ e $a = 0,5$), a expressão (3.32) passa ser escrita conforme segue:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + 1)^{0,5} \quad (3.36)$$

3.5. Correlações empíricas

3.5.1. Correlações entre os Sistemas RMR, Q e MR

Incluem-se correlações empíricas propostas por autores entre os sistemas de classificação RMR, Q e MR, citadas por Miranda (2003):

$$Q = 8,4 \cdot \ln MR + 39,2 \text{ (Rocha, 1976);} \quad (3.37)$$

$$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43 \text{ (Rutledge e Preston, 1978);} \quad (3.38)$$

$$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2 \text{ (Moreno, 1980);} \quad (3.39)$$

$$RMR = 5 \cdot \ln Q + 60,8 \text{ (Cameron-Clarke e Budavari, 1981).} \quad (3.40)$$

$$RMR = 5 \cdot \ln Q + 41,8 \text{ (Abad et al., 1984);} \quad (3.41)$$

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44 \text{ (Bieniawski, 1989);} \quad (3.42)$$

$$MR = 0,9 \cdot RMR + 8 \text{ (Neves et al., 1989);} \quad (3.43)$$

$$RMR = 15 \cdot \log Q + 50 \text{ (Barton, 2000).} \quad (3.44)$$

3.5.2. Determinação empírica do módulo de deformabilidade do maciço rochoso

Para calcular as tensões, esforços e deformações de uma barragem é necessário conhecer a deformabilidade do maciço rochoso. Dessa forma as correlações empíricas entre classificações geomecânicas e módulos de deformabilidade do maciço rochoso têm sido muito empregado. A primeira correlação foi proposta por Bieniawski (1978) e, posteriormente, diversos autores introduziram modificações. A maioria dessas correlações falha em não considerar aspectos muito importantes, como a anisotropia do maciço rochoso e o efeito da água (ROMANA, 2004).

Vários autores propuseram relações empíricas para a estimativa do módulo de deformabilidade do maciço rochoso, baseados nos sistemas de classificação tradicionais, a exemplo dos RMR, Q e o índice GSI, em consequência dos elevados custos para obtenção direta do módulo através de ensaios *in situ*, do tempo de execução dos ensaios e confiabilidade dos resultados, muitas vezes questionáveis.

Citadas por Maia (2007), apresentam-se a seguir equações empíricas aplicadas na determinação do módulo de deformabilidade do maciço rochoso e de casos históricos de três autores, com correlações entre o módulo de deformabilidade e o índice Q (Figura 3.22):

$$E_m = 2RMR - 100, \text{ para } RMR > 50, \text{ Bieniawski(1978)} \quad (3.45)$$

$$E_m = 10^{(RMR-10/40)}, \text{ para } RMR < 50, \text{ Serafim e Pereira (1983)} \quad (3.46)$$

$$E_m = 25 \log(Q), \text{ para } Q > 1, \text{ Grimstad e Barton (1993)} \quad (3.47)$$

$$E_m = [(\sigma_{ci}/100) \cdot (10^{(GSI-10/40)})]^{1/2}, \text{ Hoek e Brown (1997), para } \sigma_{ci} < 100 \text{ MPa} \quad (3.48)$$

$$E_m = (1 - D/2) \cdot [(\sigma_{ci}/100) \cdot (10^{(GSI-10/40)})]^{1/2}, \text{ Hoek et al. (2002),} \\ \text{para } \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \quad (3.49)$$

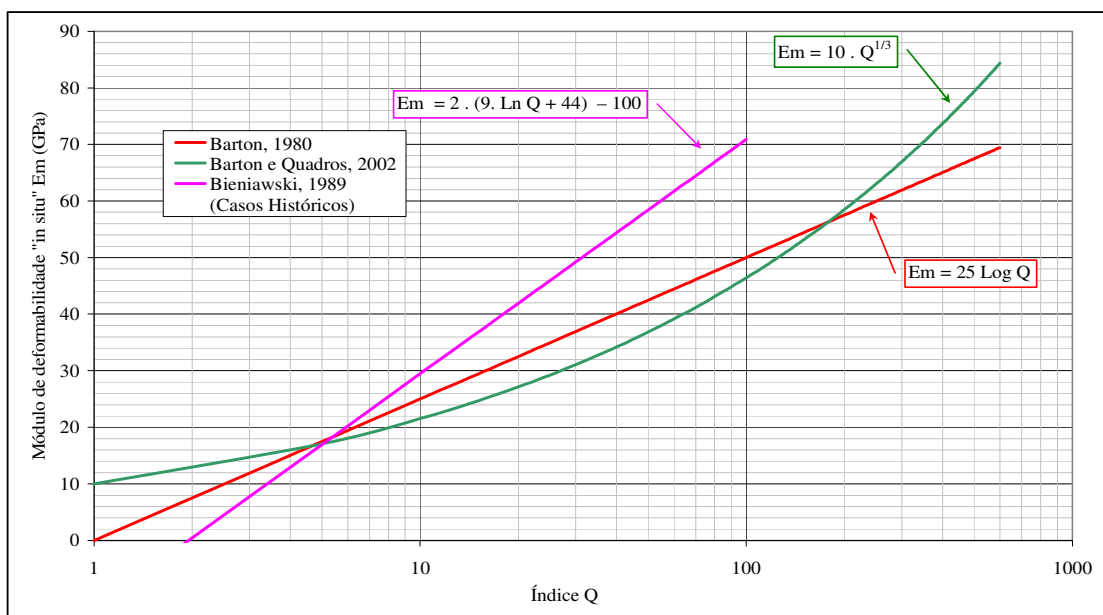


Figura 3.22. Correlação entre o módulo de deformabilidade e o índice Q

Hoek e Diederichs (2006, p. 23-25 apud Maia, 2007) “propuseram duas relações empíricas para a estimativa do módulo de deformabilidade de maciços rochosos isotrópicos”. A primeira é uma equação simplificada de Hoek e Diederichs, que se ajustou a 90% dos dados trabalhados e é recomendada quando propriedades confiáveis da rocha intacta não são conhecidas, de acordo com a expressão a seguir:

$$E_m = 10^5 \left\{ \frac{(1 - D/2)}{[1 + e^{(75 + 25D - GSI)/11}]} \right\} \quad (3.50)$$

onde:

E_m – módulo de deformabilidade em MPa;

GSI – Índice de resistência geológica;

σ_{ci} – resistência de compressão uniaxial do material da rocha intacta;

D – Fator de distúrbio.

A segunda equação, proposta por Hoek e Diederichs (2006), utiliza as mesmas variáveis da primeira equação (3.50), entretanto, inclui o módulo de deformabilidade da rocha intacta (E_i), conforme expressão a seguir:

$$E_m(\text{MPa}) = E_i \left\{ 0,02 + \frac{(1 - D/2)}{[1 + e^{(60 + 15D - GSI)/11}]} \right\} \quad (3.51)$$

A equação simplificada de Hoek e Diederichs (2006), expressão 3.50, foi comparada com medições *in situ* do módulo de deformação do maciço rochoso publicadas pelos autores constantes das expressões 3.44 a 3.48 (Figura 3.23). Consta-se que, devido o fator de distúrbio (D), a equação proposta por Hoek e Diederichs (2006) possibilita uma maior abrangência de valores para o módulo de deformabilidade do maciço rochoso e apresenta bom ajuste da equação simplificada quando comparada com as equações de Serafim e Pereira (1983) e Bieniawski (1978), considerando o maciço isento de perturbações anteriores (D = 0).

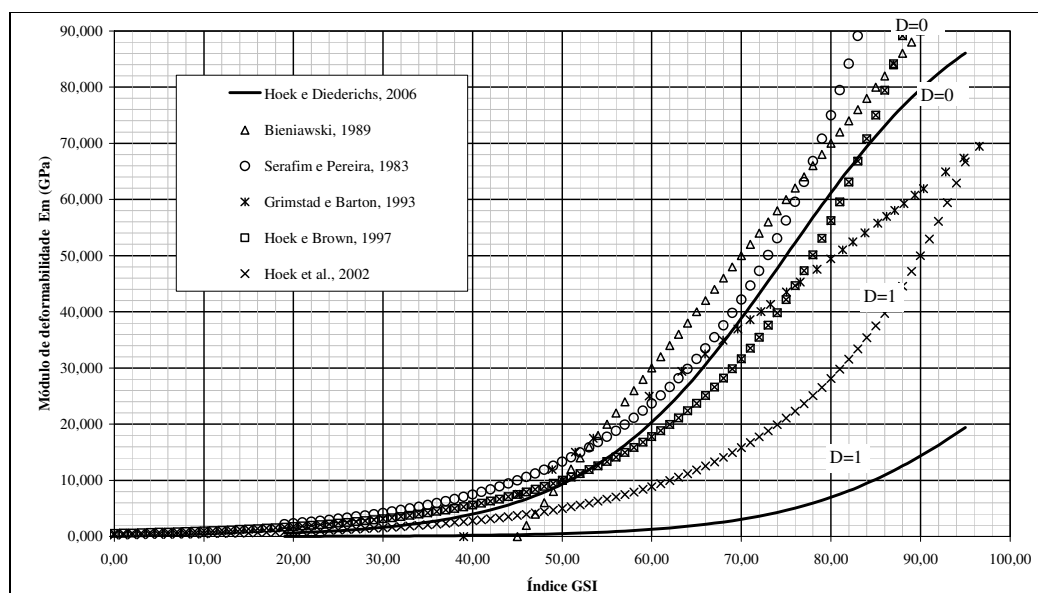


Figura 3.23. Correlação entre o módulo de deformabilidade e o índice GSI (MAIA, 2007).

Singh, (1979), apud Miranda (2003), demonstrou que o fator de redução do módulo de deformabilidade da rocha intacta (MRF) é definido pela razão entre o módulo de deformabilidade do maciço rochoso (E_m) e o módulo de deformabilidade da rocha intacta (E_R) e mencionou Nicholson e Bieniawski (1990) que desenvolveram uma expressão empírica para correlacionar estes fatores (E_m , E_R) com o valor do RMR:

$$\text{MRF} = (E_m / E_R) = 0,0028 \cdot \text{RMR}^2 + 0,9 \cdot e^{(\text{RMR}/22,28)} \quad (3.52)$$

Com este capítulo, têm-se todas as proposições para, a partir de classificações geomecânicas, buscar obter parâmetros geomecânicos preliminares de maciços rochosos.

Capítulo 4

Métodos e Etapas

Após a revisão bibliográfica sobre classificações e caracterização geomecânica de parâmetros de maciços rochosos, os trabalhos da pesquisa foram desenvolvidos em uma seqüência de atividades subdivididas em três etapas: coleta de dados, tratamentos e sistematização dos dados para atingir os objetivos da tese, tendo como foco a Linha de Pesquisa Planejamento e Gestão do Meio Físico.

4.1. Desenvolvimento da pesquisa – Etapa 1: Coleta de dados

Para caracterização do meio físico dos empreendimentos hidrelétricos, estudos de caso da pesquisa foram adquiridos:

- Junto à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Residência de Porto Velho, toda base de dados relativos do convênio N°15.002/2004 (Furnas Centrais Elétricas SA / CPRM) dos temas Geomorfologia, Geologia, Hidrologia e Recursos Minerais;
- Por meio do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) em Porto Velho, RO, foram disponibilizadas imagens de satélite Landsat 7, da faixa do rio Madeira, trecho Porto Velho – Abunã, RO;
- Fotos aerofotogramétricas escala 1:30.000, da faixa do rio Madeira, entre Porto Velho – Abunã, contrato entre as empresas Cartografia e Projetos de Engenharia SA (Aeromapa), Construtora Norberto Odebrecht (CNO), processo n° 48500.000291/01-31, bem como as respectivas ortofotocartas, restituídas em escala 1:10.000, sendo no trecho Santo Antônio –

Jirau na elevação 80 e Jirau – Abunã na elevação 100, utilizados no estudos de Inventário e Viabilidade do Complexo Hidrelétrico do rio Madeira;

- Documentos de projeto disponibilizados por Furnas e Projetos & Consultorias de Engenharia Ltda (PCE). Os documentos do Projeto Civil e dos Estudos de Impactos Ambientais e Relatório de Impacto Ambiental do Complexo do rio Madeira, EIA-RIMA, que incluem: Estudos de Inventário da bacia do rio Madeira desenvolvidos por Furnas/CNO/PCE, nos anos 2001-2002, concluso com dois aproveitamentos hidrelétricos Santo Antônio e Jirau acoplados aos sistemas de transposição para navegação, que incluem eclusas e canais, sendo estes empreendimentos denominado Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira; Estudos de Viabilidade dos Aproveitamentos Hidrelétricos Santo Antônio e Jirau desenvolvidos por Furnas/CNO/PCE, nos anos 2002-2005 (FURNAS *et al.* 2004, 2005a, 2005b, 2006);
- Ensaio de laboratório e de campo com desenvolvimento de programação específica para os estudos de tese foram implementados pelo Departamento de Apoio Técnico (DCT.C) de Furnas, situado em Aparecida de Goiânia, GO;
- Pesquisa bibliográfica em geral na área de mecânica das rochas com especial atenção às classificações geomecânicas tradicionais para correlações e base de cálculo;
- Documento de projeto da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra do Facão, disponibilizados por Furnas, que incluem o Projeto Básico Consolidado, o Projeto Executivo com todo acervo do Projeto Civil e dos Estudos de Impactos Ambientais e o Relatório de Impacto Ambiental EIA-RIMA (FURNAS *et al.* 2000, 2002);
- Relatórios Técnicos do Detalhamento do Projeto Executivo e de Andamento da Obra internos foram disponibilizados para consulta pela Serra do Facão Energia (Sefac), bem como todo acervo técnico em que este autor teve participação direta;
- Elaboração e desenvolvimento de programa interno de pesquisa desenvolvido para determinação e caracterização de parâmetros geomecânicos de descontinuidades *in situ* e em amostras coletadas do maciço rochoso da UHE Serra do Facão: determinação do ângulo de atrito básico, residual e de pico de descontinuidades, características de coerência e alterabilidade de mica-xistos e grafita-xisto, com avaliação da resistência quando submetida à imersão em água, cujos resultados serviram para caracterizar como rocha branda, nas condições de amostragem e nível de ocorrência. (FURNAS, 2007).

4.2. Desenvolvimento da pesquisa – Etapa 2: Tratamento dos dados

A pesquisa para desenvolvimento da tese foi iniciada a partir dos estudos e prospecções de campo do AHE Jirau, tendo sido neste projeto formatada a base estrutural da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para as fases de viabilidade e projeto básico.

Pari passum com os trabalhos de campo e laboratório, concentrou-se na revisão bibliográfica de trabalhos e publicações anteriores que viessem corroborar o objetivo da tese, estando citados no Capítulo 1.

Os passos seguintes da revisão bibliográfica, foram concentrados na formulação do embasamento técnico, na definição de termos técnicos e de índices e parâmetros consagrados, nos métodos e formas de obtenção e uso e, em sequência, as principais e tradicionais classificações geomecânicas de maciços rochosos, incluídas no Capítulo 2.

Fotos aéreas (aerofotogrametria) e imagens de satélites foram usadas sistematicamente nos levantamentos em escala regional dos trabalhos de campo. Na fase do mapeamento local e de detalhamento na região da cachoeira do Jirau, ortofotocartas e imagens auxiliaram na interpretação dos alinhamentos estruturais, delimitação de afloramentos, de formações sedimentares recentes, dos traçados de acessos, drenagens e vegetação.

O mapeamento geológico local na área de interesse e em consonância ao objetivo da tese, em escala original de 1:10.000, foi detalhado em escala 1:5.000. Cerca de 500 afloramentos foram mapeados e as atitudes das descontinuidades analisadas, estatisticamente, estão apresentadas em estereogramas no Capítulo 5.

Ensaio geotécnicos, em amostras extraídas em afloramentos e de testemunhos de sondagem rotativa dos estudos do AHE Jirau, foram analisados e complementados com programação específica, a partir da seleção de amostras de furos de sondagem de áreas selecionadas. Incluem-se os ensaios de compressão simples e pontiformes, para determinação da resistência da rocha intacta e ensaios de cisalhamento de descontinuidades presentes nos testemunhos de sondagem, apresentados no Apêndice A.

A revisão bibliográfica nesta etapa direcionou-se na obtenção de dados metodológicos para determinação, de forma direta de parâmetros geomecânicos ou indireta por meio de expressões empíricas, empregadas na caracterização geomecânica de descontinuidades presentes nos maciços rochosos do AHE Jirau e UHE Serra do Facão.

As sondagens rotativas das áreas de interesse foram reclassificadas para obtenção e aferição dos índices geotécnicos dos sistemas Manoel Rocha (MR), *Rock Mass Rating* (RMR), *Tunnelling Quality Index* (Q) e *Rock Mass Index* (RMi), para escolha da base estrutural da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos.

Correlações dos índices de alteração e coerência com a resistência da rocha intacta foram realizadas, a partir dos resultados dos ensaios de laboratório mencionados, por meio de ensaios expeditos, conforme recomendado pela ISRM (1981), em testemunhos de sondagem, executadas em áreas pré-selecionadas, revalidados no campo em afloramentos localizados nas proximidades dos respectivos furos.

A permeabilidade do maciço rochoso, obtida a partir de ensaios de perda d'água executados em furos de sondagem rotativa, foi correlacionada com o grau de fraturamento dos respectivos trechos ensaiados e da área. Sendo, portanto, possível enquadrar determinada área na classe de permeabilidade, comparando-a com áreas correlatas de permeabilidade conhecida, sendo uma das formas de pontuar esse parâmetro na proposta de classificação geomecânica.

Na prática, as mesmas atividades realizadas no AHE Jirau foram conduzidas na UHE Serra do Facão, de forma que as pesquisas seguiram a seqüência lógica inicial de ajustar os mapeamentos geológicos existentes:

- O mapeamento regional anexo do EIA-RIMA (FURNAS *et al.* 2000) que abrange toda área do reservatório foi reduzido à área de maior interesse da pesquisa de tese;
- O mapa geológico local anexo do relatório do Projeto Básico Consolidado da UHE Serra do Facão (CNEC, 2002) foi detalhado, tendo sido limitado à área do canteiro de obras;
- Os mapeamentos geológico-geotécnicos de liberação de fundação, originalmente em escala 1:100 da área de interesse, foram simplificados, incluindo as descontinuidades mais significativas e representativas do maciço rochoso.

4.3. Desenvolvimento da pesquisa – Etapa 3: Sistematização dos dados e conclusões

Os sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos, tradicionalmente utilizados em projetos de túneis, foram objeto de análise e seleção, visando a montagem de uma base classificatória para uso em projetos hidrelétricos a céu aberto, a partir dos seguintes critérios:

- Ter uma base estrutural que inclua as propriedades mais significantes dos maciços rochosos, com avaliação qualitativa e, sobretudo quantitativa;

- Ser dotada de parâmetros obtidos com menor grau de subjetividade possível, mensuráveis e podendo ser determinados com base em prospecções de campo e ensaios a baixo custo;
- Ser de fácil assimilação e aplicação, com termos claros e linguagem comum entre equipes de geologia e engenharia;
- Ser funcional e fornecer dados quantitativos para o projeto.

Das classificações geomecânicas tradicionais pesquisadas, as que melhor se enquadraram nos requisitos mencionados foram os sistemas MR, RMR, Q e RMI. O passo seguinte foi a escolha do sistema da base estrutural da proposta classificação geomecânica de maciços rochosos, objetivo da presente tese.

Utilizando sondagens representativas de três estruturas do AHE Jirau, verificou-se as dificuldades de obtenção dos parâmetros e avaliou-se os resultados, por meio dos quatro sistemas selecionados, tendo finalmente sido escolhido o RMR, aprofundado no Capítulo 6.

O primeiro parâmetro classificatório foi definido, a partir dos resultados da pesquisa citada na etapa anterior, que inclui a resistência da rocha intacta, com maior abrangência para rochas brandas e maciços intemperizados.

O segundo parâmetro classificatório, espaçamento das descontinuidades, determinado em sondagem rotativa pelo grau de fraturamento e em mapeamento pela medida do espaçamento das fraturas, foi concebido a partir da experiência do Aproveitamento Múltiplo (APM) Manso (Furnas, 2002), citado no Capítulo 1 e vivenciado por este autor.

A análise minuciosa das fraturas em sondagens rotativas, por ocasião da reclassificação e com base no mapeamento geológico local de detalhes citados, possibilitou formatar o parâmetro condição das descontinuidades. As descontinuidades presentes no maciço rochoso com suas características geométricas, dos planos e dos preenchimentos, complementado com a estimativa do ângulo de atrito residual foram reunidas em cinco grupos, definindo dessa forma o terceiro parâmetro da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos.

A influência da água, índice comum nos sistemas RMR, Q e MR, na proposta de classificação, corresponde ao quarto parâmetro, permeabilidade do maciço rochoso, obtido conforme mencionado na etapa anterior.

O ajuste das descontinuidades compreende o quinto e último parâmetro, focado nas características e modo de ocorrência das descontinuidades, que possam gerar situações de instabilidade, portanto de intervenções de projeto, compreendendo situações previsíveis de ocorrer em se tratando de barramentos hidrelétricos. A base metodológica da proposta de

classificação geomecânica de maciços rochosos, fases de viabilidade e projeto básico, aplicados em projetos hidrelétricos a céu aberto, com cinco parâmetros classificatórios foi dessa forma definida.

As pesquisas para desenvolvimento da tese da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para a fase de projeto executivo (obra) se concentraram na UHE Serra do Facão, em execução no rio São Marcos, estado de Goiás.

Com base nos dados obtidos do programa interno de pesquisa, desenvolvido para determinação e caracterização de parâmetros geomecânicos de descontinuidades, da etapa de coleta de dados, foi estendido nesta etapa, na determinação de parâmetros geomecânicos de descontinuidades do maciço rochoso da UHE Serra do Facão, na área de interesse da tese.

A proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para as fases de viabilidade e projeto básico, devidamente testada no AHE Jirau, foi avaliada no maciço rochoso da UHE Serra do Facão, por meio de quatorze sondagens rotativas executadas para projeto na área de interesse da pesquisa e a seguir reavaliada, pelo sistema RMR de Bieniawski (1989).

Aferiu-se a proposta de classificação geomecânica em maciços de baixa consistência em trechos de sondagem com ocorrências de grafita-xisto, com características geomecânicas de rocha branda, comparável aos filitos da UHE Batalha (FURNAS *et al.* 2006, FURNAS, 2007).

A base estrutural da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para a fase de projeto executivo (obra) é a mesma da classificação para as fases viabilidade e projeto básico. A principal diferença está na forma de determinar os parâmetros, sendo nesta fase baseado no mapeamento geológico-geotécnico de fundação, com apoio de sondagens rotativas executadas na área.

Inicialmente, aferiu-se a proposta de classificação geomecânica na fundação da tomada de desvio da UHE Serra do Facão. Foram reavaliados, de início, os parâmetros geotécnicos da classificação das fases de viabilidade e projeto básico, com base nas sondagens existentes, e a seguir foram comparados os pontos obtidos com a exposição do maciço rochoso, por ocasião dos serviços de preparo e tratamento de fundação. O parâmetro condição das descontinuidades foi ajustado a partir da liberação dessa estrutura provisória, passando a ser adotado o conceito do ângulo de atrito da descontinuidade representativa da fundação.

Acompanhamento das atividades de preparo e tratamento de fundação em curso na UHE Serra do Facão (com cerca de 70% concluído em setembro de 2008), que incluem

cortina de injeções, injeções de consolidação, regularização de taludes a fogo e/ou concreto, tratamentos de fraturas, concreto dental e de regularização, cortina e galerias de drenagem. Esta foi uma oportunidade ímpar para reavaliar a aplicabilidade e eficiência dos tratamentos nesta área específica e proceder aos devidos ajustes dos critérios de projeto, de forma que neste período a proposta da classificação geomecânica passou por ajustes e calibração.

Procedeu-se a aplicabilidade da proposta classificação geomecânica, tendo sido selecionadas áreas diversificadas de fundações de estruturas de concreto e de barragens de terra e rocha. Finalmente, considerando o cumprimento do objetivo principal da presente tese, desenvolveu-se as conclusões e ainda sugerimos o prosseguimento das pesquisas nessa área específica. No entanto, vale observar que esta proposta de classificação deve ser objeto de maior calibração e ajuste, em função de aplicações em empreendimentos futuros.

Capítulo 5

Conhecimentos do Meio Físico

- Estudo de Casos

5.1. Considerações gerais

Foram utilizados dois empreendimentos para estudo de casos no desenvolvimento de pesquisas da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos: o Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau na fase dos estudos de viabilidade e a Usina Hidrelétrica (UHE) Serra do Facão no projeto executivo em fase de implantação das obras.

O AHE Jirau é uma das usinas em fase de implantação do Complexo do rio Madeira, em que este autor participou das pesquisas de campo para estudos de projeto nas fases de inventário e viabilidade, período de abril/2001 a abril/2007. Na UHE Serra do Facão, o autor teve participação na equipe de supervisão e controle de qualidade (Engenharia do Proprietário), no período de abril/2007 a outubro/2008. Dessa forma, as pesquisas da presente tese foram desenvolvidas com base nas investigações geológico-geotécnicas para estudos desses projetos:

- As prospeções da fase de viabilidade do AHE Jirau foram complementadas com programação específica de pesquisas de campo, mapeamentos de detalhe, amostragens e ensaios geomecânicos do maciço rochoso;
- O acervo geológico-geotécnico do projeto básico consolidado (CNEC, 2002, 2002a) da UHE Serra do Facão foi revisto e utilizado nas pesquisas, notadamente as sondagens mecânicas e os mapeamentos geológicos. No projeto executivo da UHE Serra do Facão,

investigações complementares foram executadas, sobretudo para desenvolver o modelo geomecânico do maciço rochoso, para definição dos níveis de fundação e otimização dos tratamentos, fundamentais na aferição dos estudos anteriormente formulados, bem como no desenvolvimento da proposta de classificação geomecânica para projeto executivo (obra).

Com o avanço das escavações obrigatórias, inclusive do túnel para desvio do rio, e a exposição do maciço rochoso nas áreas das estruturas de concreto, desenvolveu-se a metodologia de obtenção de parâmetros geomecânicos e formulou-se a proposta de classificação geomecânica.

A partir do acompanhamento das escavações nos níveis de fundação, da aferição e ajustes dos critérios de projeto adotados para preparo e liberação das fundações e execução dos tratamentos superficiais e profundos, passou-se para a fase final da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos, com ajustes dos pesos ou pontos dos parâmetros classificatórios e, finalmente, a aplicação.

5.2. Localização das áreas do estudo de casos

A área de pesquisa do estudo de casos desta tese, para desenvolvimento da proposta de classificação geomecânica de maciços rochoso, fases dos estudos de viabilidade e projeto básico de um empreendimento hidrelétrico a céu aberto, se situa na região da Cachoeira do Jirau, no médio rio Madeira, a 130 km de Porto Velho, RO.

O acesso é pela BR-364, sentido Rio Branco, AC, em estrada pavimentada e 10 km em estrada vicinal, chegando à margem direita, na região do eixo de barramento do AHE Jirau.

A área total do Projeto do AHE Jirau, incluindo o futuro reservatório, tem cerca de 300 km², sendo que a área do canteiro de obras e abrangência detalhada na presente tese é de 30 km².

A UHE Serra do Facão, em execução no rio São Marcos, um dos principais tributários do rio Paranaíba, localiza-se na divisa dos municípios de Catalão e Davinópolis, GO, a 54 km e 22 km da sede dos respectivos municípios.

O acesso à obra é realizado, partindo-se de Catalão, GO, pela BR-050 em direção à Cristalina, GO, após 12 km de percurso, no km 272, à direita, segue-se destino a Davinópolis, GO, pela GO-301, também pavimentada por mais 28km e à esquerda toma-se a GO-501, em fase de pavimentação, por cerca de 8 km, alcançando a intersecção da estrada de acesso ao

canteiro de obras, e por mais 6km, finalmente, chega-se à guarita de entrada do canteiro de obras, na margem esquerda do rio São Marcos.

A localização das duas áreas poderá ser vista na Figura 5.1.

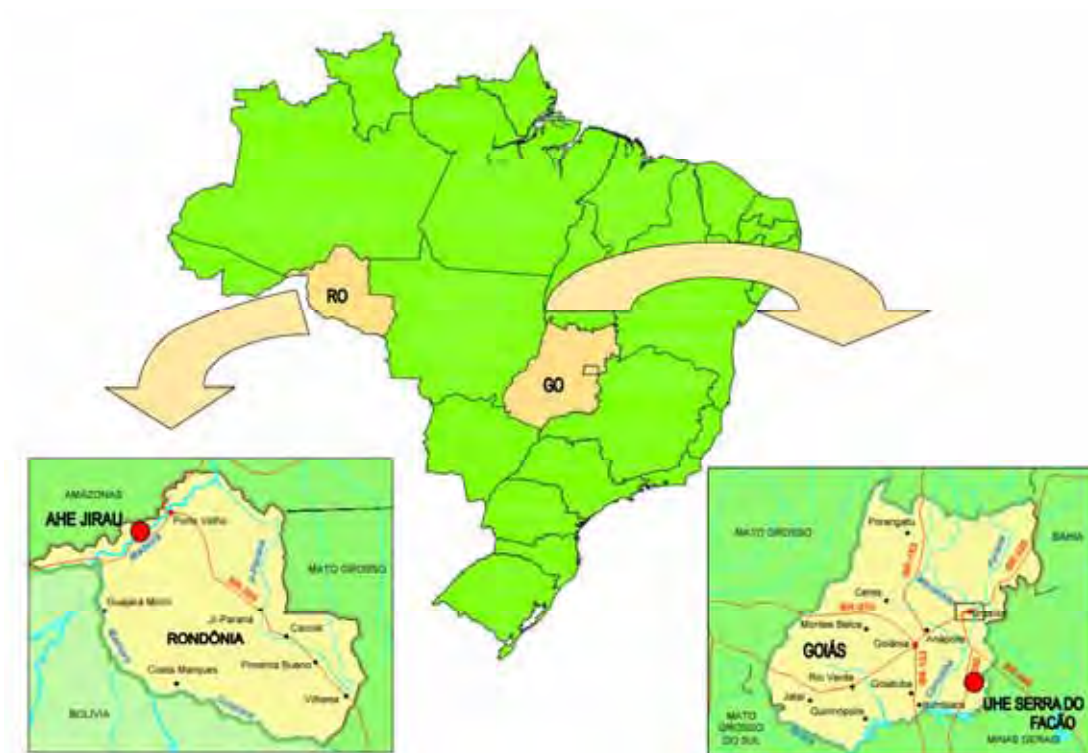


Figura 5.1. Localização das áreas de estudo de casos, AHE Jirau, no rio Madeira, RO e a UHE Serra do Facão no rio São Marcos, GO.

5.3. AHE Jirau

5.3.1. Características gerais

Conforme estudos de viabilidade (FURNAS *et al.* 2004), o AHE Jirau está inserido dentro de um contexto bem mais amplo, que envolve três outros grandes projetos (Complexo do Rio Madeira) formado por quatro usinas hidrelétricas e uma malha hidroviária de 4.200 km navegáveis, no âmbito de um futuro programa de integração de infra-estruturas de energia e de transportes entre Brasil e Bolívia (Figura 5.2.a).

O arranjo (Figura 5.3) foi concebido nos estudos de viabilidade (FURNAS *et al.* 2004) para possibilitar a motorização contínua de 44 máquinas (Casa de Força), com antecipação da geração comercial com a obra ainda em andamento. A partir do 44º mês de

obra, entrará em operação as seis primeiras unidades e, a partir deste marco, a entrada de uma unidade por mês, até a geração completa prevista após 6 anos e 10 meses de construção.

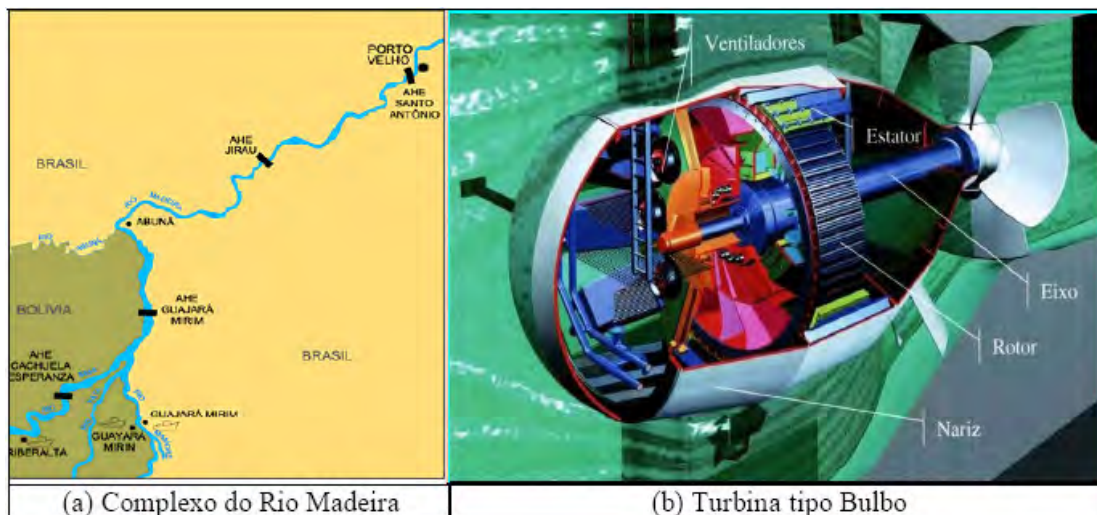


Figura 5.2.a. Croqui de localização dos aproveitamentos hidrelétricos do Complexo do Rio Madeira. (b) Detalhe da Turbina tipo Bulbo a serem utilizadas nos AHE Jirau e Santo Antônio.

O regime hidrológico do rio Madeira possibilitou a adoção de turbina tipo bulbo, que operam em baixas quedas, mas requerem uma vazão de água regular, para que possam operar sem restrições, característica natural do rio Madeira. A tecnologia das turbinas do tipo bulbo é plenamente dominada pela indústria nacional, ou seja, já há tecnologia conhecida para a fabricação de unidades com 75 MW de potência, conforme proposto pelos estudos para o AHE Jirau (Figura 5.2.b).

O AHE Jirau possui um reservatório de pequenas dimensões, considerando que ocupa uma área de 244 km^2 , (referência ao nível d'água médio histórico no mês de janeiro). Dessa área, cerca de 136 km^2 referem-se à inundação natural, resultando um acréscimo de área inundada de apenas 108 km^2 , o que corresponde a uma relação área/potência instalada de $0,074 \text{ km}^2/\text{MW}$.

O Rio Madeira, com vazão média anual em Jirau de $19.000 \text{ m}^3/\text{s}$, é o afluente mais importante do Rio Amazonas e de adequada navegabilidade. Isso se deve a seu traçado natural, com poucas sinuosidades. Seu comprimento, até a foz no Rio Amazonas, é de 1.238 km. Conseqüentemente, está incluso nos estudos a construção de Eclusa e canais de navegação, localizados na margem direita, afastado 100 m da área de montagem.

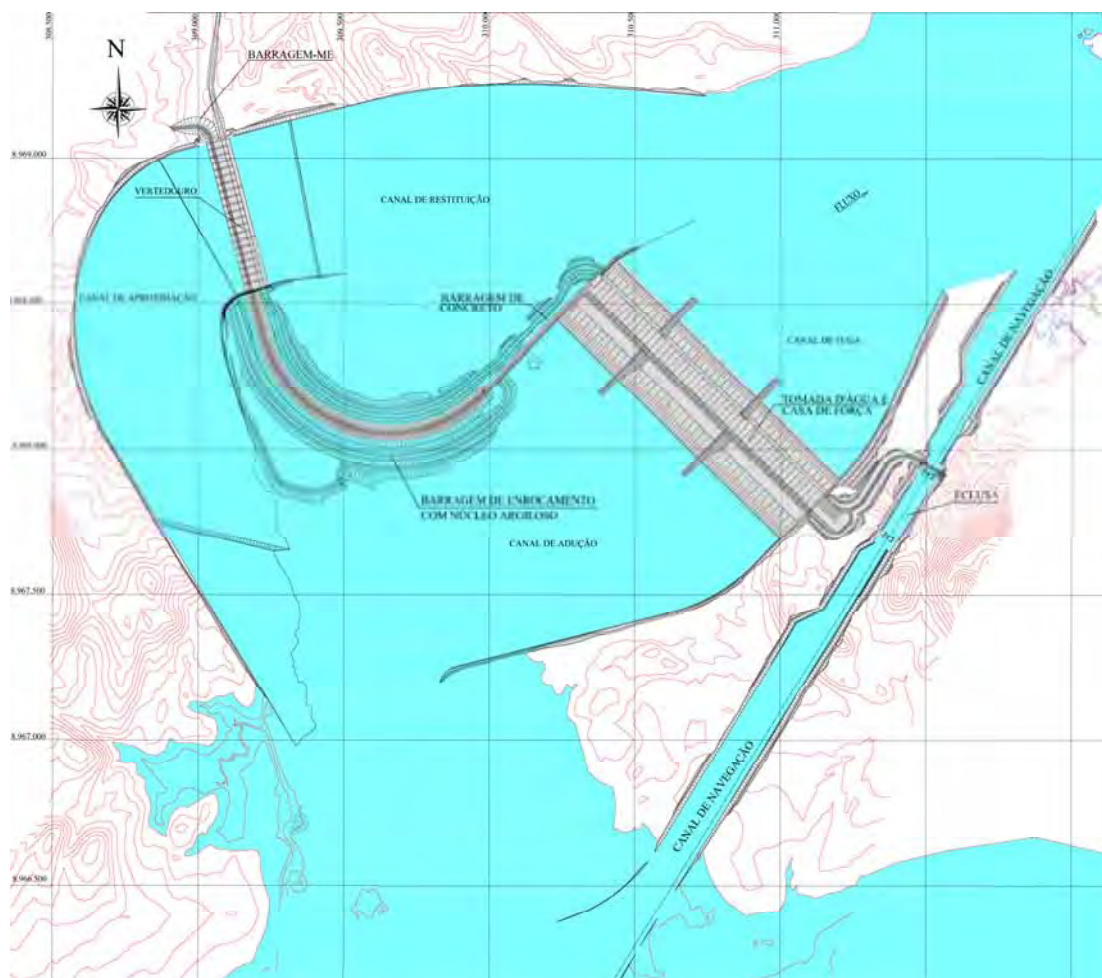


Figura 5.3. AHE Jirau: Arranjo das obras civis em planta.

Visualizando a Figura 5.3, de acordo com Furnas *et al.* (2004), o AHE Jirau, a partir da margem direita apresenta:

- Eclusa para transposição com o canal de navegação;
- Barragem de enrocamento com núcleo argiloso de encontro na ombreira, com 60m de extensão, e acesso pela crista;
- Tomada D'água e Casa de Força subdividida em três conjuntos de blocos onde serão instaladas as 44 unidades geradoras, com extensão de 1.121,5 m, incluindo as Áreas de Montagem e de Descarga (Figura 5.4);
- Barragem de concreto, compactada com rolado (CCR) de 320 m de comprimento, interligada em seqüência;

- Barragem de enrocamento com núcleo argiloso no leito do rio, com comprimento e altura, respectivos, de 1.150m e 50,5m, com crista na cota 95,50m (Figura 5.5);
- Vertedouro, na margem esquerda, o com extensão de 520 m, com 21 vãos, projetado para uma descarga de $82.600\text{m}^3/\text{s}$ (a exemplos, Tucuruí: $110.000\text{m}^3/\text{s}$; Itaipu: $60.000\text{m}^3/\text{s}$), Figura 5.6.
- Finalmente, uma Barragem de enrocamento com núcleo argiloso, com extensão de 160 m e altura máxima da ordem de 15 m, totalizando um comprimento da barragem de 2.331,50 m.

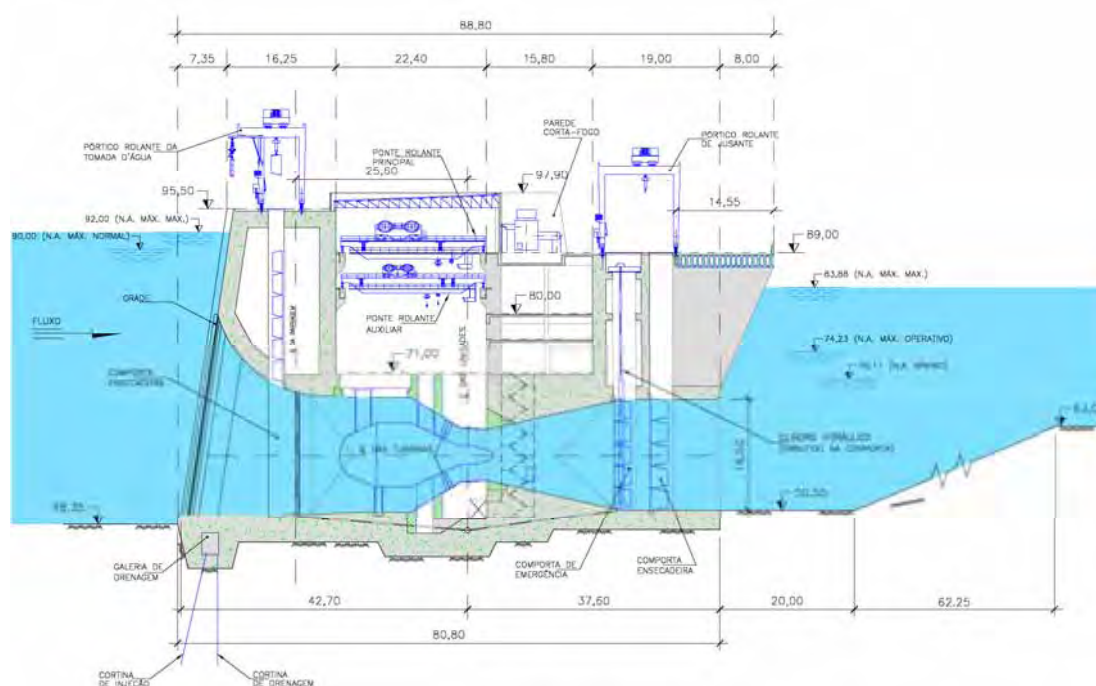


Figura 5.4. AHE Jirau: Tomada D'água e Casa de Força - corte típico.

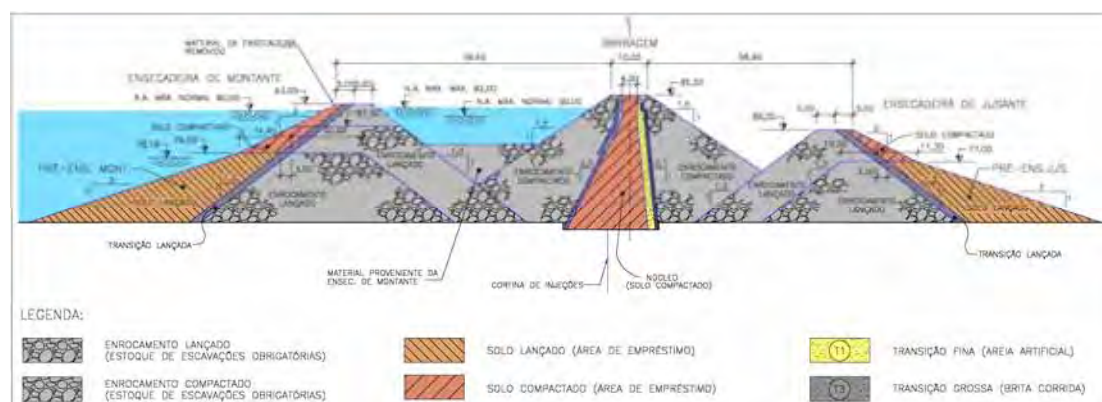


Figura 5.5. AHE Jirau: Barragem do leito do rio e Ensecadeiras incorporadas – seção transversal tipo.

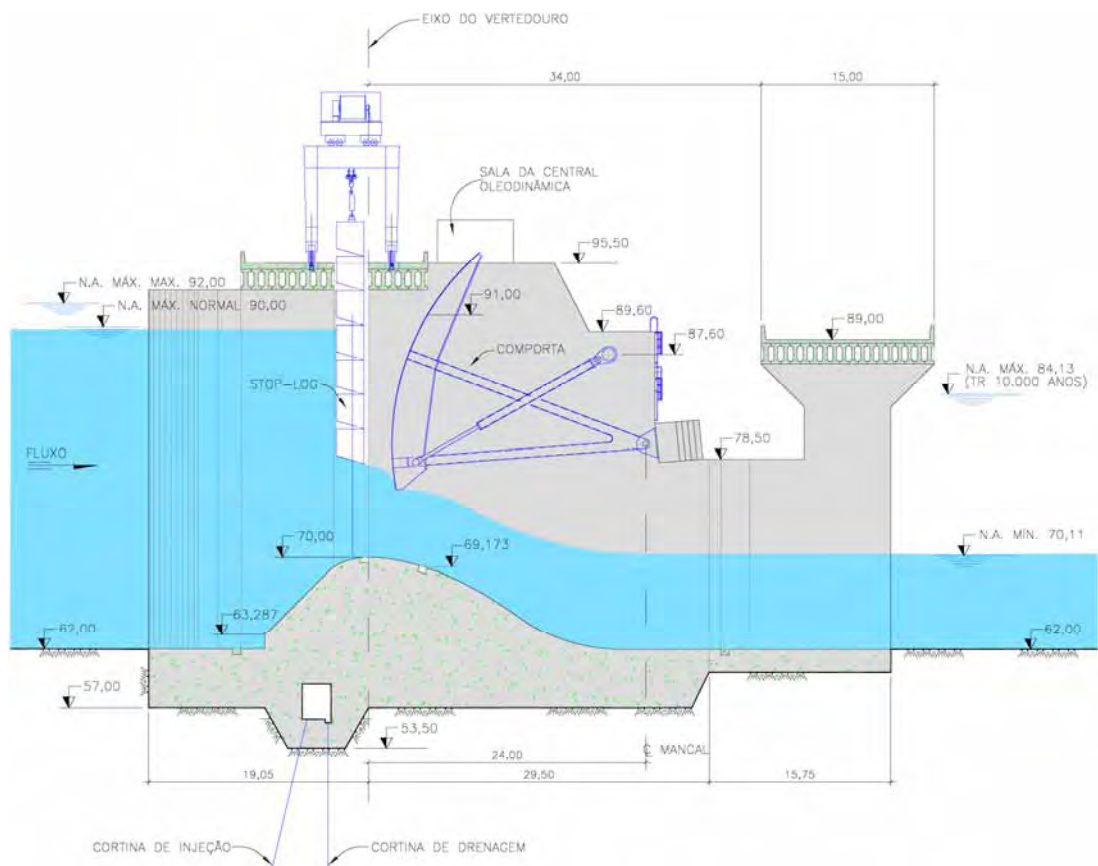


Figura 5.6. AHE Jirau: Vertedouro - corte típico.

O projeto (fase de viabilidade) do AHE Jirau se caracteriza, excepcionalmente, pelos três grandes números: 44 turbinas com 3.300MW de potência, um volume de escavação em rocha da ordem de $36 \times 10^6 \text{ m}^3$, (superior à Itaipu e Tucuruí) e, finalmente um considerável volume de concreto aproximado de $2,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (em ordem de grandeza equivale a 31 estádios Maracanã - REVISTA FURNAS, Nº 326, 2006). Na Tabela 5.1, constam os quantitativos principais de serviços das obras civis.

Tabela 5.1. Aproveitamento Hidrelétrico (UHE) Jirau – Quantitativos principais de serviços das obras civis (FURNAS *et al.* 2004)

Discriminação	Un.	Quantidade
Escavação comum a céu aberto	m ³	23.655.357
Escavação em rocha a céu aberto	m ³	35.804.642
Escavação em rocha subaquática	m ³	1.886.907
Limpeza de fundação	m ²	207.035
Cimento	t	744.139
Concreto rolado (CCR)	m ³	136.560
Concreto de regularização da fundação	m ³	59.351
Concreto convencional	m ³	2.431.526
Concreto projetado (espessura de cinco cm)	m ³	111.435
Armadura	t	145.892
Solo lançado / compactado	m ³	6.630.615
Transição lançada / compactado	m ³	270.810
Rip Rap	m ³	110.600

5.3.2. Geologia do AHE Jirau

Conforme a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – (CPRM 2005), a coluna lito-estratigráfica proposta para a área, que se estende cerca de 10 km a jusante da região da Cachoeira do Jirau até a Vila de Abunã, correspondente à área de estudos do projeto do AHE Jirau, em síntese, consta dos seguintes grandes conjuntos litológicos:

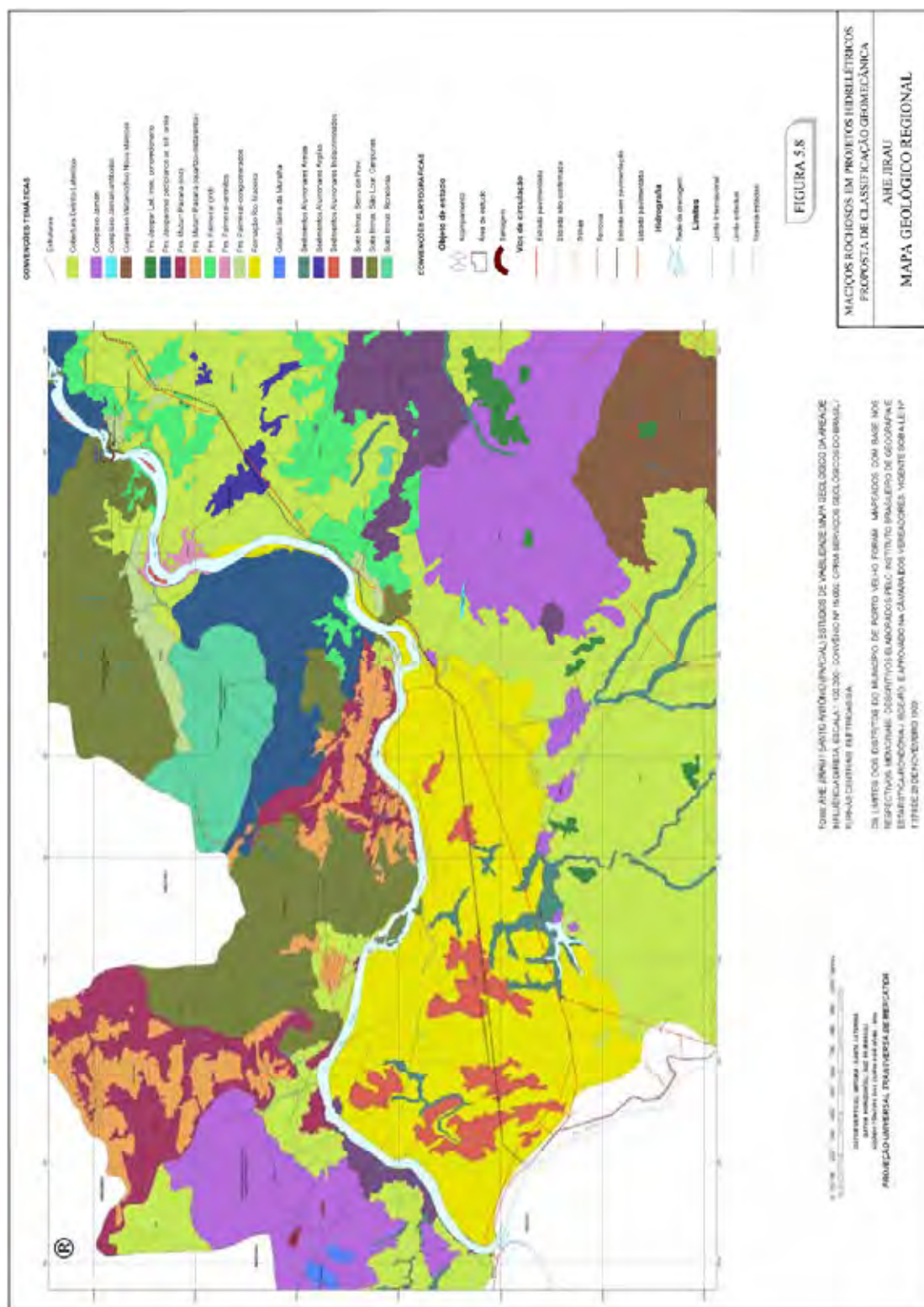
- Unidade inferior, de idade Estateriana, compreendendo o embasamento cristalino representado pelo Complexo Jamari; uma seqüência supracrustal, a Formação Mutum - Paraná, bem como seus respectivos correspondentes gerados por metamorfismo de contato, devido à ação térmica induzida pela intrusão dos *Younger Granites de Rondônia*; o corpo granito Serra da Muralha, distribui-se num único stock no extremo noroeste da área de influência indireta (AII), ocorrendo na serra homônima;
- Unidades Proterozóicas inferiores, representadas pela Suíte intrusiva Serra da Providência, com a marcante presença dos granitos rapakivi (BETTENCOURT *et al.* 1997a); Suíte Metamórfica Nova Mamoré, uma associação de rochas polideformadas, gnaissificadas e migmatitizadas que ocorrem bem expostas na região central de Rondônia, e a Suíte São Lourenço-Caripunas, esta caracterizada pela presença considerável de granitos, e riolitos, estes notadamente na região da cachoeira do Jirau;

- Unidades de idade Neoproterozóico da Formação Palmeiral, que incluem conglomerados e arenitos de plataforma continental e a Suíte intrusiva Rondônia (*Younger Granites de Rondônia*), com vários complexos graníticos mineralizados situados principalmente na porção centro-oriental do estado de Rondônia;

- Unidades Cenozóicas que incluem a Formação Rio Madeira, com depósitos essencialmente fluviais inconsolidados a semi-consolidados, parcialmente ferruginizados; a Formação Jaciparaná representada por lateritos imaturos concessionários, lateritos imaturos mosqueados, terraços, pediplanos de areias, siltes e argilas; Cobertura Detrito-Laterítica, sedimentos detrito-lateríticos situada preferencialmente no vale do rio Madeira; os sedimentos aluvionares indiscriminados, argilosos e arenosos recentes, que ocorrem nas margens e fundos das drenagens. A coluna lito-estratigráfica regional consta na Figura 5.7, e o Mapa geológico regional na Figura 5.8.

Coluna Lito-Estratigráfica Regional	
Cenozóico	Sedimentos arenosos recentes
	Sedimentos argilosos
	Sedimentos aluvionares indiscriminados
	Cobertura Detrito-Laterítica – Horizonte concrecionado na base, lateritos imaturos, solo mosqueado, depósitos colúvio-aluvionares areno-argilosos em extensas áreas aplainadas.
	Formação Jaci-Paraná – Pediplanos com argilas, siltes e areia
	Formação Jaci-Paraná – Lateritos imaturos concrecionados
	Formação Rio Madeira – Sedimentos inconsolidados parcialmente consolidados ferruginizados, cascalhos areias, argilas, diques marginais.
Neoproterozóico	Formação Palmeiral (ind.) – Quartzito-arenito, intercalações arenitos e conglomerados
	Formação Palmeiral – Arenitos arcoaisanos
	Formação Palmeiral – Conglomerados
	Suíte Intrusiva Rondônia- Granitos e rochas afins mineralizadas
Proterozóico	Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas- Granitos Rapakivi, granitos pórfiros subvulcânicos (riolitos), aplitos e quartzito-sienitos
	Complexo Metamórfico Nova-Mamoré- Gnaisses, migmatitos, granitos e anfibolitos
	Suíte Serra da Providência – Granitos Rapakivi
	Granito Serra da Muralha
Pré-Cambriano médio a superior	Formação Mutum-Paraná (ind)– Quartzitos, quartzito-metarenitos, filitos
	Formação Mutum-Paraná – Metaturfos e metacherts
	Complexo Jamari – Anfibolitos e Monzogranitos
	Complexo Jamari – Tonalitos e Quartzito dioritos (Embasamento Cristalino)

Figura 5.7. AHE Jirau: Coluna lito-estratigráfica regional.



Quanto à Geologia local do AHE Jirau, a área de estudo, na região da Cachoeira do Jirau, em síntese, consta dos seguintes grandes conjuntos litológicos da base para o topo: Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas, Formação Palmeiral e Cobertura Cenozóica:

- Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas

Os principais afloramentos distribuem-se ao longo das cachoeiras do Jirau e do Paredão e adjacências. Na cachoeira do Jirau (CPRM, 2005), as rochas aflorantes foram denominadas genericamente de granitos pórfiros. Apresentam textura granular porfirítica, representada por pórfiros de feldspato alcalino e quartzo hexagonal dispersos em matriz fanerítica fina constituída por agregado microcristalino de quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e biotita. Os pórfiros de feldspato alcalino, por vezes, apresentam-se manteados por fina auréola de plagioclásio evidenciando a textura rapakivi (BETTENCOURT *et al.* 1997, 1999).

Conforme Furnas *et al.* (2004), os levantamentos e prospecções de campo para estudos de inventário e viabilidade do AHE Jirau caracterizaram os litotipos na região de implantação das obras civis situados na região da cachoeira e margens do rio Madeira de riolito pórfiro, com composição mineralógica estimada, conforme mostrado na Figura 5.9.

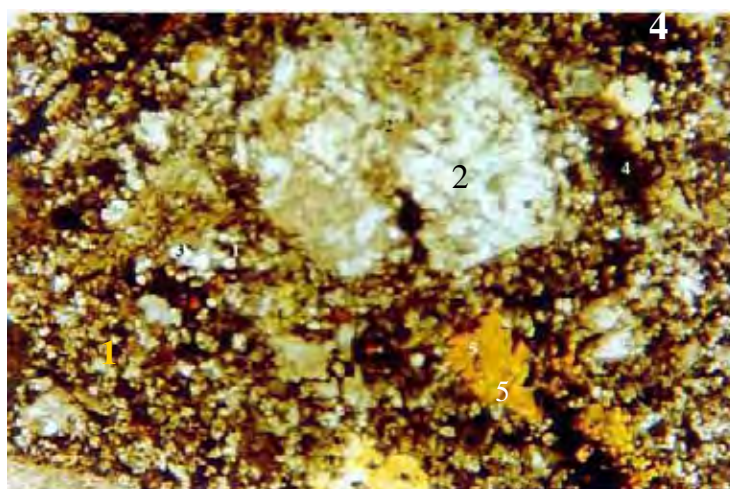


Figura 5.9. Amostra SR-296 (profundidade: 10,36-10,52m). Fotomicrografia da lâmina. Matriz (1); Feldspato (2); Quartzo (3); Opaco (4); e Piroxênio (5). Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados. Aumento de 25x. Classificação: Riolito porfirítico. Referência (Registro: 4.0133.2004 / Departamento de Controle Técnico (DCT.C) - FURNAS *et al.* 2004).

Em termos texturais e mineralógicos, as rochas são tipicamente graníticas, similares a grande maioria dos batólitos e stocks de Rondônia. Intercrescimentos micrográficos de

quartzo e K-feldspato são comuns no granito associados com níveis de quartzo, os quais refletem um significativo resfriamento rápido do magma, em níveis crustais rasos.

O maciço rochoso do Jirau situa-se na borda do corpo intrusivo de magma tipicamente ácido, que o caracteriza em sua gênese petrográfica de rocha subvulcânica. A variação faciológica dos tipos de granitos da Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas se deve ao fato de que a suíte é polifásica constituída por granitos pórfiros de matriz fina (tipo maciço do Jirau) marginais ao corpo principal de monzogranito porfirítico (tipo São Lourenço), ambos constituintes de um complexo subvulcânico que se cristalizou em estágios sucessivos nos níveis mais elevados da crosta.

A coloração avermelhada da rocha pode ser devida à ampla distribuição dos opacos, tanto em pequenos cristais, quanto sob a forma de uma poeira muito fina (avermelhada em luz natural do microscópio), que a diferencia a olho nu em muito dos granitos da região, a exemplo do batólito de Santo Antônio (CPRM, 2005). Pequena proporção de material vítreo ocorre em interstícios na matriz felsítica. A amostra é praticamente holocristalina, já que a quantidade de material vítreo é muito pequena. Desta forma, para fins de engenharia, a equipe de campo de Furnas optou em denominá-lo indistintamente de riolito.

- Formação Palmeiral

As rochas sedimentares tipo arenitos e conglomerados da Formação Palmeiral encontram-se próximas à cachoeira do Jirau, na forma de mesetas, representando apenas restos dessa unidade sobrepostos aos litotipos da Suíte São Lourenço-Caripunas, em particular os riolitos.

Os conglomerados são do tipo oligomíticos, maciços, constituídos, essencialmente, de seixos e calhaus arredondados, ovalados e achatados, predominantemente de quartzo-arenito, quartzito, quartzo leitoso e raramente de sílex e granito pórfiro. A matriz é bastante endurecida e composta por areia mal selecionada e imatura, além de grânulos de quartzo. Os seixos ocorrem geralmente estratificados e imbricados (BAHIA, 1997). Com a desagregação do pacote conglomerático são formados depósitos de encostas constituídos pelos seixos e calhaus que servem de material para revestimento de estradas mostrados na Figura 5.10 (CPRM, 2005).

Na parte superior do pacote sedimentar e, por vezes interdigitados, ocorrem arenitos arcóseos de granulometria fina a média, subordinadamente frações grossas, com grau de seleção moderado a bem selecionados. No leito do rio Madeira, da cachoeira do Jirau com

extensão para montante até a Vila do Palmeiral (30 km), ocorrem diversos afloramentos do arenito arcossiano, apresentando estruturas do tipo estratificação cruzada acanalada, estratificação cruzada tabular, estratificação cruzada sigmoidal e arenito maciço (Figura 5.11).

Conforme (CPRM, 2005), os processos intempéricos e erosivos nos arenitos da Formação Palmeiral desagregaram quase que totalmente essas rochas, visto na região de relevo peneplanizado, entre Campo Lima e Jirau, pela BR-364, onde restam apenas pequenas colinas sustentadas por arenitos e lentes interdigitadas de conglomerados. Como resultado desse processo, formou-se uma camada arenosa, friável, com pouca ou nenhuma cobertura vegetal.



Figura 5.10. Características mesoscópicas dos conglomerados da Formação Palmeiral. Fonte: CPRM, 2005.



Figura 5.11. Arenito arcossiano com estratificação cruzada planar. Fonte: CPRM, 2005.

- Cobertura Cenozóica

Incluem-se a Formação Jaciparaná, a Cobertura detrítico-laterítica e os Sedimentos aluvionares arenosos e indiscriminados.

A Formação Jaciparaná é constituída de sedimentos inconsolidados ocorrentes nas áreas topograficamente arrasadas nas margens do rio Madeira, imediatamente a jusante da cachoeira do Jirau, predominando os depósitos colúvio-aluvionares dos processos erosivos e deposicionais, depósitos de areia pouco espessos, com níveis conglomeráticos na parte basal do pacote, característicos de paleomeandros.

Sedimentos que compõem a Cobertura detrítico-laterítica constituem-se, em grande parte, de depósitos colúvio-aluvionares areno-argilosos com níveis nodulares lateríticos e recobertos por grânulos e seixos de laterito desagregado. Na base, são constituídos por seixos provenientes dos próprios lateritos concrecionados e no topo, por material argiloso proveniente do horizonte mosqueado. Os lateritos imaturos, quando desagregados, também

passam a constituir parte das coberturas detrítico-lateríticas, modelando grande parte do relevo atual (CPRM, 2005).

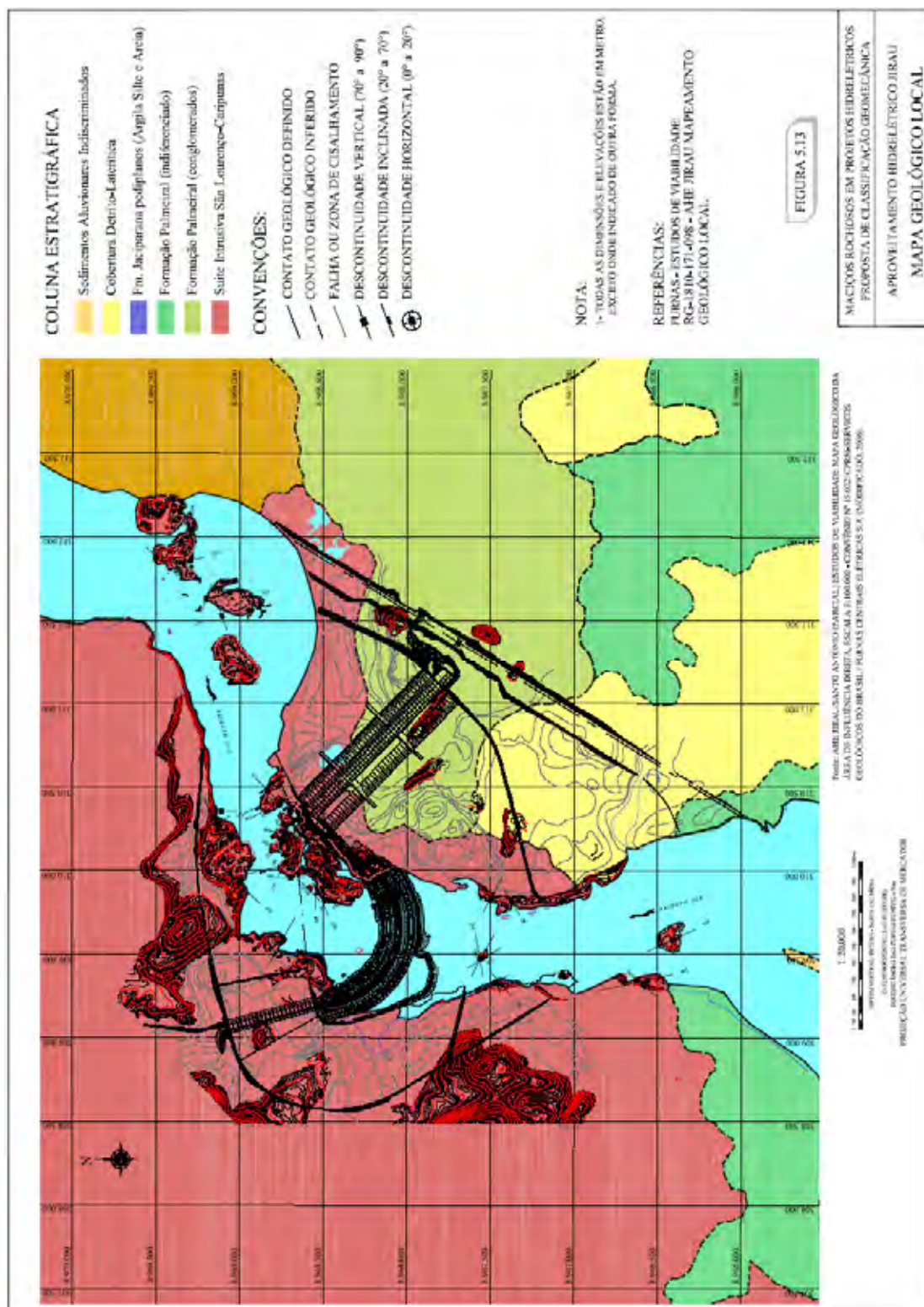
Os sedimentos aluvionares arenosos e indiscriminados ocupam porções localizadas margeando o rio, somente visto no período de estiagem. Os sedimentos indiscriminados têm papel importante na acresção das ilhas e formação de barras de areia que alteram o curso do rio. Trata-se de sedimentos arenosos em geral misturados das frações siltsas e argilosas, de coloração cinza com tonalidade levemente amarelada e acinzentada, com ocorrência expressiva a montante da cachoeira do Jirau.

O corpo riolítico aflora em área da ordem de 3,5 km², no leito e margens do rio Madeira, e se estende por alguns quilômetros ao longo do rio, sobretudo na margem esquerda. Ocorre nas elevações com blocos e alguns afloramentos, parcialmente recoberto por restos de conglomerados da Formação Palmeiral. Os afloramentos são mais expressivos nos leitos das drenagens mais profundas, sendo comum a presença de blocos e cascalho de granulometria graúda.

A cerca de 3 km a montante da cachoeira do Jirau, nas margens e ilhas do rio Madeira, ocorrem arenitos arcossianos, arenito-conglomerático e conglomerados médio e grosso da formação Palmeiral, sobre os riolitos da Suíte São Lourenço-Caripunas (Figura 5.12); na margem direita, sondagens rotativas detectaram conglomerado grosseiro e no leito da estrada de acesso, a cerca de 4 km do eixo, ocorre afloramento de arenito com presença de estratificação cruzada. Na Figura 5.13 consta o Mapa geológico local.



Figura 5.12. Arenito arcossiano e arenito-conglomerático da Formação Palmeiral, na margem direita do rio Madeira, cerca de 3 km a montante da cachoeira do Jirau.



Eventos tectônicos regionais associados a alívio de tensão, processos intempéricos e erosivos ocasionaram o surgimento de descontinuidades marcantes na região da cachoeira do Jirau, conforme mostrado na Figura 5.14.



Figura 5.14. Descontinuidade no riolito, na margem esquerda do rio Madeira, imediatamente a jusante da cachoeira do Jirau, região do canal de restituição do vertedouro.

Destacam-se três famílias principais de descontinuidades com ampla exposição no período de estiagem ao longo dos afloramentos no leito e margens do rio Madeira, região da cachoeira do Jirau:

- Família NW-SE de elevado mergulho, responsável pelo alinhamento da calha do rio, na região da Cachoeira do Jirau e imediatamente a montante desta. É de grande persistência, com alinhamento regional, abrange toda área de detalhe mapeada. A direção do plano predominante é de $N30^{\circ}W$, com mergulho subvertical, 70° - 90° NE (ou) SW. As atitudes medidas no campo foram tratadas estatisticamente em sistema de projeção estereográfica: Estereograma Rocscience. Dips v5. 103 – LzO, estando apresentado nas Figuras 5.15, 5.16, respectivamente, o contorno dos pólos dos planos, o diagrama de roseta da direção dos planos e na Figura 5.17 amostra da família de descontinuidades com direção NW-SE.

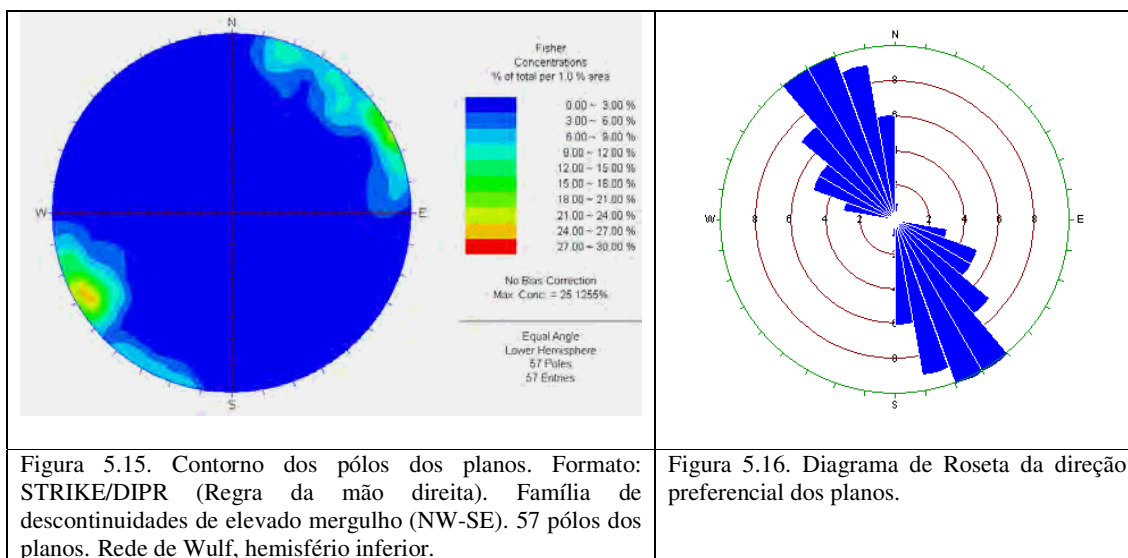


Figura 5.17. Família NW-SE: Descontinuidades persistentes, com deslocamento de blocos na superfície. Atitude $N35^{\circ}W/80^{\circ}NE$. As setas indicam as direções dos planos.

- Família NE-SW de elevado mergulho, que intercepta a família NW-SE em média a 75° , portanto, praticamente ortogonal, cuja direção do plano predominante é de $N40^{\circ}E$ e mergulho sub-vertical, ($85^{\circ}-90^{\circ}NE-SW$), inclinado tanto para NW quanto para SE. Ocorre em toda área mapeada, tanto a montante como a jusante. A jusante da cachoeira do Jirau é responsável pelo alinhamento da calha do rio Madeira, certamente a família mais importante do maciço. É de grande persistência, com características geomecânicas similares às da família NW-SE.

Nas Figuras 5.18, 5.19 são apresentados o contorno dos pólos dos planos e o diagrama de roseta da direção dos planos, e na Figura 5.19 a família NE-SW, de elevado mergulho.

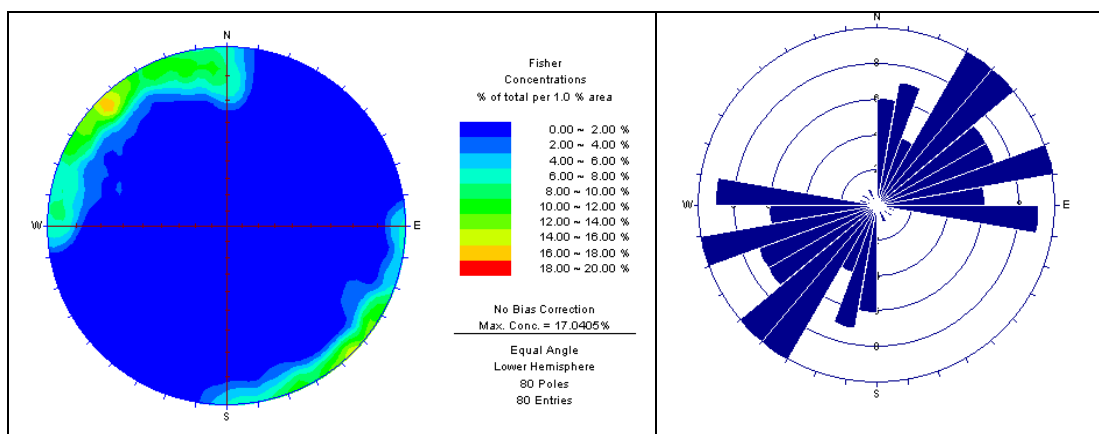


Figura 5.18. Contorno dos pólos dos planos. Formato: STRIKE/DIPR (Regra da mão direita). Família de descontinuidades de elevado mergulho (NE-SW). 80 pólos dos planos. Rede de Wulf, hemisfério inferior.

Figura 5.19. Diagrama de Roseta das direções preferencial dos planos.



Figura 5.20. Família NE-SW: Fraturas sub-paralelas, sub-verticais, com atitude $N 45^{\circ} E / 88^{\circ} SE$. O plano superior é a lapa de descontinuidade sub-horizontal. A seta indica a direção do plano.

- Família sub-horizontal, que ocorre de forma generalizada em toda área mapeada, sendo a principal responsável pelo contorno superior dos macro-afloramentos (ilhas), Figuras 5.21 e 5.22. As descontinuidades apresentam planos ondulados, subparalelos e espaçados em geral entre 0,5 e 2,0 m. As atitudes dos planos são muito variadas em decorrência da ondulação da

lapa. A profundidade de ocorrência das discontinuidades observada nos taludes naturais e nas sondagens, é inferior a 15,0 m, apresentando-se parcialmente abertas nos primeiros metros e fechadas a maior profundidade.

O deslocamento de grandes blocos está em geral associado à presença das três famílias no mesmo afloramento. É muito comum a exposição de planos sub-horizontais escalonados e subparalelos, com traços em superfície, das famílias NW-SE e NE-SW, caracterizados pela presença de blocos de grande dimensão, isolados e de formas cilíndricas.



Figura 5.21. Família sub-horizontal - Subparalelo, superfície irregular, ondulada, lapa de uma sub-horizontal, espaçadas de 1 a 2 m.



Figura 5.22. Família sub-horizontal com fratura aberta, associado aos outros sistemas ortogonais, na margem direita à jusante da Casa de Força.

Outras famílias de discontinuidades ocorrem em áreas localizadas, com menor incidência no maciço rochoso do Jirau. Destacam-se as seguintes:

- **Inclinada, de baixo a médio mergulho:** fraturas sub-paralelas, com atitude predominante direção N40°E e mergulho 30°SE, constituindo um pacote de rocha, mergulhando para a margem direita, mapeado na grande ilha lateral à Cachoeira do Jirau, junto à margem direita e também na margem esquerda imediatamente a jusante da cachoeira. Descontinuidades com atitude N45°-55°W/25°-40°NE ocorrem aleatoriamente e com menor incidência. Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25, são apresentados, respectivamente, o contorno dos pólos dos planos, o diagrama de roseta da direção dos planos e exposição da família de baixo mergulho;
- **Sub-Verticais Aleatórias:** são comuns discontinuidades de menor persistência que as das famílias NW-SE e NE-SW, apresentando direções intermediárias, predominando as atitudes N-S com mergulho SV ligeiramente inclinados para E ou W e N65° - 87° W/85°SW.

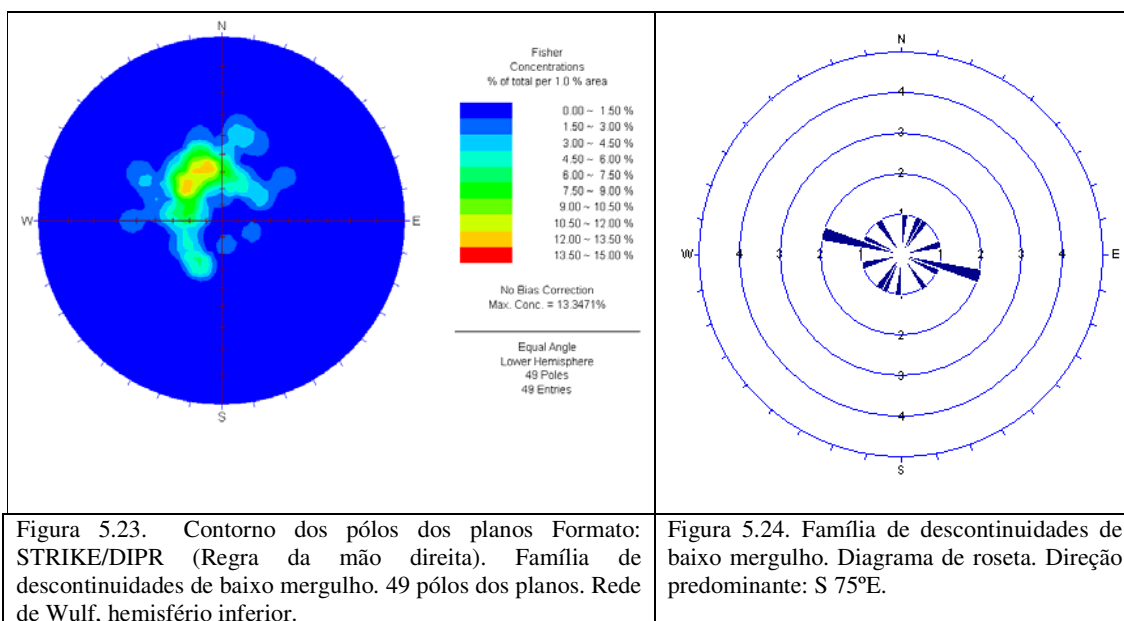


Figura 5.25. Fraturas Inclínadas de baixo mergulho. Família de descontinuidades sub-horizontais, inclinadas para a margem direita, aberto em superfície, com espaçamento de 0,50 a 2 m, atitude N50°E/30° SE.

Nas Figuras 5.26, 5.27 e 5.28, respectivamente, são apresentados o contorno dos pólos dos planos, o diagrama de roseta da direção dos planos, e indicação de descontinuidades do maciço rochoso do Jirau.

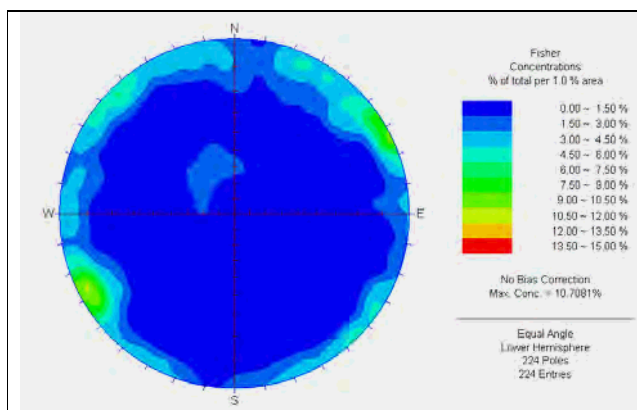


Figura 5.26. Contorno dos pólos dos planos. Formato: STRIKE/DIPR (Regra da mão direita). Geral das famílias. 224 pólos dos planos. Rede de Wulf, hemisfério inferior.

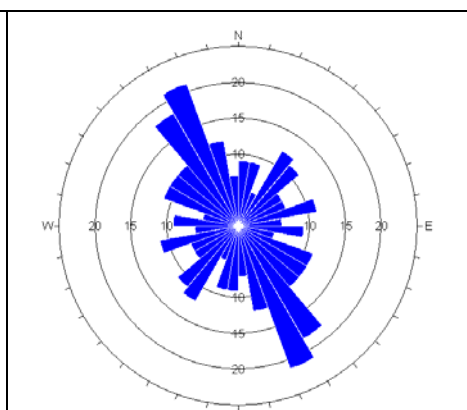


Figura 5.27. Diagrama de Roseta – direção preferencial dos planos. Geral das famílias.



Figura 5.28. Vista geral das famílias de descontinuidades em uma única tomada, na área da barragem de concreto. As setas indicam as direções dos planos.

5.4. UHE Serra do Facão

5.4.1. Características gerais

A UHE Serra do Facão, conforme mostrada no Arranjo das obras civis (Figura 5.29), encontra-se em construção (setembro/2008) com cerca de 45% das obras civis executadas, apresenta as seguintes características:

- Casa de Força fechada, com potência instalada de 212,58 MW, queda bruta de 80,19 m, (disponível entre o nível d'água máximo normal do reservatório e o nível de água normal do Canal de Fuga), com duas unidades geradoras tipo Francis de 106,29 MW, com energia assegurada de 182,4MW (Figura 5.30);

- Vertedouro (Figura 5.31) com descarga mínima projetada de 2.683 m³/s, com os níveis d'água característicos do reservatório a ser criado pela barragem: NA máximo normal (El. 756,00 m e NA mínimo operacional (El 732,50 m);
- Tomada D'água e Vertedouro implantados sobre uma Barragem de concreto rolado (CCR), tendo essas estruturas de concreto, incluindo o muro de encontro com a Barragem de enrocamento, extensão de 287,50 m e altura máxima de 90m;
- Barragens de enrocamento com núcleo argiloso interligadas à Barragem de CCR nas ombreiras direita e esquerda, com comprimento de 300,00 m e 109,00 m, alturas máximas de 90,0 e 40,0 m, respectivamente (Figuras 5.32 e 5.33). O comprimento total da barragem é de 696,50 m.

De acordo com o projeto (CNEC, 2002), o Reservatório (lago) inundará uma área de 232,37 km² no (NA Máximo maximum: elevação 756,98), o que corresponde a uma relação área/potência instalada de 1,09 km² / MW.

A obra foi objeto de mudanças significativas no projeto executivo, com aumento das escavações obrigatórias nas fundações da barragem principal e em pedreira e substituição de cinco blocos de concreto compactado com rolo (CCR), por barragem de enrocamento com núcleo argiloso. Em decorrência da indisponibilidade atual dos novos volumes, incluiu-se as quantidades do projeto básico consolidado (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. UHE Serra do Facão – Síntese de quantidades das obras civis (modificada de CNEC, 2002)

Discriminação	Quantidade (m ³)	Discriminação	Quantidade (m ³)
Escavação em solo:		Aterro compactado:	
Comum	568.132	Solo	124.223
Jazida	101.000	Enrocamento	625.720
Remoção de ensecadeira	52.044	Transições	24.800
Total (em solo)	721.176	Total	774.743
Escavação em rocha:		Concreto:	
Obrigatória a céu aberto	499.602	Estrutural	100.535
Subterrânea	41.736	Compactado com rolo	565.440
Pedreira	750.000	Total	665.975
Total (em rocha)	1.291.338	Referência: Projeto básico consolidado	

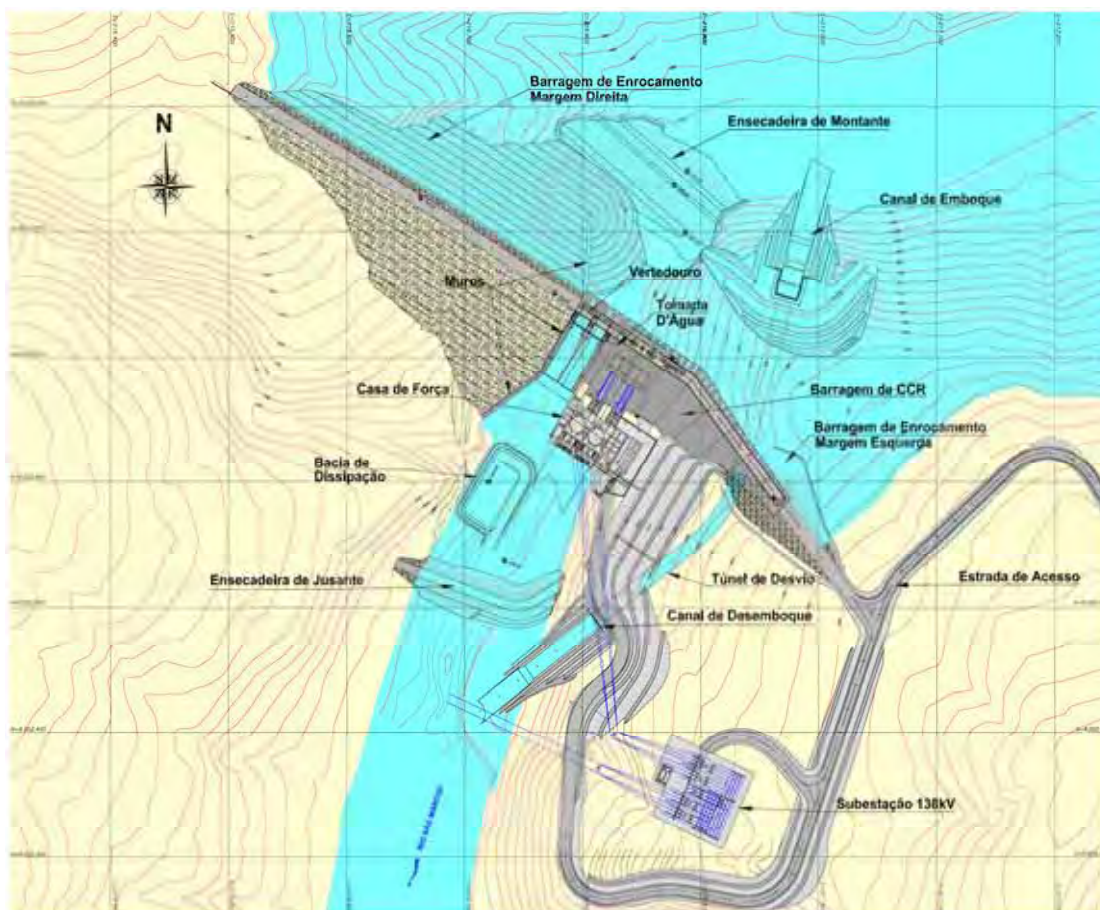


Figura 5.29. UHE Serra do Facão: Arranjo das obras civis - planta.

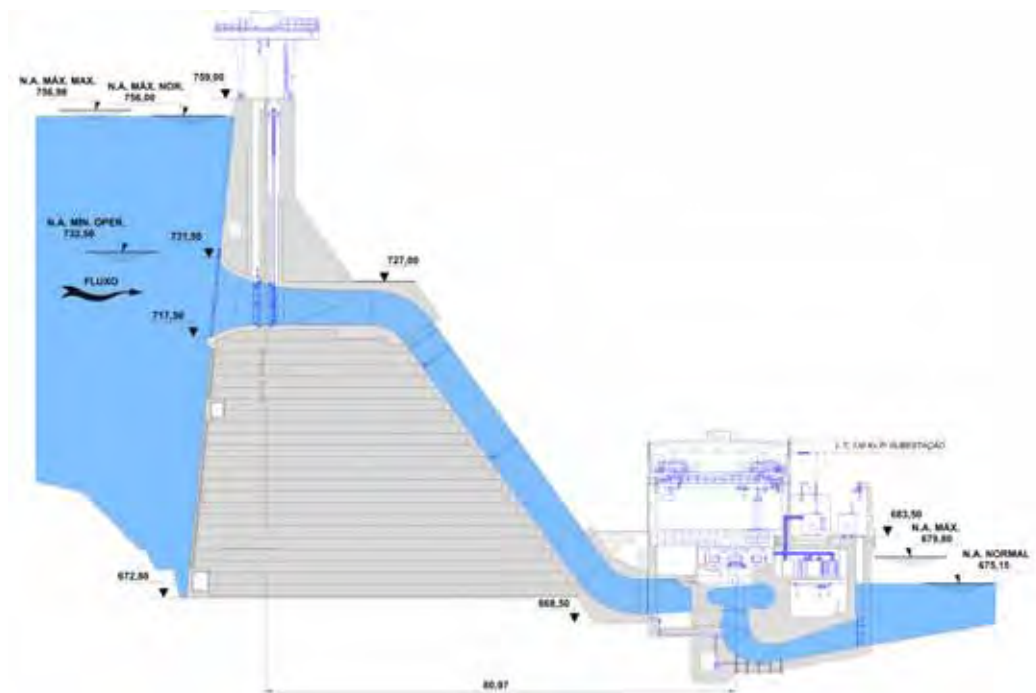


Figura 5.30. UHE Serra do Facão: Tomada d'água e Casa de força – circuito hidráulico, corte transversal.

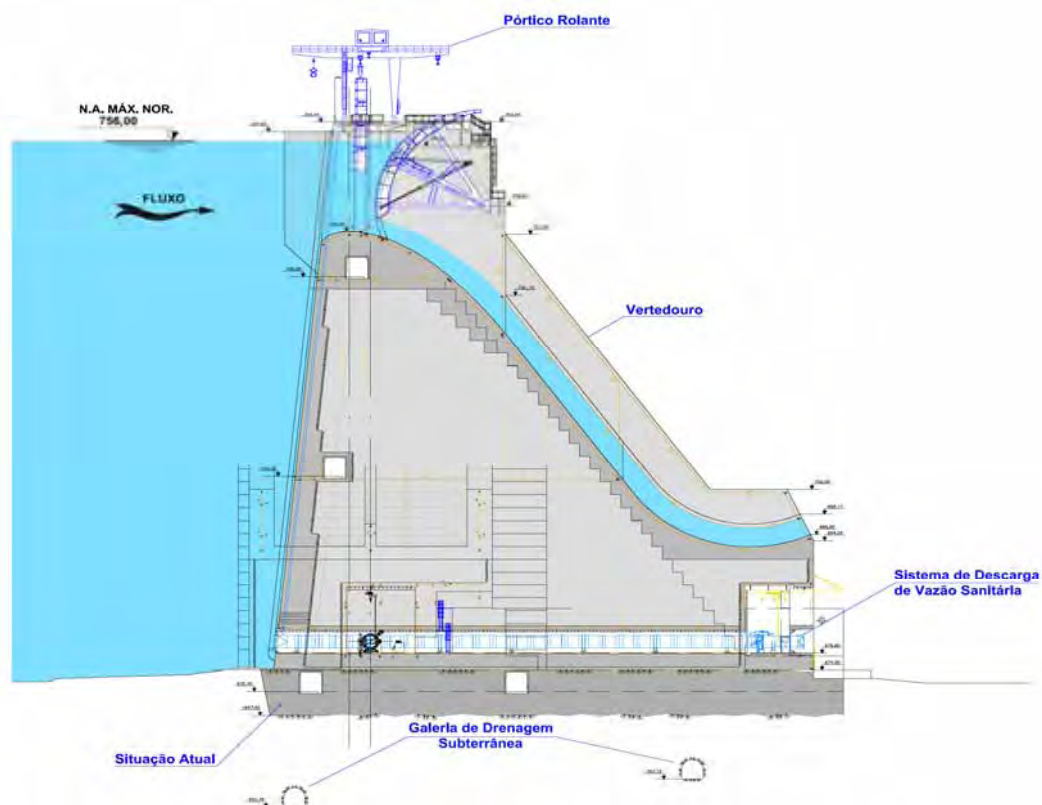


Figura 5.31. UHE Serra do Facão: Vertedouro, implantado sobre a barragem de CCR, corte transversal.

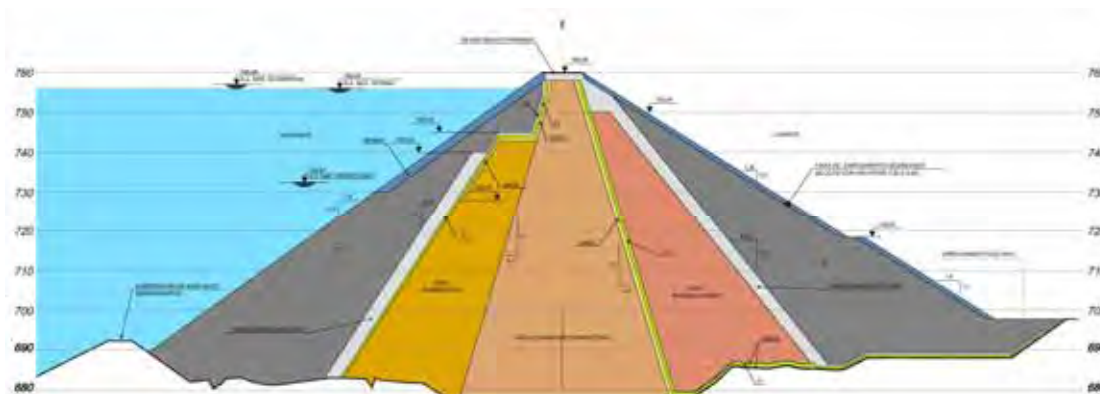


Figura 5.32. UHE Serra do Facão: Barragem margem direita – seção transversal Est. 14+00

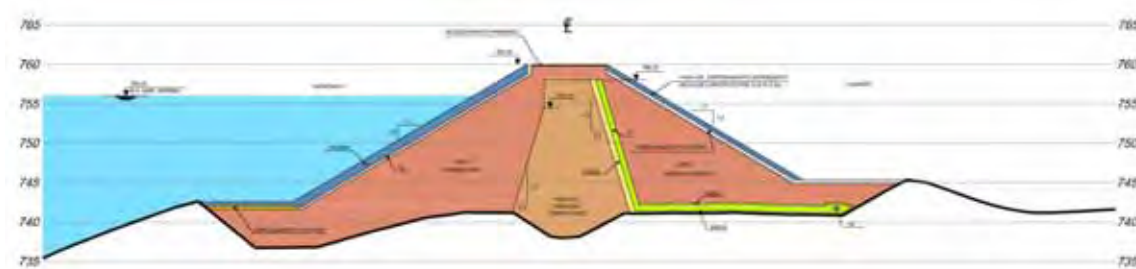


Figura 5.33. UHE Serra do Facão: Barragem margem direita – seção transversal Est. 8+00

5.4.2. Geologia da UHE Serra do Facão

A UHE Serra do Facão, incluindo o reservatório, está sendo implantada sobre rochas metamórficas Meso a NeoProterozóicas, pertencentes aos Grupos Araxá, Canastra e Ibiá, representadas por metamorfitos diversos, mostrados no mapa da Figura 5.34.

A área de geologia regional corresponde à de influência direta do empreendimento, incluída na presente tese, tem largura de cerca de 2 km ao redor do futuro reservatório, no trecho que se estende, respectivamente, 3 e 27 km a jusante e a montante do eixo da barragem.

As discussões sobre a geologia regional da área de interesse da UHE Serra do Facão reportam que, historicamente, o Grupo Araxá foi considerado como uma seqüência de xistos e quartzitos de médio grau de metamorfismo e idade do Proterozóico Médio, que estaria desvinculada da Formação Ibiá e do Grupo Canastra (BARBOSA, 1955 e ALMEIDA, 1967 apud SEER, 1995).

Os principais tipos litológicos aflorantes na região do Grupo Araxá incluem:

muscovita-xisto, muscovita-quartzo-xisto e bandas de quartzito (topo); biotita-gnaiss miloníticos; biotita-muscovita-xisto e muscovita-quartzo-xisto; biotita-gnaiss, quartzitos e milonitos (base), sendo que a seqüência basal do Grupo Araxá se situa acima da zona de cisalhamento que o justapõe à Formação Ibiá, compreendendo uma unidade com quartzitos e de milonitos, numa faixa mapeada de 3 a 4 km de largura, orientada segundo WNW-ESE.

Os milonitos são rochas de coloração cinza-clara, granulação fina a média, com ocorrência de certo bandamento composicional, intercalando lâminas de milonito fino rico em sericita e biotita e bandas ricas em quartzo, sendo os quartzitos rochas de coloração creme a branca, de textura desde grossa a fina, levemente micáceos e feldspáticos e em geral compactos.

Os biotita-gnaisses que se sobrepõem às rochas anteriores ocorrem em faixa subparalela à primeira com largura mapeada de 2 a 3 km. Encontram-se bem expostos nos cortes próximos da ponte sobre o rio São Marcos, margem direita, na rodovia GO-206.

Os xistos são constituídos essencialmente por muscovita e quartzo, sendo a biotita subordinada à primeira. São rochas de coloração rosada quando alteradas, formando um solo essencialmente silto-arenoso micáceo. A rocha menos alterada apresenta coloração cinza-esverdeada. Finalmente, a faixa de gnaisses de sul orienta-se, segundo WNW-ESSE, aflorando de maneira mais intensa em alguns pontos. São biotita-gnaisses a muscovita-biotita-gnaisses, que se caracterizam por preservarem sob a forma de blocos e lajes isolados em meio ao solo, diferentemente dos anteriores.

A Formação Ibiá tem como rocha típica filito, de cor cinza-esverdeada a cinza-rosado, quando são e mais alterado, respectivamente; subordinada ocorrem quartzitos, sob a forma de lentes ou como bandas mais ricas, em bancos de 1 a 2 m de espessura.

O Grupo Canastra corresponde a uma seqüência rítmica que intercala bancos centimétricos de quartzitos impuros e de muscovita-quartzo-filitos, o que permite diferenciá-los da Formação Ibiá. Intercalações métricas de quartzito, com cerca de 5 m de espessura, podem ocorrer ocasionalmente. De forma similar, podem ocorrer bandas espessas de metassedimentos finos onde há apenas filitos cinza-prateados microdobrados.

Dois corpos de granito foram mapeados, o primeiro na área sul junto à GO-210, logo após a ponte sobre o rio São Marcos, em direção a Davinópolis e nas proximidades de Pires Belo. Fazem parte de uma suíte ígnea que, a grosso modo, é constituída por granitos com idades entre 1,77 a 1,58 bilhões de anos (GA), granitos sin-colisionais de 0,8 a 0,7 GA,

metatonalitos e metadioritos (ao redor de 0,9 a 0,63 GA) e uma suíte pós-orogênica bimodal com idades entre 0,59 e 0,48GA.

O Granito Pires Belo é um biotita-granito, cinza-claro, leucocrático, inequigranular de granulação grossa, com texturas ígneas preservadas, além de alteração hidrotermal e uma completa ausência de texturas metamórficas ou de deformação. O outro corpo de granito corresponde a um muscovita-granito, branco, hololeucocrático, inequigranular de granulação média a grossa e igualmente isento de foliação, discordante da foliação regional.

A Cobertura Detrito-Laterítica são depósitos continentais, arenosos, avermelhados, ferruginosos, com lentes delgadas de arenitos e conglomerados quartzosos e estratificação horizontal. Nas proximidades da calha do rio São Marcos, está representada por material arenoso, quase sempre capeado por “seixos” lateríticos e quartzosos, separados ou não do material subjacente por linha de seixos, com matriz silto-arenosa, vermelha-escura, com espessura inferior a 2 m.

Quanto à Geologia Local, com base nos documentos de projeto (CNEC, 2002) a área do canteiro de obras da UHE Serra do Facão apresenta uma seqüência de rochas metamórficas do Grupo Araxá, predominantemente, micaxisto feldspático e/ou quartzo-micaxisto feldspático de granulação fina e mais raramente média. Essas rochas apresentam vários graus de alteração, principalmente nos planos de fraturamento e da xistosidade, traduzidos, via regra, por uma sericitização dos grãos dos feldspatos e das biotitas.

A xistosidade e o bandamento concordantes, apresentam atitudes medidas em afloramentos com direções variáveis entre N50°E e N70°W e com mergulhos de 10° a 35° para NW e SW. Essas mudanças de atitudes não são bruscas e indicam a existência de dobramentos na área, comprovados pela ocorrência de inúmeras micro-dobras tanto em afloramentos quanto em testemunhos de sondagens.

Camadas e lentes descontínuas de xisto grafitoso de cor cinza escuro e preto, cujas dimensões em escala de obra refletem uma boa continuidade, ocorrem praticamente em toda área do canteiro. Veios e vênulas de quartzo e/ou quartzo-feldspáticos ocorrem nos contatos e preenchendo fraturas da rocha matriz e às vezes de forma aleatória.

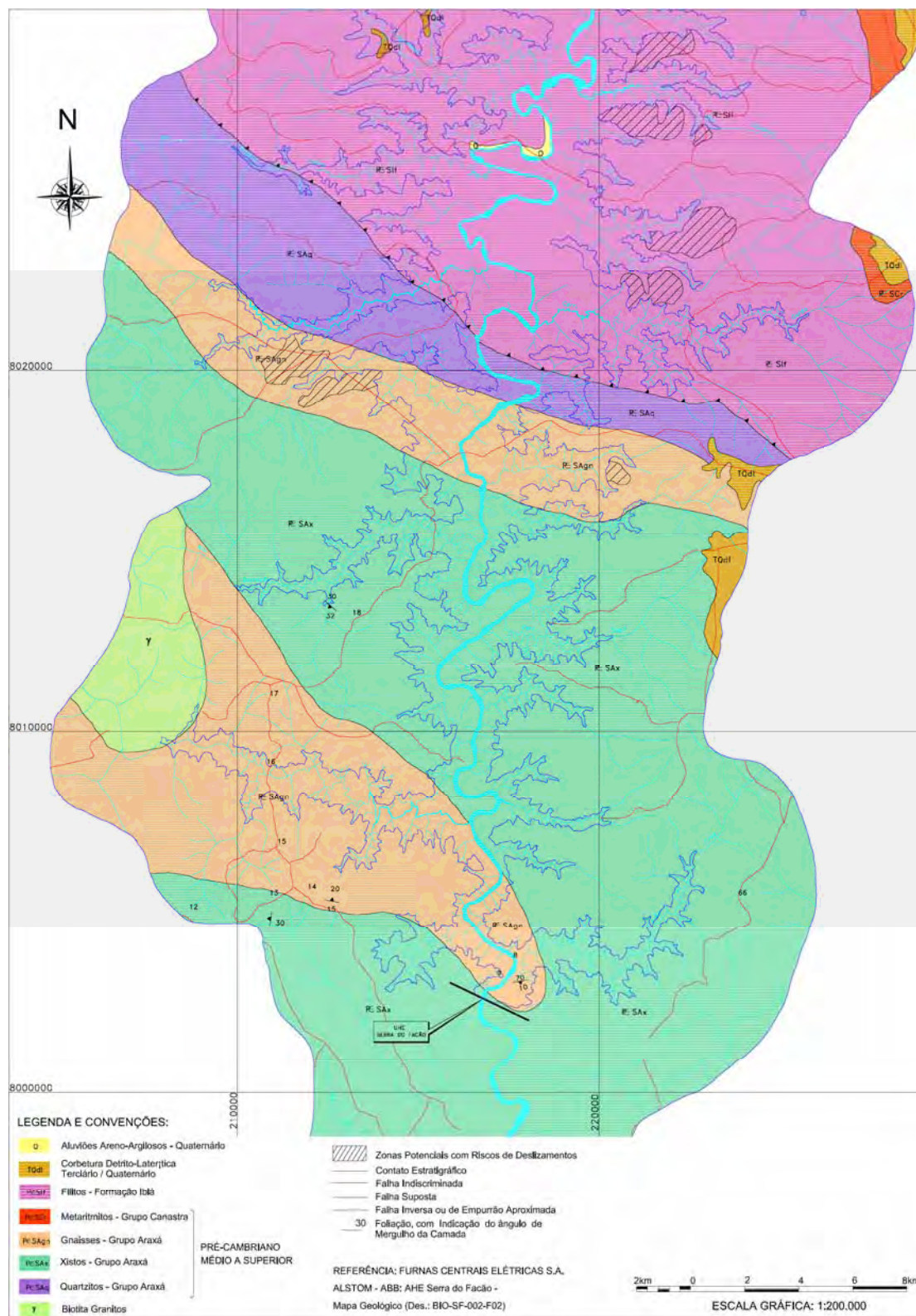


Figura 5.34. UHE Serra do Facão – Mapa geológico regional.

Foram detectados dois corpos de rocha metabásica (anfíbolito) inseridos dentro do maciço de micaxisto; o primeiro na fase dos estudos de inventário na margem direita, a 1 km a jusante do eixo do barramento, com espessura da ordem de 20-30 m e o segundo, já no projeto executivo, 4km à montante, nas proximidades do córrego São João da Cruz, com espessura medida em sondagens da ordem de 50-60 m, com denominação Carneiro Baixo.

Os referidos corpos situados fora dos limites do mapa local estão em exploração: a Pedreira Carneiro Baixo, para uso como agregado de concreto, e a Pedreira Margem Direita, para aplicação na Barragem. O Mapa geológico local consta na Figura 5.35.

Quanto aos aspectos geológico-geotécnicos e estruturais do maciço rochoso, durante o desenvolvimento dos estudos de viabilidade (CNEC, 2002), o maciço rochoso foi compartimentado em quatro unidades ou horizontes geotécnicos (HG), conforme sintetizado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Compartimentação do maciço rochoso fase de projeto básico (CNEC, 2002)

Discriminação	Índices geotécnicos (1)	Condutividade hidráulica (2)	Velocidades sísmicas
HG - I	(A5-A4), (C4-C3), (F5-F4)	(H5-H4)	300m/s a 800m/s
HG - II	(A2-A3), (C2-C3), (F3-F5)	(H3-H4)	800m/s a 1.500m/s
HG - III	(A1-A2), (C1-C2), (F3-F5)	(H2-H3)	1.500m/s a 2.500m/s
HG -IV	(A1), (C1), (F1-F2)	(H1)	maior que 3.000m/s
Obs. (1) Para caracterização ver Tabelas 2-1, 2-2 e 2-3. (2) Tabela 2-5, sendo H igual a P da referida tabela.			

A partir da exposição do maciço rochoso, com as escavações obrigatórias de fundação na região das estruturas de concreto, notadamente da Casa de Força e Bacia de Dissipação, esta com fundo na elevação 650, foi possível verificar que a compartimentação mencionada não seria a mais adequada, havendo real necessidade de elaboração de modelo geomecânico para cada estrutura, baseado nas classificações geomecânicas tradicionais.

Conforme poderá ser observado nos estereogramas das Figuras 5.36 e 5.37, destacam-se as famílias de descontinuidades com direções NE-SW e NW-SSE de elevado a médio mergulho, e família de baixo mergulho (sub-horizontal) com direção aleatória.

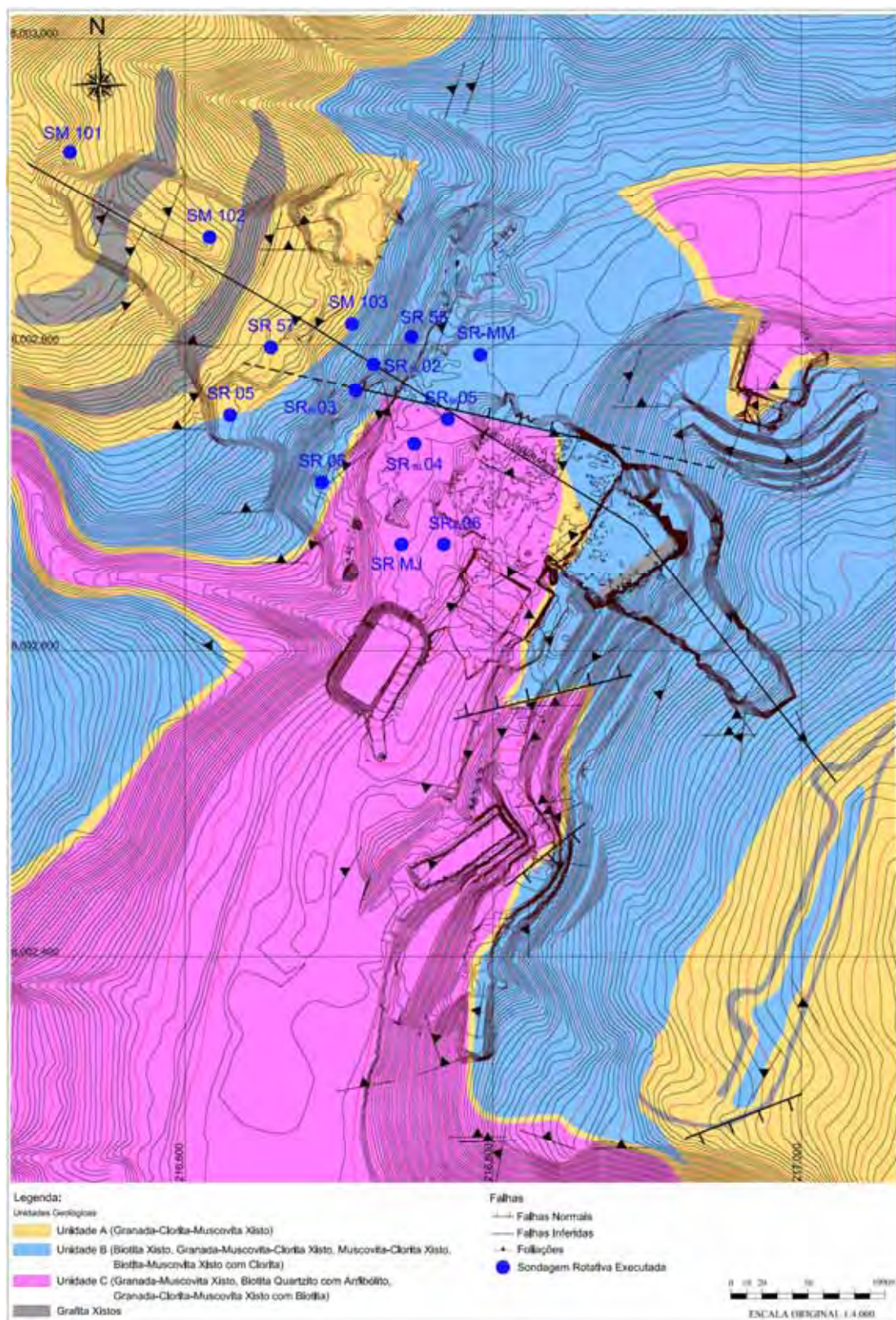
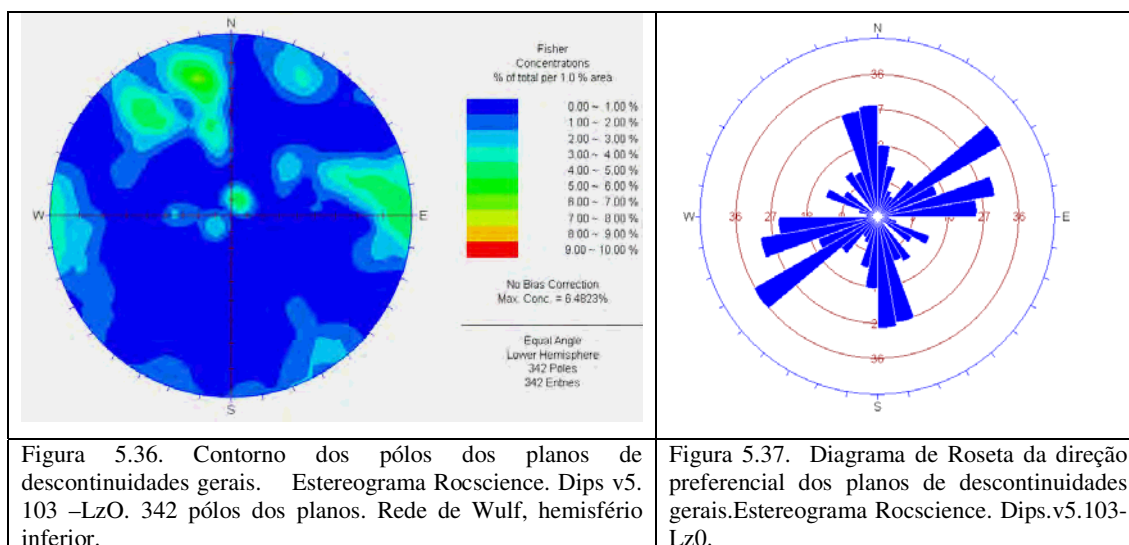


Figura 5.35. UHE Serra do Facão – Mapa geológico local.



As descontinuidades sub-horizontais de acordo com o CNEC (2008), correspondem, respectivamente aos tipos T-1, T-2 e T-3, caracterizadas pelos consultores da obra (BARTON *et al.* 2007), cujas origens podem estar associadas às estruturas herdadas das rochas sedimentares pré-metamorfismo ou, mais provavelmente, às estruturas tectônicas derivadas de boudinagem ou dobramentos. Já no leito do rio, a ocorrência de juntas está mais relacionada ao alívio de tensões devido à erosão; em síntese apresentam as seguintes características:

- Junta tipo T-1, persistência muito grande (Tabela 2.2), plana, regular, lisa, aberta, com preenchimento argiloso maior que 50 mm, com plano alterado e preenchidos com grafita e clorita alteradas;
- Junta tipo T-2, persistência muito grande, plano regular com trecho irregular e ondulado, rugoso/liso, alterado, aberto, com preenchimento misto, de 10 a 50 mm de quartzo e clorita alterados;
- Junta tipo T-3, persistência muito grande, plano regular com trecho ondulado, fechado menor que 1mm, contato rocha a rocha, superfície rugosa, oxidada;

Outras descontinuidades sub-horizontais com características diferenciadas das mencionadas foram mapeadas, a exemplo das ocorrências da região do Muro de encontro da barragem leito do rio, Figura 5.41 (Muro montante) e Figura 6.15 (Muro jusante).

Relativo às descontinuidades de média a elevado mergulho, as Figuras 5.38, 5.39, 5.40 e 6.20 ilustram a forma de ocorrência, tendo sido mapeadas em praticamente toda área de

implantação das obras civis. Na Tabela 6.6, constam as características de algumas dessas descontinuidades.



Figura 5.38. Região dos blocos 8 e 9 da Barragem de concreto – descontinuidades SV, SH e I.



Figura 5.39. Emboque do túnel – descontinuidades predominantes SV e SH..



Figura 5.40. Barragem MD, estaca 14 - 50m/jus. Descontinuidades SH, SV e I (inclinado) de média inclinação.



Figura 5.41. Muro de encontro montante (El. 670,0), parede NW - descontinuidade sub-horizontal.

Capítulo 6

Caracterização de Parâmetros Geomecânicos

- Estudo de Casos

6.1 Análises dos parâmetros classificatórios

Para compor a base estrutural da Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos Proposta (CGM), realizou-se uma avaliação dos parâmetros classificatórios adotados em classificações geomecânicas tradicionais. Nesta tese, a classificação proposta será identificada como CGM.

No Aproveitamento Múltiplo (APM) Manso, implantada em metarenitos conglomeráticos e metassiltitos consistentes do Grupo Cuiabá, o sistema RMR foi adaptado e utilizado no projeto, tendo o índice alteração substituído indiretamente o parâmetro de resistência da rocha intacta. O peso relativo foi dado em intervalos, de forma que as pequenas variações do grau de alteração fossem satisfeitas e correlacionadas com as resistências à compressão simples (FURNAS, 2002).

O grau de coerência de rochas é um parâmetro classificatório atualmente bastante empregado no Brasil, em trabalhos voltados à caracterização geotécnica de materiais rochosos. Essa determinação é feita a partir de avaliação tátil-visual, método este bastante subjetivo, e que fornece apenas uma indicação qualitativa das características do material. Essa condição implica, na prática, pouca utilização dos resultados obtidos, visto que classificações geomecânicas requerem informações mais consistentes sobre o comportamento das rochas frente a possíveis empregos, seja como fundação ou como material de construção (SOARES, 1991).

No Sistema RMR, o espaçamento e o RQD são pontuados indistintamente e ambos são obtidos a partir de medições em testemunhos de sondagem ou determinados no campo, baseados em medições dos espaçamentos entre descontinuidades. Essa aparente duplicidade entre o espaçamento e o RQD foi revista na CGM, incluindo-os como um único parâmetro, com base nas seguintes considerações:

- O espaçamento das descontinuidades (fraturamento) é facilmente determinado em testemunhos de sondagem de rochas consistentes, visto que as fraturas naturais são em geral bastante marcadas, no mínimo pela oxidação da superfície do plano da descontinuidade;
- Tratando-se de rochas brandas, o processo de perfuração de sondagem rotativa ocasiona maior incidência de fraturas mecânicas, decorrente da baixa resistência mecânica e, sobretudo devido à presença de intensa estruturação que comumente se faz presente nessas rochas, facilmente confundíveis com fraturas naturais;
- Para determinação do grau de fraturamento somente são consideradas as fraturas naturais;
- O RQD, originalmente concebido por Deere (1963, 1968), leva em conta todas as fraturas existentes, inclusive as mecânicas, ao longo da manobra;
- Em maciços de rochas consistentes pouco fraturadas, o RQD acompanha o grau de fraturamento, com valor elevado; nesses casos a duplicidade destes pesos do sistema RMR leva a uma penalização da classe geomecânica do maciço;
- Maciços de rochas consistentes medianamente a muito fraturadas, desde que o fraturamento seja regular e com espaçamento maior que 10 cm, o RQD poderá se manter com valor elevado.

Portanto, o índice fraturamento é incontestavelmente aplicado para rochas consistentes e não apresenta qualquer subjetividade e incertezas em sua determinação. Em rochas brandas, o RQD aplicado, conforme originalmente formulado e recomendado pela *Internacional Society of Rock Mechanics* (ISRM 1981), caracteriza com maior exatidão as características geomecânicas desses maciços. Dessa forma, o índice fraturamento foi selecionado como segundo parâmetro da CGM, quando aplicado em rochas consistentes, enquanto que o RQD pode substituí-lo em maciços de baixa consistência (brandos).

A condição das descontinuidades no sistema Q de Barton *et al.* (1974) se constitui o principal parâmetro e, com importância similar no sistema RMR o referido parâmetro tem peso de 30% da pontuação total e ainda é utilizado para ajuste de pontos em função da orientação das descontinuidades. Desta forma foi utilizada como terceiro parâmetro na CGM.

Nos sistemas RMR e Q, a influência da água é pontuada em termos de caudal afluyente e da pressão nas paredes do túnel que possa provocar o arraste dos preenchimentos das fraturas. Na CGM, a influência da água é pontuada em termos de permeabilidade do maciço rochoso, obtida a partir de ensaios de perda de água, de grande relevância em se tratando de barramentos hidrelétricos.

6.2. Escolha da base estrutural da proposta classificação geomecânica de maciços rochosos (CGM)

Utilizando sondagens representativas de três estruturas do AHE Jirau, verificou-se as dificuldades de obtenção dos parâmetros classificatórios e avaliou-se os resultados nos sistemas MR, RMR, Q e RMi, para fins de seleção do sistema para compor a base estrutural da classificação geomecânica, objetivo da presente tese (CGM), estando os resultados apresentados na Tabela 6.1.

Os sistemas MR e RMR são analisados a partir da soma de quatro e cinco parâmetros classificatórios, respectivamente, obtidos sem maiores dificuldades em testemunhos de sondagem, sendo o MR aplicado exclusivamente a projeto de túneis.

As maiores dificuldades na determinação dos parâmetros classificatórios foram verificados nos sistemas Q e RMi, ambos os sistemas aplicados a túneis.

No sistema Q, a avaliação dos índices J_w / SRF, que representam a tensão existente no maciço rochoso, ao utilizar testemunhos de sondagens executadas a céu aberto, a estimativa desses parâmetros é extremamente subjetiva, o que pode acarretar erros grosseiros.

No sistema RMi, a determinação do índice JP, parâmetro de descontinuidade, que é composto pelo volume do bloco e três características das descontinuidades (rugosidade, alteração e dimensões) é também de difícil interpretação, a partir de testemunhos de sondagem, principalmente na determinação do comprimento e persistência das descontinuidades.

Tabela 6.1. Avaliação do maciço rochoso do AHE Jirau por meio dos sistemas MR, RMR, Q e RMi.

Sistema/Classe	Barragem de Concreto	Casa Força/T. D'água	Canal de Adução
Sistema Q Classe	4,4 Regular	12 Bom	8,8 Regular
Sistema RMR Classe	67 II (Bom)	78 II (Bom)	62 II (Bom)
Sistema MR Classe	72 II (Bom)	78 II (Bom)	79 II (Bom)
Índice RMi Classe	14 Muito Alto	29 Muito Alto	33 Muito Alto

Avaliou-se uma estrutura do AHE Jirau, por meio de correlações empíricas dos sistemas MR, Q, e RMR, de autores citados por Miranda (2003), cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Correlações empíricas entre os sistemas Q, MR e RMR para o maciço rochoso da barragem de concreto.

Correlação entre os sistemas Q e MR (ROCHA, 1976)		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$Q = 8,4 \cdot \ln MR + 39,2$	$Q = 75$	4,4 - Muito diferente
Correlação entre os sistemas RMR e Q (RUTLEDGE e PRESTON, 1978)		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43$	$RMR = 52$	67 – Baixou para a classe anterior
Correlação entre os sistemas RMR e Q (MORENO, 1980).		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$	$RMR = 63$	67 – Dentro da mesma classe
Correlação entre os sistemas RMR e Q (CAMERON - CLARKE E BUDAVARI, 1981)		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 60,8$	$RMR = 68$	67 – Confere
Correlação entre os sistemas RMR e Q (ABAD <i>et al.</i> 1984)		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 41,8$	$RMR = 49$	67 – Muito diferente
Correlação entre os sistemas RMR e Q (BIENIAWSKI, 1989).		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 44$	$RMR = 57$	67 – Baixou uma classe
Correlação entre os sistemas RMR e MR (NEVES <i>et al.</i> 1989).		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$MR = 0,9 \cdot RMR + 8$	$MR = 68$	72 – Na faixa
Correlação entre os sistemas RMR e Q (BARTON, 2000).		
Correlação	Resultado	Valor - Análise
$RMR = 15 \cdot \log Q + 50$	$RMR = 60$	67 – Aceitável

O sistema RMR foi selecionado para compor a base estrutural da CGM, objetivo da presente tese, em decorrência dos seguintes fatores:

- Os resultados da avaliação de três estruturas do AHE Jirau (Tabela 6.1) foram compatíveis com as características médias do maciço, com valores na faixa esperada, com exceção aos obtidos no sistema Q, que se apresentaram variados e relativamente baixos;
- As correlações do RMR propostas por alguns autores constantes na Tabela 6.2, na maioria foram coerentes, inclusive do sistema Q (MORENO, 1980 e BARTON, 2000); a correlação

entre os sistemas MR e Q (ROCHA, 1976) foi muito diferente, portanto não se aplica para o maciço rochoso do AHE Jirau;

- A possibilidade de utilização do índice GSI e suas respectivas correlações para obtenção de parâmetros geomecânicos preliminares, em decorrência da CGM ter a mesma base de cálculo do RMR;
- Forma relativamente simples e consagrada no meio técnico de obtenção dos parâmetros geotécnicos classificatórios, seja por meio de sondagens rotativas e/ou com base em mapeamentos geológico-geotécnicos, complementados com ensaios laboratoriais, rotineiramente utilizados nos estudos de projeto de empreendimentos hidrelétricos;
- Custos adicionais insignificantes, para formulação, obtenção dos parâmetros e aplicação no projeto e campo, desde que os programas dos estudos e prospecções de campo, para projeto de empreendimentos hidrelétricos a céu aberto, sejam formulados adequadamente por profissionais da área.

A Figura 6.1 mostra as curvas referentes às expressões 3.38 a 3.42 e 3.44, em que ocorre uma maior aproximação de valores na faixa do RMR (60 – 80) e de Q (4 – 12), correspondentes às equações respectivas 3.42 de Bieniawski (1989) e 3.44 de Barton (2000), e os valores encontrados do maciço rochoso de fundação de três estruturas do AHE Jirau, que foram utilizadas nas pesquisas para seleção do sistema com a finalidade de compor a base estrutural da CGM.

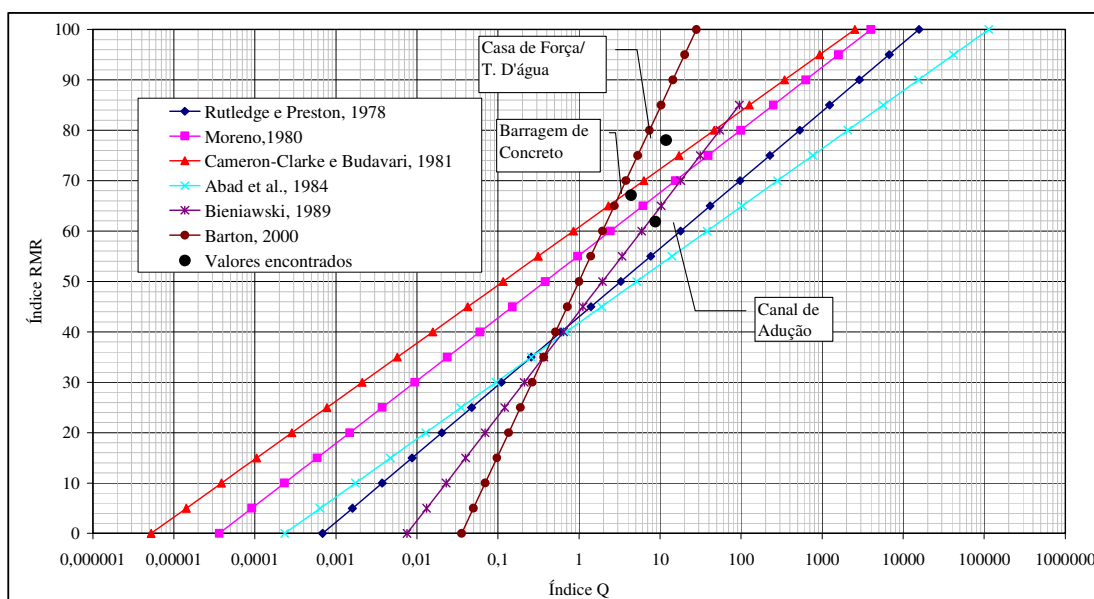


Figura 6.1. Correlação entre os índices Q e RMR, modificado de Miranda (2003).



Figura 6.2. Descontinuidade da família NW-SE, objeto de determinação de parâmetros geomecânicos, atitude $N15^{\circ}W/82^{\circ}NE$.



Figura 6.3. Família NE-SW na margem direita, vista de jusante, atitude: $N50^{\circ}E/80^{\circ}SE$



Fig. (a). SR-214: prof.: 3,86-4,0m. Testemunho de sondagem utilizado em ensaio de cisalhamento. Descontinuidade sub-vertical (SV).

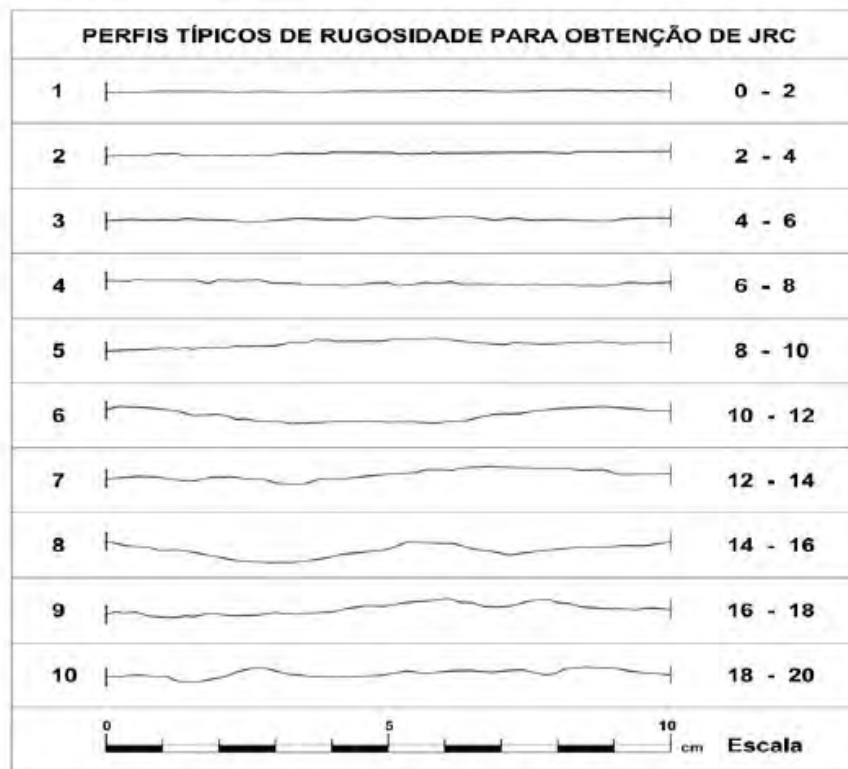


Fig. (b). Perfis de rugosidade e os respectivos intervalos de valores de JRC (Barton & Choubey, 1978, modificado-ISRM, 1981).

Figura 6.4. Determinação do índice de rugosidade em descontinuidade sub-vertical em testemunho de sondagem. Fig. (a) amostra de riolito cujo valor adotado de $JRC_{10} = 10$, em comparação com o perfil da Fig. (b).

Tabela 6.4. AHE Jirau: Descontinuidade sub-vertical - dados obtidos da envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal

Envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal – Expressão (3.23)				
Tensão normal (σ_n)	0,5	1,0	1,5	2
Ângulo de atrito de pico (ϕ_p)	39,2	36,2	35,4	33,1
Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal – Expressão (3.20)				
Tensão normal (σ_n)	0,50	1,00	1,50	2,00
Tensão cisalhante (τ)	0,60	1,08	1,52	1,94

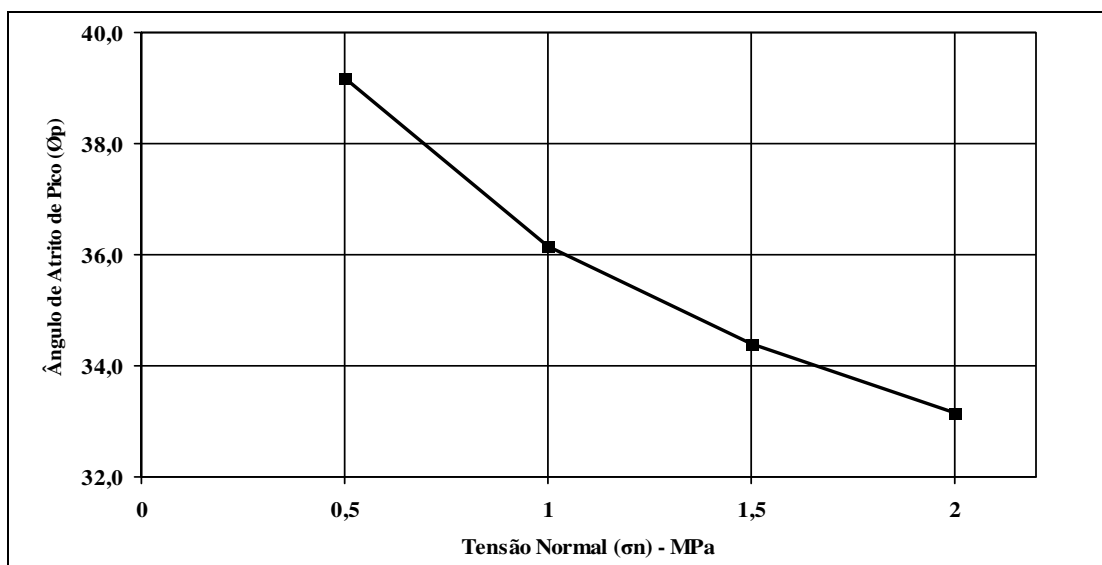


Figura 6.5. Descontinuidade sub-vertical (SV) - Envoltória do ângulo de atrito de pico x tensão normal

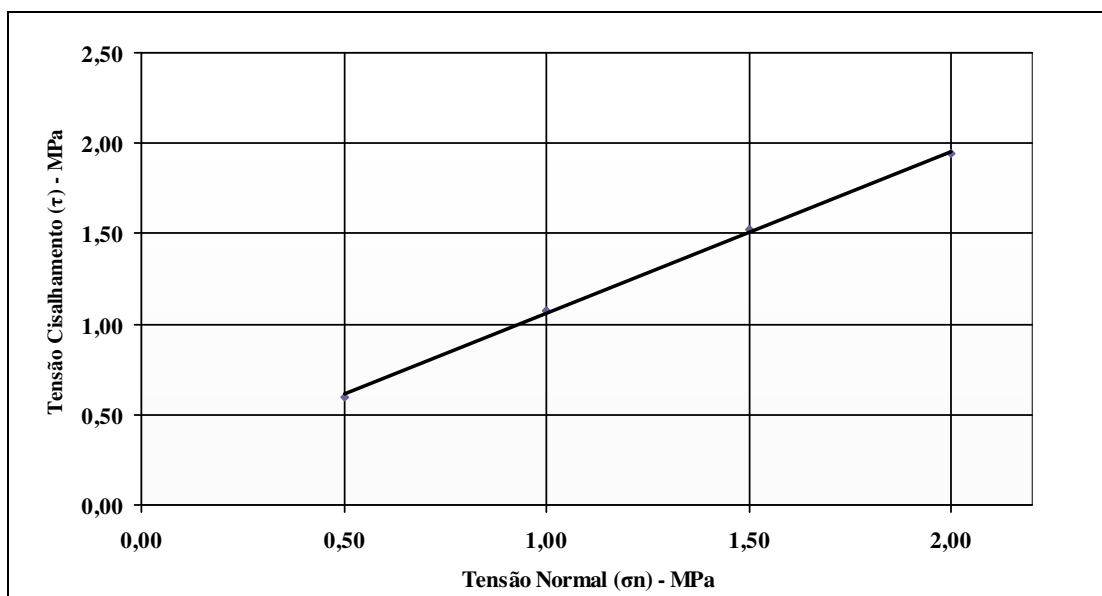


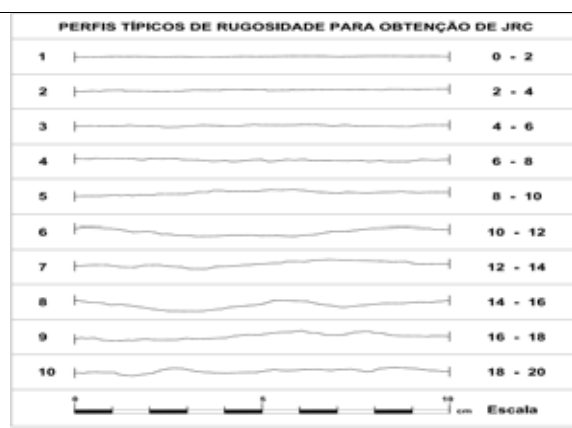
Figura 6.6. Descontinuidade sub-vertical (SV) – Envoltória: Tensão Cisalhante x Tensão Normal.

6.3.2. Descontinuidade sub-horizontal

As descontinuidades sub-horizontais ocorrem em toda área mapeada, sendo o principal responsável pelo contorno superior dos macro-afloramentos (ilhas). Apresentam planos ondulados, subparalelos e espaçados em geral entre 0,5 e 2,0 m, limitados a uma profundidade inferior a 20 m. As atitudes dos planos são muito variadas, em decorrência da ondulação da lapa. Foi selecionada uma ocorrência, localizada nas proximidades da barragem de concreto (Figura 6.7) para estimativa de parâmetros geomecânicos,



Figura 6.7. Descontinuidade da família sub-horizontal, plano ondulado, irregular, com direção variada mergulhando suavemente para NE.



6.8. Perfis de rugosidade (BARTON e CHOUBEY, 1978). Com base em inspeção local foi adotado $JRC_{10} = 11$

Na Tabela 6.5, constam os valores estimados dos parâmetros geomecânicos da descontinuidade mencionada, obtidos conforme Tabela 6.3 e, os dados de obtenção das envoltórias do ângulo de atrito de pico e da tensão cisalhante, apresentadas, respectivamente, nas Figuras 6.9 e 6.10.

Tabela 6.5. AHE Jirau: Descontinuidade sub-horizontal - Estimativa de parâmetros geomecânicos.

Parâmetros	γ_d	r	JCS	Jr	Ja	ϕ_r	ϕ_b	JRC
Valor	26,8	32	58	1,5	3,2	27	30	11
Envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal – Expressão: (3.23)								
Tensão normal (σ_n)						0,5	1	1,5
Ângulo de atrito de pico (ϕ_p)						49,7	46,4	44,5
Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal – Expressão: (3.20)								
Tensão normal (σ_n)						0,50	1,00	1,50
Tensão cisalhante (τ)						0,66	1,17	1,63

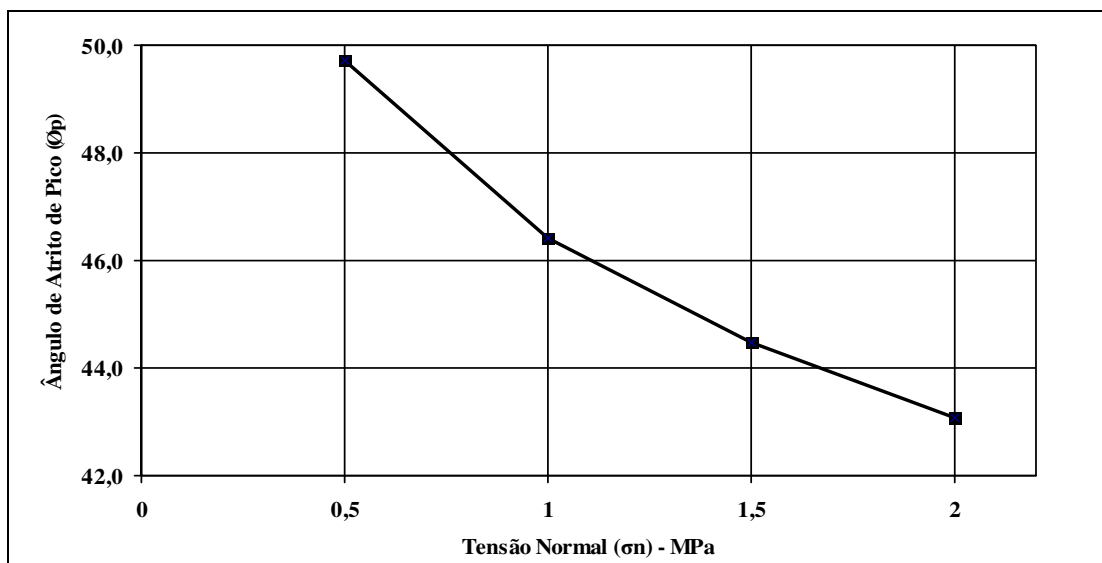


Figura 6.9. Descontinuidade sub-horizontal – Envoltória: Ângulo de Atrito de Pico x Tensão Normal

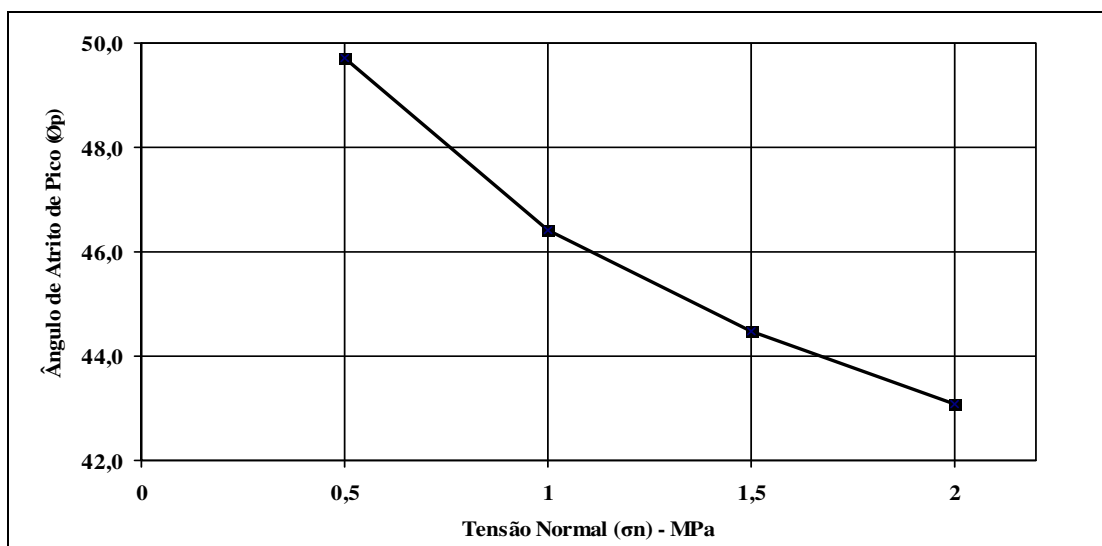


Figura 6.10. Descontinuidade SH: Envoltória: Tensão Cisalhante x Tensão Normal.

6.4. Caracterização geomecânica das descontinuidades presentes nas fundações do maciço rochoso da UHE Serra do Facão.

As juntas sub-horizontais que ocorrem no maciço rochoso das fundações acompanham, invariavelmente, os planos de xistosidade do mica-xisto, com espaçamento variando na faixa de 5-7 m. Esses planos, em decorrência dos processos metamórficos que atuaram na formação do maciço, imprimindo às camadas formas amendoadas, apresentam-se com grande persistência e com a superfície suavemente ondulada. Localmente, estes planos são interrompidos por prováveis planos de falhas sub-verticais.

Além das superfícies onduladas, o maciço apresenta-se também, em maior escala, suavemente dobrado, fazendo com que os planos de xistosidade apresentem mergulhos com ângulos e direções variáveis, na escala local. Os preenchimentos das juntas geralmente são composto por quartzo, clorita, grafite e impregnações de sulfetos. A presença de grafite vai diminuindo à medida que se aprofunda no maciço rochoso, sendo que, abaixo da elevação 668 m (fundo do leito do rio São Marcos), a clorita passa ser o principal material de preenchimento.

As discontinuidades sub-horizontais (denominadas genericamente de juntas) foram objeto de intenso estudo por parte da projetista, tendo sido caracterizadas em três tipos, função das características dos planos e preenchimentos e conseqüente ângulo de atrito. Outras discontinuidades inclinadas de elevado e de baixos mergulhos ocorrem no maciço rochoso da UHE Serra do Facão, conforme citado no Capítulo 5.

Para melhor compreensão e uso no campo, na obtenção do índice classificatório, condição das discontinuidades da CGM, avaliou-se as discontinuidades presentes no maciço rochoso da UHE Serra do Facão, de acordo com os critérios e convenções descritos no Capítulo 2, (Tabelas 2.1 a 2.6). Foi também estimado o ângulo de atrito residual (ϕ_r), por meio dos índices de rugosidade (Jr) e alteração (Ja) do sistema Q de Barton *et al.* (1974). Os resultados desse estudo constam na Tabela 6.6.

Tabela 6.6. UHE Serra do Facão: Características das discontinuidades e correlação com os índices de rugosidade e alteração do sistema Q de Barton *et al.* (1974).

Descrição da discontinuidade	Convenções	(Jr)	(Ja)	(ϕ_r)°
1. Junta tipo T-1, persistência grande, plana regular, lisa, aberta, com preenchimento argiloso maior que 50mm, plano alterado, presença de grafita e clorita.	(1) Fa, Pg, Pr, l, A, P3 >50, al, gx, cl.	1	5 - 6	9 - 11
2. Junta tipo T-2, persistência grande, plano regular com trecho irregular e ondulado, rugoso ou localmente liso, aberto, plano alterado, com preenchimento misto, de 2 a 10 mm, de quartzo e clorita.	(2) Fa/Fr, Pg, Pr/I/O, A, P2, 2-10, al, qz, cl.	1-1,5	3 - 4	18 - 21
3. Junta tipo T-3 persistência grande, plano regular com trecho ondulado, fechado, menor que 1mm, contato rocha a rocha, superfície rugosa, oxidada.	(3) Fr, Pg, Pr/O, F, rr, r, ox, <1.	1,5	2	36 - 38
4. Fratura, persistência grande, plana regular com trecho irregular e ondulado, plano rugoso/liso, aberto, alterado, com preenchimento misto de 2 a 10 mm, quartzo e clorita.	(4) Fa/Fr, Pg, Pr/I/O, A, P2, 2-10, al, qz, cl.	1	3 - 5	11- 18
5. Fratura, persistência grande, plana com trecho irregular, aberta com trecho fechada menor que 2 mm, superfície rugosa, plano alterado, oxidado.	(5) Fr, Pg, Pr/I, A/F, r, al, 0-2.	1,5-3	3 - 5	22 - 29
6. Fratura, persistência média, plana com trecho irregular ou ondulado, fechada com trecho aberta, de 1 a 2 mm, superfície rugosa, oxidada.	(6) Fr, Pm, Pr/I/O, F/A, r, ox, al, 0-2	3	4 - 5	30 - 37
7. Fratura, pequena a média persistência, plana ou irregular, fechada, com cimento silicoso ou carbonático, ou aberta mecanicamente na fundação.	(7) Fr, Pp, Pr/I, F, si, ca.	3- 4	4 - 5	> 37

Com base nestas informações, estimou-se os parâmetros das descontinuidades (juntas) que controlam o comportamento geomecânico do maciço rochoso da UHE Serra do Facão.

6.4.1. Juntas sub-horizontais.

- **Casa de Força – Parede esquerda**

Uma descontinuidade sub-horizontal (junta) mapeada, com atitude média $280^{\circ}/05^{\circ}$ NW, foi objeto de estimativa de parâmetros geomecânicos. Trata-se de uma junta plana e regular, com trechos ondulados, muito persistente, com superfície irregular, e película de alteração em alternância de contato rocha a rocha, com preenchimento misto, ou película de material argiloso.



Figura 6.11. Descontinuidade sub-horizontal na parede esquerda da casa de força, elevação aproximada 667,00 selecionada para determinação de parâmetros geomecânicos. Ver detalhe na Figura 12.



Figura 6.12. Junta sub-horizontal - Detalhe do local de amostragem, usado para determinação do índice de rugosidade (JRC) por comparação com os perfis de rugosidade de Barton e Choubey (1978). Adotado JRC =11.

Os parâmetros foram obtidos, conforme descrito na Tabela 6.7.

Tabela 6.7. UHE Serra do Facão – Casa de Força, parede esquerda: Descontinuidade sub-horizontal - Estimativa de parâmetros geomecânicos.

Parâmetros	γ_d	r	JCS	J_r	J_a	ϕ_r	ϕ_b	JRC	σ_n
Valor	25,8	30	49	1,5	3,0	26°	29	11	0,5 a 2,0 MPa
Referências	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
(1) - Peso específico seco da rocha (γ_d), determinado em laboratório a partir de pequena amostra do local, em kN/m^3 . (2) - Medição com esclerômetro: 30, 38, 29, 30, 31, 32, 39, 38, 28, 36. Média dos 6 menores resultados (r) = 30. (3) - Determinado a partir da expressão (3.11), proposta por Barton e Choubey (1978). (4) J_r . Índice de rugosidade das paredes da descontinuidade determinado no campo com uso da Tabela 2.9. (5) J_a . Índice de alteração das paredes da descontinuidade determinado no campo com uso da Tabela 2.10. (6) ϕ_r . Ângulo de atrito residual, determinado por meio das expressões (3.14 e 3.15), a partir dos índices J_r e J_a do sistema Q de Barton <i>et al.</i> (1974). (7) Ângulo de atrito básico (Barton <i>et al.</i> 2007 e CNEC, 2008): 29° (8) - Coeficiente de rugosidade do plano da descontinuidade JRC, obtido por comparação do perfil da descontinuidade com os perfis de rugosidade de Barton e Choubey (1978). (9) σ_n - Valores adotados no projeto da tensão normal.									

Na Tabela 6.8, constam os parâmetros geomecânicos da descontinuidade obtidos, conforme Tabela 6.7, e os dados de obtenção das envoltórias do ângulo de atrito de pico e da tensão cisalhante, apresentadas, respectivamente nas Figuras 6.13 e 6.14.

Tabela 6.8. UHE Serra do Facão: Descontinuidade sub-horizontal - Parâmetros da envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal e da Tensão cisalhante x Tensão normal.

Envoltória: Ângulo de atrito de pico x Tensão normal – Expressão: (3.23)				
Tensão normal (σ_n)	0,5	1	1,5	2
Ângulo de atrito de pico (ϕ_p)	47,9	44,6	42,7	41,3
Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal – Expressão: (3.20)				
Tensão normal (σ_n)	0,50	1,00	1,50	2,00
Tensão cisalhante (τ)	0,62	1,09	1,53	1,95

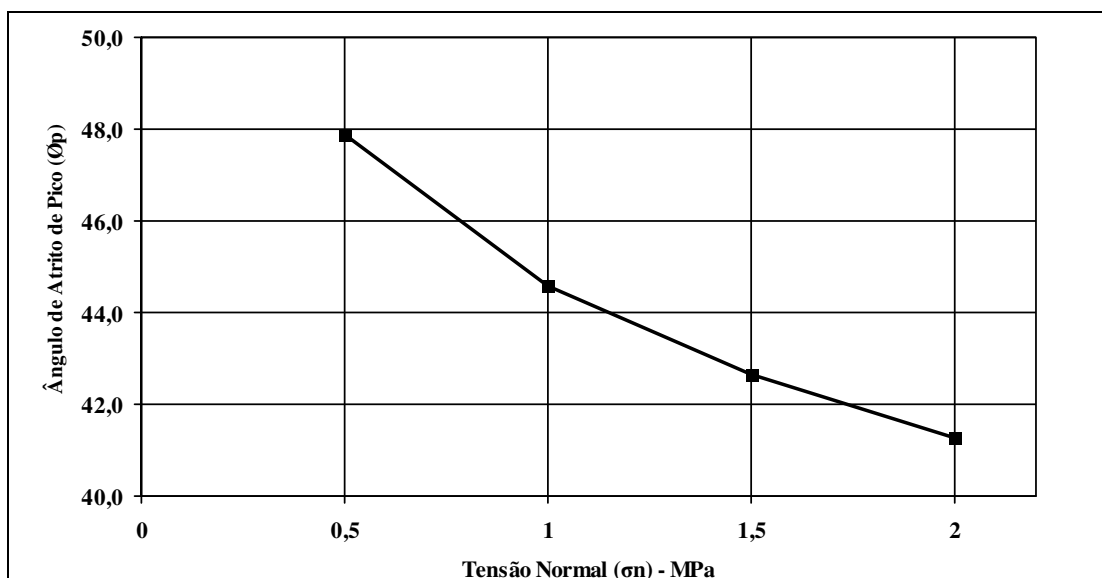


Figura 6.13. Envoltória: Tensão normal (σ_n) x Ângulo de atrito de pico ϕ_p

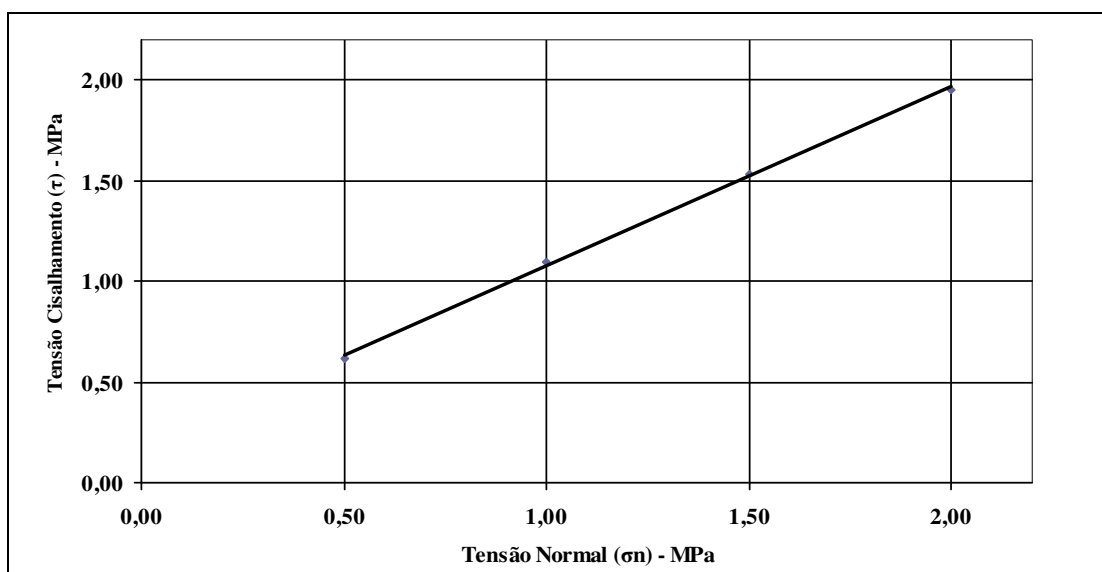


Figura 6.14. Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal

• Muro de encontro da barragem de enrocamento jusante

Uma importante descontinuidade sub-horizontal foi mapeada na parede escavada remanescente da fundação do Muro de encontro, no limite da porção central e jusante, conforme mostrado no Capítulo 7 (Figura 7.4, Fotos 8 e 9).

Na caracterização da referida descontinuidade, foi aplicado o conceito do efeito escala referido no Item 3.3.3, em que os valores de JRC e JCS são influenciados com o incremento da persistência, ocorrendo uma redução nos valores dos mesmos, de acordo com Barton e Bandis (1982). Os valores dos parâmetros básicos e forma de obtenção constam na Tabela 6.9.

Tabela 6.9. UHE Serra do Facão: Descontinuidade sub-horizontal no Muro de encontro jusante - Estimativa de parâmetros geomecânicos.

Parâmetros	γ_d	r	JCS ₀	J _r	J _a	ϕ_r	ϕ_b	JRC ₀	σ_n
Valor	25,8	25	39,81	1,5	4,0	21°	29	12	0,5 a 2,0 MPa
Referências	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
<p>(1) - Peso específico seco da rocha (γ_d), determinado em laboratório a partir de pequena amostra do local, em kN/m³.</p> <p>(2) r - Medição com esclerômetro: 28, 28, 26, 29, 26, 27, 22, 19, 34, 34. Média dos 6 menores resultados (r) = 25. O valor de R (para o mica-xisto medido e adotado no projeto é de 50)</p> <p>(3) JCS₀ - determinado por meio da expressão (3.11), proposta por Barton e Choubey (1978).</p> <p>(4) J_r - Índice de rugosidade das paredes da descontinuidade determinado no campo com uso da Tabela 2.9.</p> <p>(5) J_a - Índice de alteração das paredes da descontinuidade determinado no campo com uso da Tabela 2.10.</p> <p>(6) ϕ_r - Ângulo de atrito residual, determinado por meio das expressões (3.14 e 3.15), a partir dos índices J_r e J_a do sistema Q de Barton <i>et al.</i> (1974).</p> <p>(7) Ângulo de atrito básico obtido no ensaio de campo (Tabela 6.12): 32°.</p> <p>(8) - Coeficiente de rugosidade do plano da descontinuidade JRC₀, obtido por comparação do perfil da descontinuidade com os perfis de rugosidade de Barton e Choubey (1978).</p> <p>(9) σ_n - Valores adotados no projeto da tensão normal.</p>									

A metodologia empregada para determinação dos valores de JRC e JCS, aplicando o efeito escala, foi desenvolvido na seguinte sequência:

a) Uso de fotografia e informática

- A junta foi inicialmente demarcada topograficamente de forma a possibilitar a visualização na fotografia (Figura 6.15);
- De posse da fotografia selecionada, com simples tratamento de imagem, é determinada a amplitude da rugosidade que, para o caso de comprimento do trecho $L_n = 5,00$ m, as maiores amplitudes (L_o) foram de 82 e 73mm. A Figura 6.16 mostra a utilização de fotografia digital em escala centimétrica, para determinação dos valores de L_n e L_o .

b) Por meio de levantamento topográfico de detalhe: utilizando equipamento topográfico de precisão (estação total) foi realizado o perfil de trecho representativo na parede escavada do traço da junta, com pontos centimétricos e com uso do *soft Topograph*, foram plotados e medidos em subtrechos os valores para L_n e L_o , conforme mostrado na Figura 6.17.

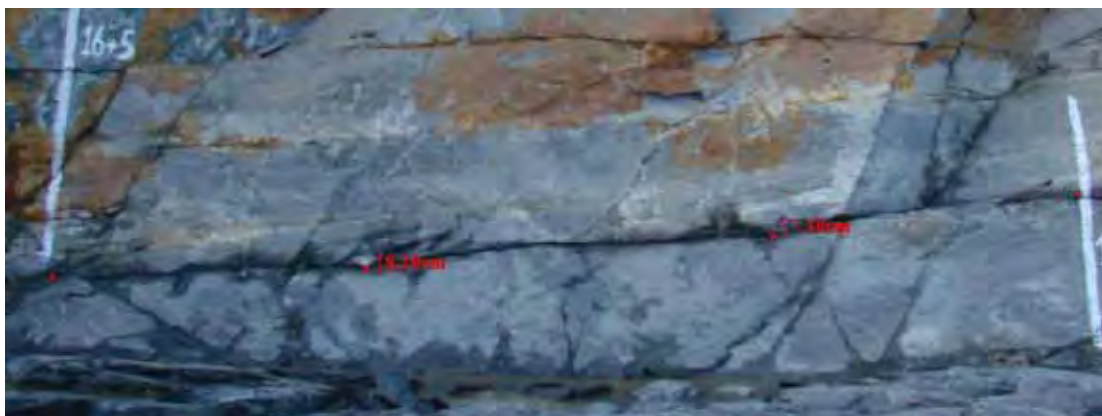


Figura 6.15. Determinação da rugosidade de um trecho da junta sub-horizontal medido em fotografia em área demarcada topograficamente com apoio de informática. Comprimento do trecho 5,00 m e maiores amplitudes da rugosidade 82mm e 73mm.



Figura 6.16. Determinação da rugosidade de junta sub-horizontal com uso de escalímetro: comprimento do trecho 12,5 cm e amplitude da rugosidade de 6 mm.

Utilizando as expressões 3.12 e 3.13 desenvolvidas por Barton e Bandis (1982) determinou-se os valores de JRC_n e JCS_n , para cada subtrechos selecionados da Figura 6.17,

O valor considerado para o comprimento da junta foi o real levantado de 39,81m, tendo sido excluídos os subtrechos mais externos não selecionados, por apresentarem dimensões similares aos selecionados constantes dos detalhes da Figura 6.17.

As envoltórias do ângulo de atrito de pico e da tensão cisalhante estão apresentadas, respectivamente nas Figuras 6.18 e 6.19.

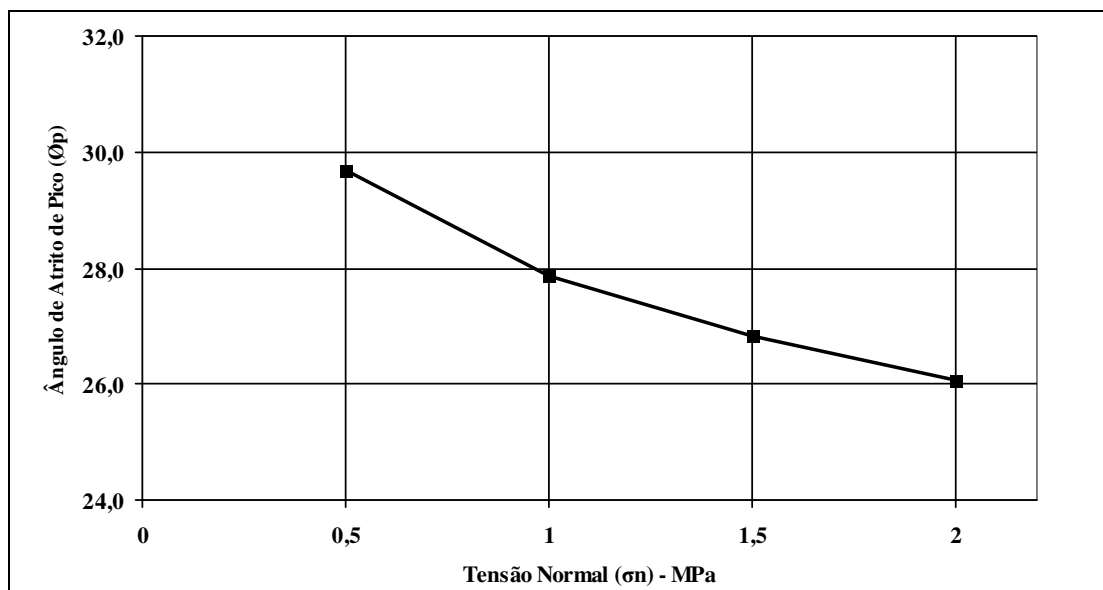


Figura 6.18. Envoltória: Tensão normal (σ_n) x Ângulo de atrito de pico $\phi_{(t)}$

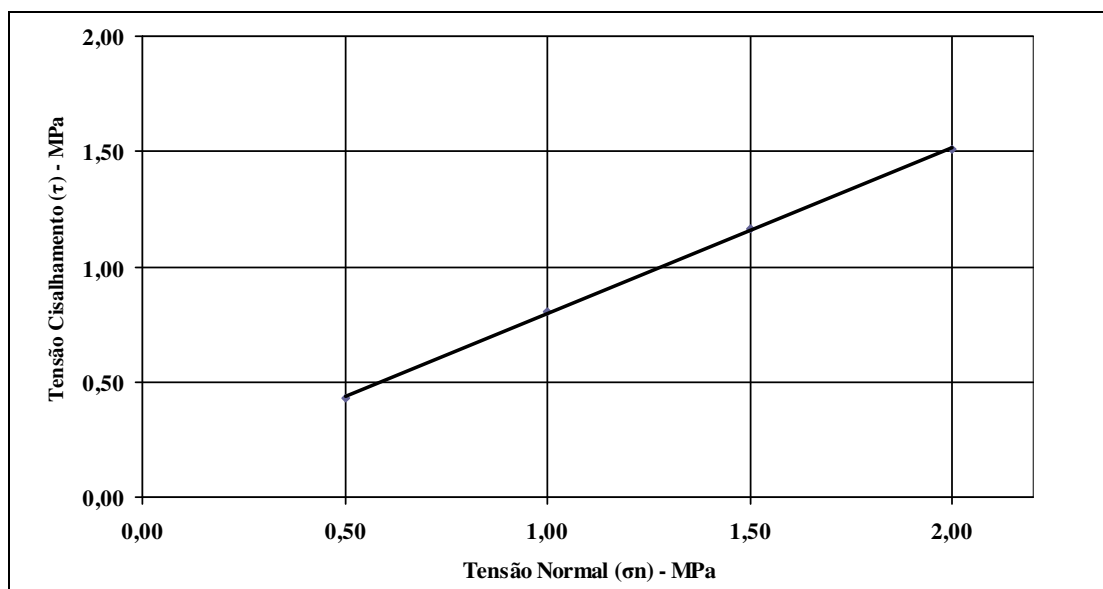


Figura 6.19. Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal

6.4.2. Descontinuidades de elevado mergulho.

As descontinuidades de elevado mergulho ocorrem em toda área do empreendimento Serra do Facão, sendo marcante a presença, na região da barragem de enrocamento, junto ao talude da margem direita, conforme Figura 6.20.



Figura 6.20. Descontinuidade da família de elevado mergulho com plano ondulado, irregular.

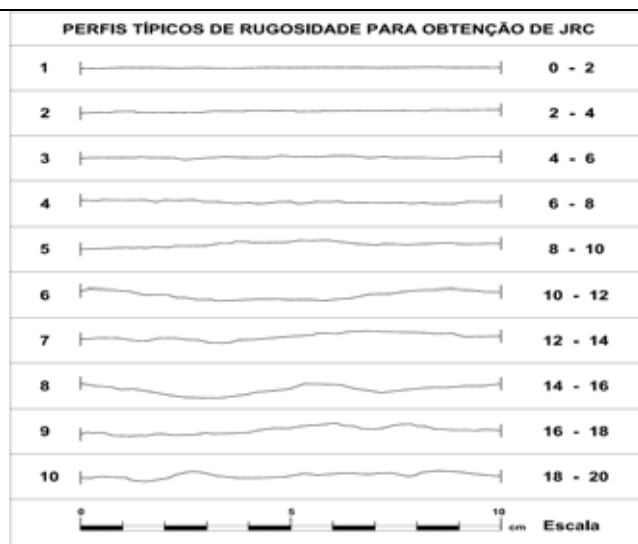


Figura 6.21. Perfis de rugosidade (BARTON e CHOUBEY, 1978). Adotado JRC=15.

Esta descontinuidade em mica-xisto pode ser descrita como pouco a medianamente alterada (A2/A3), com atitude $178^{\circ}/60^{\circ}\text{SE}$, de elevada persistência com plano alterado e presença de película de argila, com amplitude da rugosidade da ordem de 30 a 50mm.

Os parâmetros foram obtidos, conforme descrito na Tabela 6.11, estando as envoltórias do ângulo de atrito de pico e da tensão cisalhante apresentadas, respectivamente nas Figuras 6.22 e 6.23.

Tabela 6.11. UHE Serra do Facão – Barragem da margem direita: Descontinuidade de elevado mergulho - Estimativa de parâmetros geomecânicos.

Parâmetros	γ_d	r	JCS	J_r	J_a	ϕ_r	ϕ_o	JRC	σ_n
Valor	25,8	17	25	1,5	3,0	27°	29	15	0,5 a 2,0 MPa
Referências	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)

(1) - Peso específico seco da rocha (γ_d), determinado em laboratório a partir de pequena amostra do local, em kN/m³.
 (2) - Medição com esclerômetro: 28, 16, 12, 24, 15, 40, 20, 20, 20, 25. Média dos 6 menores resultados (r) = 17
 (3) - Determinado por meio da expressão (3.11), proposta por Barton e Choubey (1978).
 (4) J_r - Índice de rugosidade das paredes da descontinuidade determinado no campo com uso da Tabela 2.9.
 (5) J_a - Índice de alteração das paredes da descontinuidade determinado no campo com uso da Tabela 2.10.
 (6) ϕ_r - Ângulo de atrito residual, determinado por meio das expressões (3.14 e 3.15), a partir dos índices J_r e J_a do sistema Q de Barton *et al.* (1974).
 (7) Ângulo de atrito básico (Barton *et al.* 2007 e CNEC, 2008): 29°.
 (8) - Coeficiente de rugosidade do plano da descontinuidade JRC, obtido por comparação do perfil da descontinuidade com os perfis de rugosidade de Barton e Choubey (1978).
 (9) σ_n - Valores adotados no projeto da tensão normal.

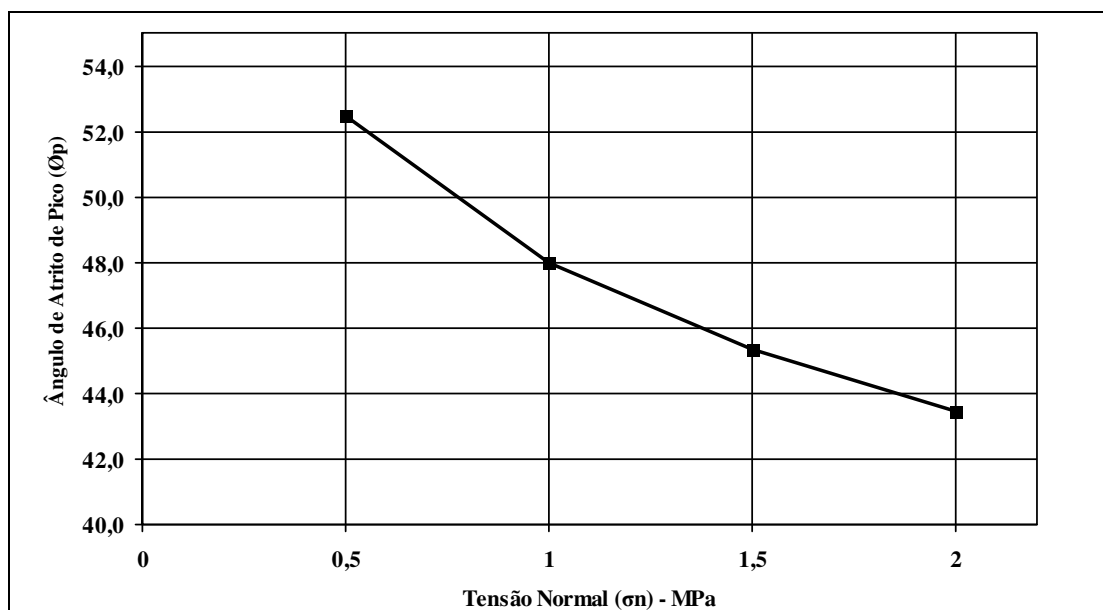


Figura 6.22. Envoltória: Tensão normal (σ_n) x Ângulo de atrito de pico $\phi_{(i)}$

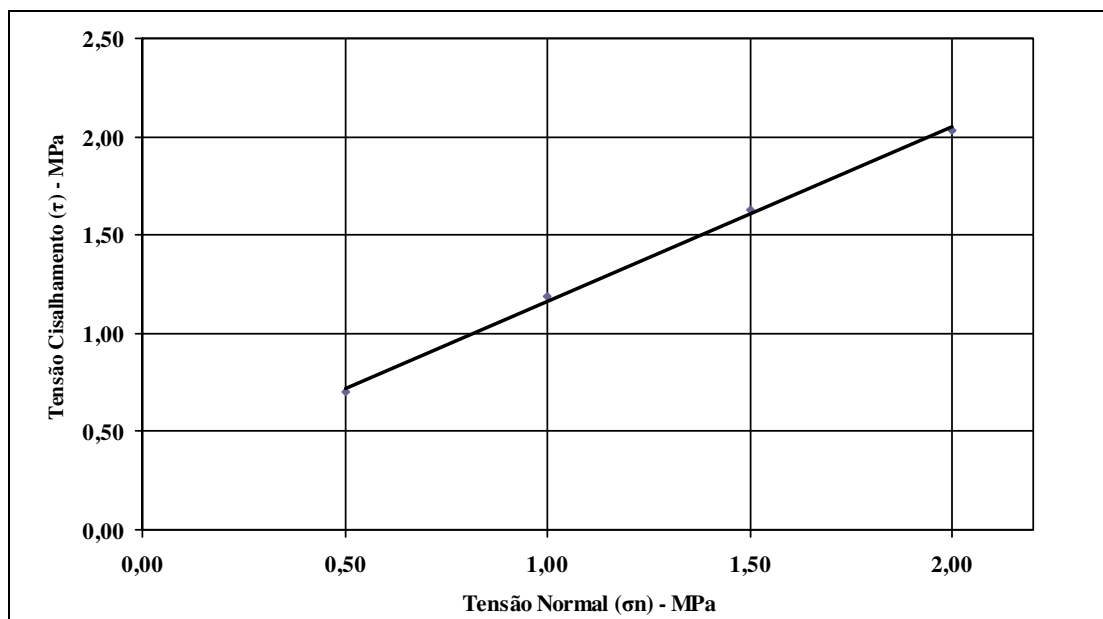


Figura 6.23. Envoltória: Tensão cisalhante x Tensão normal

6.5. Determinação do ângulo de atrito básico em ensaios de campo

Ensaio de campo desenvolvidos por este autor em amostras de mão de xistos da UHE Serra do Facão, coletadas nas frentes de escavação, submetidas ao ensaio em rampa inclinada (*tilt test*) desenvolvido por Barton *et al.* (1985), apresentaram valores para o mica-xisto entre 23° e 35°. A variação é função das características da amostra, com valor obtido a partir da média de cinco determinações por amostra (Tabela 6.12).

Tabela 6.12. Ângulo atrito básico (ϕ_b) determinado nos xistos da UHE Serra do Facão

Tipo litológico	Características da amostra	Local de coleta	Ângulo atrito básico (ϕ_b)°
Clorita-xisto	Medianamente alterada (A3), saturada (1)	Túnel, Est.: 20+08	18
Grafita-xisto	Medianamente alterada (A3); medianamente a pouco coerente C2/C3), úmido.	Talude AM/CF: El. 684	15
Mica-xisto	Seco, (A2; C2) – plano de xistosidade	Fundação Bloco 8	24
Mica-xisto	Seco, (A2; C2) – plano de fratura SV, al. ox.	Fundação Bloco 9	23
Mica-xisto	Seco, (A1/A2; C1/C2)	Fundação Muro de Em-contro, jusante	32
Quartzo mica-xisto	Seco, (A1/A2; C1) – superfície irregular (fogo)	Bacia Dissipação	34
Mica anfíbio-xisto	Seco, (A1; C1) – superfície irregular (fogo)	Bacia Dissipação	35
(1). Para índices de alteração e coerência, ver Tabelas 2.1 e 2.2.			

Capítulo 7

Proposta de Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos

Segundo Assis (2004), a natureza do maciço rochoso é muito complexa, portanto, são necessárias ferramentas teóricas que permitam estimar, analisar e controlar o seu comportamento. Para resolver esse problema, são idealizados modelos teóricos que só conseguem analisar um determinado processo em um tempo e um espaço determinado, no qual o bom senso e a experiência prática são partes importantes. Por outro lado, quando não se tem essa capacidade de entendimento do maciço rochoso, uma alternativa está nos sistemas de classificação geomecânica, que permitem relacionar a situação atual com as situações encontradas por outros, ou seja, as classificações geomecânicas são uma forma sistemática de catalogar experiências obtidas em outros lugares e relacioná-las com a situação ora encontrada.

Procurou-se a experiência de projetos hidrelétricos de grande porte, situados na Amazônia, onde ocorreu uma sintonia eficaz entre os técnicos alocados no projeto com a equipe de campo, de forma que os parâmetros e critérios de projeto foram determinados e ajustados em comum acordo.

É uma prática dos profissionais da área de barragens adaptarem e utilizarem, com certos critérios, classificações geomecânicas concebidas para projetos de túneis, a exemplo do Aproveitamento Múltiplo (APM) Manso, citado nos Capítulos 1 e 2.

Para alcançar o objetivo da presente tese, considerou-se a real situação que ocorre no desenvolvimento dos estudos e prospecções de campo para projetos hidrelétricos, em que são limitados os recursos destinados às fases de projeto, quando comparados aos custos das obras civis de empreendimentos hidrelétricos.

7.1. Classificação geomecânica de maciços rochosos CGM, fase de projeto (viabilidade e básico)

7.1.1. Generalidades

Ao classificar o maciço rochoso de um aproveitamento hidrelétrico, encontra-se maior complexidade, em decorrência das múltiplas solicitações impostas no projeto: de fundações (certamente o mais importante); estabilidade de taludes de canais e paredes de escavação nas estruturas de geração e circuitos hidráulicos, inclusive galerias e túneis.

Citado por Costa (1999), em se tratando de fundação de barragens, os principais aspectos envolvidos na caracterização e classificação do maciço rochoso são a deformabilidade e resistência entre as propriedades geomecânicas; enquanto na hidrogeotecnia, não menos importante, é o comportamento do maciço submetido a percolações d'água e sua estanqueidade.

A classificação geomecânica proposta (CGM) é abrangente, podendo ser generalizada para todo o maciço rochoso, para uma estrutura específica, ou até mesmo para uma região limitada dentro da estrutura de determinado projeto. Para tanto, os parâmetros classificatórios em cada situação deverão ser obtidos, considerando as informações existentes nas áreas limites, bem como as classes de maciço rochoso.

7.1.2. Parâmetros geotécnicos adotados

São adotados cinco parâmetros/índices geotécnicos, com pesos diferenciados na classificação: Resistência da rocha intacta; Fraturamento; Características das descontinuidades; Permeabilidade ; e Ajuste das Descontinuidades.

a) Resistência da rocha intacta

O parâmetro resistência da rocha intacta é obtido, a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão simples e/ou carga puntiforme. Na falta de ensaios laboratoriais, a resistência da rocha poderá ser estimada com base em ensaios expeditos de campo, conforme *International Society for Rock Mechanics* (ISRM 1981), e apresentados na Tabela 3.3.

Na Tabela 7.1, constam correlações entre as resistências à compressão simples e puntiforme e pesos relativos adotados na classificação para rochas consistentes.

Tabela 7.1. Correlação com ensaios de resistência à compressão simples e puntiformes e pesos relativos adotados na classificação proposta (CGM).

Resistência à Compressão Simples (MPa)	Resistência à Compressão Puntual (MPa)	Peso Relativo (pontos)
> 250	>10	30
250 - 100	10 - 4	25
100 - 50	4 - 2	20
50 - 20	2 - 1	12
< 20	< 1	10

Em maciços de rochas brandas metamórficas e sedimentares estruturadas (xistosas, foliadas, bandadas), a pontuação da rocha intacta é dada por meio da resistência à compressão simples, com valores situados na faixa entre 0,5 e 20 MPa (SOARES, 1991), obtida previamente por meio de ensaios de laboratório. O parâmetro resistência da rocha intacta, a correlação com o ensaio de resistência à compressão simples e os pesos relativos adotados na CGM para rochas brandas ou intemperizadas constam na Tabela 7.2.

Tabela 7.2. Parâmetros resistência da rocha intacta branda e pesos relativos adotados na classificação.

Resistência à Compressão Simples (MPa)	Peso relativo (pontos)
20	10
20 - 10	8
10 - 5	5
5 - 1	3
< 1	1

b) Fraturamento

O grau de fraturamento para rochas consistentes é obtido em furos de sondagem rotativa, defasado de um grau, conforme utilizado no APM Manso (FURNAS, 2002), mostrado na Tabela 7.3.

Tabela 7.3. Grau de fraturamento e peso relativo.

Grau de Fraturamento	F0	F1	F2	F3	F4
Nº de fraturas por metro	0 (Rocha maciça)	0 a 1	2 a 6	7 a 11	11 a 20
Peso Relativo	30	25	20	15	5

Para maciços de rochas brandas, o RQD obtido, conforme formulado originalmente por Deere (1963, 1968), que leva em conta todas as fraturas existentes ao longo da manobra, mostrado na Figura 2.2, deverá ser adotado com valores inteiros múltiplos de 5 e peso relativo, conforme Tabela 7.4.

Tabela 7.4. RQD e pesos adotados na classificação.

RQD (%)	> 75	50 - 75	25 - 50	10 - 25	< 10
Peso Relativo	30	25	20	15	5

c) Características das descontinuidades

As características médias das descontinuidades presentes no maciço rochoso, obtidas a partir da análise dos testemunhos de sondagens rotativas e inspeções de campo, foram agrupadas em função das condições dos planos e dos preenchimentos, com pesos relativos, conforme Tabela 7.5.

Tabela 7.5. Características das descontinuidades e pesos adotados na classificação.

Grupo	Descrição das descontinuidades	Ângulo de atrito (θ)	Peso relativo
I	Maciço rochoso sem fraturas naturais, ou com fraturas cimentadas, que podem se abrir quando desconfinadas e submetidas a vibrações, a exemplo de escavação com uso de explosivos.	> 35°	20
II	Descontinuidades parcialmente abertas, contato rocha a rocha, planos com superfícies irregulares, rugosas, travadas, podendo apresentar pequenas oxidações.	35° - 30°	15
III	Descontinuidades abertas, planos com superfícies pouco rugosas, apresentando intensa oxidação, ou filmes de manganês, discreta película de argila decorrente da alteração e/ou percolação d'água.	30° - 25°	10
IV	Descontinuidades com abertura (1 a 5mm), com preenchimentos muitas vezes indeterminados devido ao transporte pela água de percolação, em geral misto ou mesmo com incidência de argila da própria alteração do plano.	25° - 20°	5
V	Descontinuidades com abertura (>5mm), sem preenchimentos devido ao transporte pela água de percolação, ou com preenchimento de material argiloso, apresentando paredes lisas e/ou estriadas, que caracterizam indícios de movimento relativo.	< 20°	0

d) Permeabilidade

A permeabilidade do maciço rochoso é determinada a partir de ensaio de perda d'água em sondagem rotativa (Tabela 2.5), ou por similaridade de áreas de mesmas características (padrão de fraturamento), com pesos relativos, conforme Tabela 7.6.

Tabela 7.6. Classes de permeabilidade e pesos relativos adotados.

Classe de Permeabilidade	P1	P2	P3	P4	P5
Permeabilidade equivalente (cm/s)	$<10^{-5}$	10^{-5} a 10^{-4}	10^{-4} a 5×10^{-4}	5×10^{-4} a 10^{-3}	$> 10^{-3}$
Peso Relativo	20	15	10	5	0

e) Ajuste da atitude e persistência da descontinuidade

A atitude ou orientação espacial e a persistência da descontinuidade podem condicionar situações desfavoráveis, penalizando o maciço rochoso. A avaliação estrutural e espacial das descontinuidades se faz necessária na fase de projeto, para dimensionamento dos tratamentos de fundação e contenções de paredes escavadas. Dessa forma, a partir das descrições dos testemunhos de sondagens e avaliação de campo da persistência, com base na Tabela 2.5, procede-se ao ajuste das descontinuidades por meio da análise da condição predominante no maciço, conforme Tabela 7.7.

Tabela 7.7. Ajuste das descontinuidades e pesos adotados.

Descrição	Condição	Ajuste (Peso relativo)
Descontinuidade de pequena a média persistência, descontínua, irregular ou ondulada, tipo alívio de pressão, removível na escavação, ou de simples tratamento.	(I) Muito Favorável	0
Descontinuidade de média persistência, parcialmente fechada, com mergulho para montante ou na direção do talude de escavação com poucos tratamentos previsíveis.	(II) Favorável	- (menos) 2
Descontinuidade de grande persistência de direção aleatória, mas fechada em profundidade, quando interceptada(s) por outra(s) formam blocos e cunhas estáveis na fundação e nos taludes de escavação. Tratamentos localizados.	(III) Aceitável	- (menos) 5
Descontinuidade de muito grande persistência com mergulho para jusante e/ou para dentro da cava, quando interceptada(s) por outra(s) formam blocos e cunhas instáveis na fundação e nos taludes de escavação. Previsão de tratamentos ou remoção.	(IV) Desfavorável	- (menos) 10
Descontinuidade de muito grande persistência com mergulho muito desfavorável, quando interceptada(s) por outra(s) formam blocos e cunhas instáveis na fundação e nos taludes de escavação. Previsão de grandes remoções e ou intensos tratamentos.	(V) Muito Desfavorável	- (menos) 12

7.1.3. Determinação da classe do maciço rochoso na classificação geomecânica proposta (CGM) para as fases de projeto viabilidade e básico.

Para determinação da classe do maciço rochoso rochoso:

- Determina-se o peso relativo de cada parâmetro/índice da classificação descrito de (a) a (d) do item anterior;
- Somam-se os pesos dos quatro parâmetros (a) a (d);
- Identifica-se a condição mais representativa do maciço para ajuste das descontinuidades (Tabela 7.7) a partir das sondagens realizadas na área e ou com base nos mapeamentos geológico-geotécnicos;
- Finalmente, obtém-se a classe do maciço rochoso descontando da soma dos quatro parâmetros/índices o valor do ajuste das descontinuidades.

Na Tabela 7.8, são agrupados os cinco parâmetros/índices classificatórios e, na Tabela 7.9, constam as classes definidas pela abrangência dos pesos relativos da CGM, para as fases de projeto viabilidade e básico.

Tabela 7.8. Parâmetros/índices classificatórios e pesos relativos para determinação da classe do maciço rochoso da proposta classificação geomecânica para as fases de projeto viabilidade e básico (CGM).

1.1. Resistência à Compressão Uniaxial da Rocha Intacta – Consistente (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	≤ 25		
Peso Relativo (pontos)	30	25	20	15	10		
1.2. Resistência Compressão Uniaxial da Rocha Intacta - Branda (MPa)	20	20 - 10	10 - 5	5 - 1	< 1		
Peso Relativo (pontos)	10	8	5	3	1		
2.1. Fraturamento	F0	F1	F2	F3	F4		
2.2. RQD (%) (Rocha Branda)	> 75	50 - 75	25 – 50	10 - 25	< 10		
Peso Relativo (pontos)	30	25	20	15	5		
3. Características das Descontinuidades	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V		
	$\phi > 35^\circ$	$35^\circ \geq \phi > 30^\circ$	$30^\circ \geq \phi > 25^\circ$	$25^\circ \geq \phi > 20^\circ$	$\text{Ângulo de atrito } (\phi) \leq 20^\circ$		
					$20^\circ \geq \phi > 15^\circ$	$15^\circ \geq \phi > 10^\circ$	$\phi \leq 10^\circ$
Peso Relativo	20	15	10	5	3	2	0
4. Classe de Permeabilidade	P1	P2	P3	P4	P5		
Permeabilidade Equivalente (cm/s)	$K < 10^{-5}$	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$10^{-4} \leq K < 5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4} \leq K < 10^{-3}$	$\geq 10^{-3}$		
Peso Relativo (pontos)	20	15	10	5	0		
5. Ajuste das Descontinuidades.	Muito Favorável (I)	Favorável (II)	Aceitável (III)	Desfavorável (IV)	Muito Desfavorável (V)		
Peso Relativo (pontos)	0	-2	-5	-10	-12		

Tabela 7.9. Determinação da classe do maciço rochoso para as fases de estudos de viabilidade e projeto básico.

Pesos Relativos (Pontos)	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe do Maciço Rochoso	CGM-1	CGM-2	CGM-3	CGM-4	CGM-5

7.2. Classificação geomecânica de maciços rochosos, fase de projeto executivo (obra)

7.2.1. Generalidades

A Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos proposta (CGM), a ser aplicada na fase de projeto executivo de empreendimentos hidrelétricos, está baseada na experiência adquirida em outros projetos, tendo como base metodológica o sistema RMR de Bieniawski (1989), incluindo os conceitos de preparo e tratamento de fundação no ajuste dos pesos relativos para qualificação do maciço rochoso.

O maciço rochoso poderá apresentar determinadas características, verificadas a partir da análise das prospecções e mapeamentos geológico-geotécnicos, favoráveis e previsíveis de melhoria a partir da aplicação de determinados tratamentos superficiais e subsuperficiais. Portanto, constitui uma resposta positiva aos tratamentos previstos em projeto, recebendo dessa forma, ajuste positivo na pontuação de qualificação do maciço rochoso.

Segundo Mattos *et al.* (1984), “anomalias relevantes são situações especiais de fundação geradas por condicionantes geológico-geotécnicos, identificadas somente nas fases de implantação da obra”. Critérios de projeto são intimamente relacionados com o nível de conhecimento do comportamento geomecânico do maciço rochoso, no entanto as investigações para projeto, na grande maioria das vezes, são insuficientes para uma determinação precisa dos critérios de preparo e tratamento a serem aplicados nas fundações.

Atividades de preparo de fundação para implantação de estruturas de concreto em projetos hidrelétricos exigem, quase sempre, trabalhos intensos a fim de garantir as condições de suporte e aderência requeridas em projeto e nem sempre é possível formular critérios simples de preparo de fundação, sobretudo quando se convive com maciços rochosos de grande complexidade geológico-estrutural (MATTOS *et al.* 1984).

Os parâmetros/índices e os respectivos pesos (pontos) da classificação formulada para as fases de Projeto Viabilidade e Básico são reavaliados, e as anomalias relevantes e previsíveis de ocorrer na fase de implantação da obra, objetos de análises e tratamentos, podem ser incorporadas na classificação. Dessa forma, a Classificação de Maciço Rochoso - Fase de Projeto Executivo (Obra), para aplicação em Empreendimentos Hidrelétricos, tem a seguinte formulação:

- (1) Os parâmetros classificatórios são determinados por ocasião do mapeamento geológico-geotécnico para liberação de fundação, respaldados nas sondagens mecânicas e nos ensaios geotécnicos executados nas fases anteriores do projeto;
- (2) Foram mantidos os mesmos quatro parâmetros/índices geotécnicos da Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos – Fase de Projeto (Viabilidade e Básico), entretanto, sofreram algumas mudanças na forma de obtenção;
- (3) Incluem-se dois índices para ajustes dos pesos relativos (pontos) na classificação, com valores negativos e positivos:
 - Negativos, referentes à atitude e persistência das discontinuidades, reduzindo o valor dos pontos obtidos da soma dos quatro parâmetros/índices classificatórios;
 - Positivos, decorrentes de tratamentos superficiais e subsuperficiais previstos no projeto ou indicados no campo por critérios geológico-geotécnicos, aplicados na obra, majorando o valor dos pesos/pontos obtidos da soma dos quatro parâmetros/índices classificatórios.

7.2.2. Obtenção dos parâmetros/índices classificatórios e ajustes nos pesos adotados

a) Resistência da rocha intacta

O parâmetro resistência da rocha intacta é obtido, a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão simples e/ou carga puntiforme. Na Tabela 7.1, constam correlações entre as resistências à compressão simples e puntiforme e pesos relativos adotados na classificação para rochas consistentes. Em se tratando de maciços de rochas brandas, os pesos relativos são obtidos com base em ensaios de compressão simples, de acordo com a Tabela 7.2.

b) Fraturamento

O grau de fraturamento para rochas consistentes é obtido em furos de sondagem rotativa, defasado de um grau, conforme utilizado no APM Manso (Furnas, 2002), mostrado na Tabela 7.3.

Citada pela (ABGE/CBMR, 1983), as dimensões dos blocos de rocha resultam da intensidade de fraturamento do maciço e da orientação das discontinuidades. Não existindo sondagem na área para obtenção do grau de fraturamento, deverá ser adotado o tamanho dos blocos da fundação, determinado conforme sugere a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM 1981), pela densidade de discontinuidades por volume (J_v), obtida por meio da

contagem de descontinuidades em uma família individual (número de descontinuidades por metro) ao longo de uma linha de 5 a 10 m de comprimento de amostragem, normal às descontinuidades. A partir das expressões 2.3 e 2.4, determina-se o índice volumétrico J_v (número total de descontinuidades por unidade de comprimento), que interceptam uma unidade de volume do maciço rochoso (1 m^3). Na CGM assume pesos relativos, conforme Tabela 7.10.

Tabela 7.10. Tamanho dos blocos em função da densidade de descontinuidades por volume e peso relativo adotado.

Discriminação	Blocos muito grandes	Blocos grandes	Blocos médios	Blocos pequenos	Blocos muito pequenos
J_v (descontinuidades/ m^3)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 30	>30
Peso Relativo	30	25	20	15	10 - 5

O RQD, originalmente obtido em testemunhos de sondagem, é também determinado de forma semi-empírica, conforme proposto por Palmström (1982), com auxílio de trena e da expressão 2.2. Dessa forma, para maciços de rochas brandas, o RQD deverá ser adotado com valores inteiros múltiplos de 5, em substituição ao índice de fraturamento, com pesos relativos da Tabela 7.4.

c) Características das descontinuidades

As características das descontinuidades são reavaliadas por ocasião do mapeamento geológico-geotécnico da fundação, no sentido de identificar a família mais importante para a situação específica. O ângulo de atrito da descontinuidade representativa da família é obtido, conforme proposto por Barton e Choubey (1978), a partir dos índices de rugosidade (J_r) e de alteração (J_a) das paredes da descontinuidade, do sistema Q (Tabelas 2.9 e 2.10) e expressão (3.14). O peso relativo na CGM é obtido, conforme Tabela 7.5.

d) Permeabilidade

A classe de permeabilidade é determinada, a partir dos ensaios de perda d'água nos furos de sondagem rotativa, e na falta desses por similaridade de áreas de mesmas características geotécnicas (padrão de fraturamento). As classes de permeabilidade e os respectivos pesos relativos (pontos) adotados na CGM, constam na Tabela 7.6.

e) Ajuste da atitude e persistência das descontinuidades

O ajuste das discontinuidades e pesos relativos (pontos) adotados na CGM constam na Tabela 7.7.

f) Ajuste positivo decorrente de características favoráveis e previsíveis de melhoria, a partir da aplicação na obra de determinados tratamentos superficiais e subsuperficiais.

A Figura 7.1 mostra situações de discontinuidades e irregularidades mais comuns encontradas em maciço rochoso de fundação de barragens; os tratamentos superficiais normalmente aplicados e os ajustes positivos decorrentes dos tratamentos constam na Tabela 7.11. Tais ajustes positivos devem ser determinados para cada situação de tratamento aplicado na fundação e objeto de aferição futura, a partir da experiência de casos e das situações específicas encontradas. Maciços rochosos assumem melhorias nos parâmetros geomecânicos, após ter se submetido aos seguintes tratamentos:

- Limpeza da superfície de fundação e das discontinuidades com remoção dos preenchimentos e aplicação de calda ou argamassa de cimento nas fraturas abertas, bem como injeções de consolidação, que normalmente são aplicadas nos primeiros 5 m de profundidade, direcionadas para detectar as fraturas abertas, ocasionam melhorias na coesão do maciço rochoso. Conforme apresentado na Tabela 7.11, essas atividades correspondem às situações 7.2-1 e 7.2-2, com ajuste no peso relativo de + (mais) 5 pontos;
- Tratamento de caixa de falha, situação 7.2-5, com remoção de blocos e materiais incoerentes e posterior preenchimento com concreto, ocasionam melhoria de no mínimo atingir o módulo de deformabilidade da rocha encaixante, com ajuste no peso relativo de + (mais) 5 pontos;
- Depressões com fraturas abertas em áreas restritas da fundação, conforme situação 7.2-6; as injeções melhoram a coesão (2 pontos) e a laje de concreto aplicada melhora o contato da superfície (1 ponto), totalizando ajuste de + (mais) 3 pontos;
- Descontinuidades de baixo mergulho, situação 7.2-7, cujo tratamento é o preenchimento com argamassa ou calda de cimento e retaludamento com concreto, se constitui situação similar a 7.2-1, portanto o ajuste é de + (mais) 3 pontos.

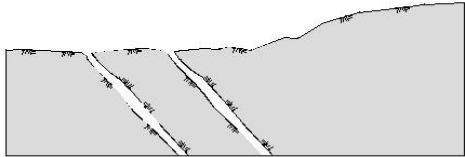
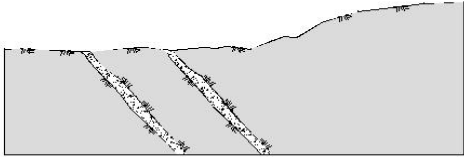
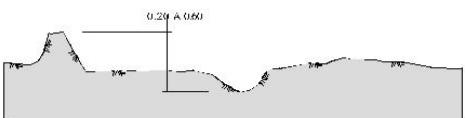

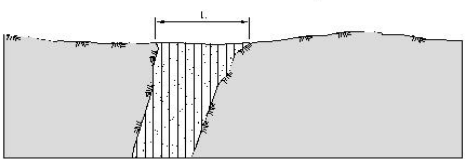
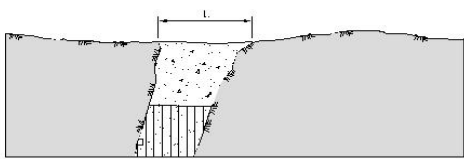
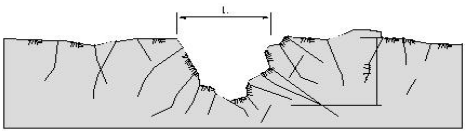
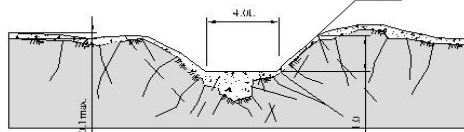

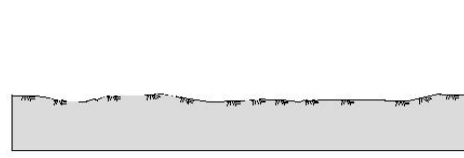
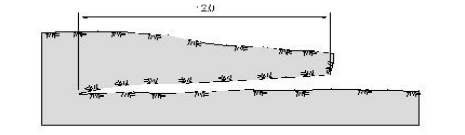
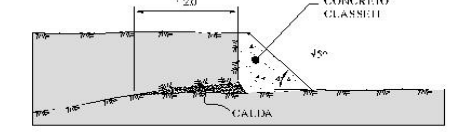
ESQUEMAS DOS TIPOS DE TRATAMENTOS		
ANTES DO TRATAMENTO		APÓS O TRATAMENTO
		
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
FRATURAS ABERTAS	1	CALAFETAÇÃO COM CALDA DE CIMENTO OU ARGAMASSA FLUIDA
		
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
SUPERFÍCIES IRREGULARES	2	REGULARIZAÇÃO COM CONCRETO CLASSE II (15 MPa)
		
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
CAIXAS DE FALHA COM PREENCHIMENTO DE SOLO E BLOCOS	3	A PREFERÊNCIA É A REMOÇÃO TOTAL DA FRATURA. CASO NÃO SEJA POSSÍVEL EXECUTAR A REMOÇÃO MINIMA DE 4 L DE PROFUNDIDADE; PREENCHIMENTO DA CAVIDADE COM CONCRETO CLASSE II; INJEÇÕES EVENTUAIS
		
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
ZONAS COM FRATURAS ABERTAS E DEPRESSÕES	4	RETALUDAMENTO A 45°; REGULARIZAÇÃO COM CONCRETO CLASSE II; INJEÇÕES RASAS E EVENTUAIS
		
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
SALIÊNCIAS EM SUPERFÍCIES NÃO ESCAVADAS	5	DESMONTE A FOGO PARA REGULARIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO
		
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
DESCONTINUIDADES ABERTAS DE BAIXO MERGULHO	6	CORTE VERTICAL; ENCHIMENTO COM ARGAMASSA OU CALDA DE CIMENTO; RETALUDAMENTO COM CONCRETO CLASSE II (15 MPa)

Figura 7.1. Descontinuidades e irregularidades do maciço rochoso e tratamentos superficiais aplicados (Modificado de CNEC Engenharia, UHE Serra do Facão, desenho: NE-218-BP-014-DE-0601).

A percolação por fraturas abertas pode desencadear processos de erosão, nos preenchimentos, nas paredes das descontinuidades e até mesmo atingir o maciço da barragem. Em se tratando de barragens de terra, o processo de erosão interna avança em forma de tubo, sendo denominado de *piping*. Em barragens, são projetadas cortinas de injeção que têm como principais funções:

- Reduzir as percolações pela fundação;
- Preencher as fraturas abertas, de forma a minimizar riscos de erosão regressiva (*piping*);
- Homogeneizar as percolações, de forma a não concentrar fluxos d'água, sobretudo no espaldar de jusante.

Conforme Cruz (1996), maciços rochosos com permeabilidade média inferior a $5,0 \times 10^{-4}$ cm/s não necessitam de tratamentos para redução da permeabilidade. A permeabilidade média residual dos maciços injetados aproxima-se de 10^{-4} cm/s. Levis (2006) menciona a experiência de Guidicini e Andrade (1983), que acreditam que trabalhos de injeção atinjam os seguintes níveis, dependendo do compartimento geológico:

- Descontinuidades com grande expressão lateral (contatos, junta-falhas, faixas fraturadas significativas) e muito permeáveis, o tratamento é eficaz e conduz o meio tratado a uma permeabilidade residual não inferior a 5×10^{-4} cm/s;
- Em horizontes do maciço com permeabilidade superior a 5×10^{-4} cm/s, o tratamento é eficaz e reduz o coeficiente para um valor igual à metade da inicial, mas nunca inferior a 5×10^{-4} cm/s;
- Em horizontes ou descontinuidades que já possuem permeabilidade inferior a 5×10^{-4} cm/s, o tratamento é ineficaz.

A experiência tem mostrado, com raras exceções, que dificilmente as cortinas de injeção de impermeabilização em barragens reduzem a permeabilidade para valores inferiores a $1,0 \times 10^{-4}$ cm/s. Permeabilidade nessa faixa absorve água, mas não calda de cimento, quando injetada com pressão máxima de 0,025 MPa por metro de profundidade. Dessa forma, a execução de cortina de injeção condiciona a melhoria no parâmetro permeabilidade, sem entretanto, mudar de faixa P4 para P5 dos índices classificatórios (Tabela 7.12); portanto, o ajuste no peso relativo é de + (mais) 3 pontos, não atingindo a pontuação máxima para mudança de faixa que é de + (mais) 5 pontos.

Cortinas de injeção de cimento e de drenagem são duas formas de tratamento interdependentes. De acordo com Cruz (1996), o sistema de drenagem das fundações é de fundamental importância no controle do fluxo d'água de percolação e a vedação deve ser

considerada como uma segunda linha de defesa e, em nenhum caso, como a única linha de defesa. Na CGM, considerando-se a eficiência da cortina de injeção, o ajuste é de + (mais) 2 pontos, visto que, somando-se ao ganho com a execução, atingiria a pontuação máxima de mudança de faixa, que é + (mais) 5 pontos.

Tabela 7.11. Ajustes decorrentes de tratamentos superficiais e subsuperficiais.

Situação detectada por ocasião do preparo de fundação e do mapeamento geológico-geotécnico para liberação de fundação.	Tratamentos previsíveis de serem aplicados na fundação	Ajuste Peso relativo
7.2-1. Presença de fraturas aleatórias descontínuas abertas, zonas estilhaçadas decorrente de fogo, reentrâncias e saliências inclusive pequenos taludes negativos.	Preencher com calda de cimento e concreto dental, conforme tratamentos tipos 1 e 2 da Figura 7-1.	+ (mais) 2
7.2-2. Presença de sistema de fraturas contínuas e abertas com ou sem preenchimentos nos cinco primeiros metros de profundidade.	Limpeza com jatos de ar e água Injeções rasas e de consolidação	+ (mais) 3
7.2-3. Descontinuidades abertas em profundidade, injetáveis através da cortina de injeção, de forma a homogeneizar as percolações pela fundação.	Cortina de injeção e furos de controle	+ (mais) 3
7.2-4. Descontinuidades abertas em profundidade, não injetável através da cortina de injeção, com concentração de fluxo sob pressão.	Cortina de drenagem e eventuais poços de alívio	+ (mais) 2
7.2-5. Descontinuidades tipo caixa de falha com material incoerente, conforme similar ao tipo 3, Figura 7-1.	Tratamentos previstos nas dimensões da caixa, conforme tratamento tipo 3 da Figura 7-1	+ (mais) 5
7.2-6. Depressões com fraturas abertas em áreas restritas da fundação.	Tratamentos previstos de acordo com as dimensões da caixa, conforme tratamento tipo 4, da Figura 7-1.	+ (mais) 3
7.2-7. Descontinuidade aberta de baixo mergulho.	Tratamentos previstos, conforme tipo 6 da Figura 7-1. Obs.: Concreto com resistência a compressão simples de 15MPa.	+ (mais) 2
Obs.: O peso relativo de ajuste é a soma dos pontos obtidos para cada tratamento aplicado.		

7.2.3. Determinação da classe do maciço rochoso durante a fase de projeto executivo

A classificação geomecânica do maciço rochoso de fundação (CGM), para fins de avaliação dos critérios de projeto de determinado empreendimento hidrelétrico ou área específica desse, deverá ser aplicada para as duas situações, decorrente do estado em que a obra se encontra:

- (1) Determina-se a classe do maciço rochoso de fundação (de fato), conforme 7.1.3, a partir da soma dos cinco parâmetros/índices, inclusive o (e) de ajuste das descontinuidades, utilizando as Tabelas 7.12 e 7.13;
- (2) Após conclusão dos tratamentos previstos em projeto e por critérios geológico-geotécnicos definidos no campo, conforme citado por Mattos *et al.* (1984), avalia-se a melhoria dos parâmetros geomecânicos do maciço rochoso de fundação, com base na real eficiência dos

tratamentos aplicados. Sobre a pontuação mencionada em (1), aplica-se a soma dos pontos do ajuste positivo obtidos da Tabela 7.11, determinando-se finalmente, a classe do maciço rochoso tratado, com base na Tabela 7.13.

Tabela 7.12. Parâmetros/índices classificatórios e pesos relativos para determinação da classe do maciço rochoso

1.1. Resistência à Compressão Uniaxial da Rocha Intacta – Consistente (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	≤ 25		
Peso Relativo (pontos)	30	25	20	15	10		
1.2. Resistência Compressão Uniaxial da Rocha Intacta - Branda (MPa)	20	20 - 10	10 - 5	5 - 1	< 1		
Peso Relativo (pontos)	10	8	5	3	1		
2.1. Fraturamento	F0	F1	F2	F3	F4		
2.2. RQD (%) (Rocha Branda)	> 75	50 - 75	25 – 50	10 - 25	< 10		
Peso Relativo (pontos)	30	25	20	15	5		
3. Características das Descontinuidades	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V		
					Ângulo de atrito (φ) ≤ 20°		
	φ > 35°	35° ≥ φ > 30°	30° ≥ φ > 25°	25° ≥ φ φ > 20°	20° ≥ φ > 15°	15° ≥ φ > 10°	φ ≤ 10°
Peso Relativo	20	15	10	5	3	2	0
4. Classe de Permeabilidade	P1	P2	P3	P4		P5	
Permeabilidade Equivalente (cm/s)	K < 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ ≤ K < 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ ≤ K < 5x 10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁴ ≤ K < 10 ⁻³		≥ 10 ⁻³	
Peso Relativo (pontos)	20	15	10	5		0	
5. Ajuste das Descontinuidades.	Muito Favorável (I)	Favorável (II)	Aceitável (III)	Desfavorável (IV)		Muito Desfavorável (V)	
Peso Relativo (pontos)	0	-2	-5	-10		-12	

Tabela 7.13. Abrangência dos pesos relativos e correspondentes classes de maciço rochoso

Pesos Relativos (pontos)	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe de Maciço	CGM-1	CGM-2	CGM-3	CGM-4	CGM-5

A classificação geomecânica do maciço rochoso de fundação (CGM), conforme citado (2), constitui-se em uma ferramenta importante e ganha enfoque em situações de projetos de barragem, em que a estabilidade de determinada estrutura está atrelada à melhoria do coeficiente de segurança, com a execução de tratamentos de fundação. Dessa forma, os ajustes (pontos) decorrentes dos tratamentos aplicados (Tabela 7.11) deverão ser objeto de avaliação, a partir da experiência com maior número de casos.

Determinado maciço rochoso poderá ser mais ou menos injetável, bem como a cortina de drenagem ou poços de alívio serão ou não eficientes e responderão, positivamente, às necessidades de redução de subpressões? Qual o ganho no módulo de deformabilidade com o tratamento de uma caixa de falha, ou mesmo da coesão do maciço rochoso com as injeções de consolidação e tratamentos de juntas abertas? De forma que estas questões carecem de maiores análises e serão respondidas para cada caso, a partir de ensaios de controle de campo e de laboratório.

Testes de injetabilidade, ensaios de controle das cortinas de injeção e drenagem, ensaios de cisalhamento etc. são normalmente empregados para avaliar o comportamento de determinado maciço rochoso, frente aos tratamentos mencionados, devendo se constituir no primeiro momento do projeto executivo, as principais fontes de pesquisa para estas questões.

7.3. Aplicação da proposta classificação geomecânica de maciços rochosos (CGM)

A classificação geomecânica de maciços rochosos proposta para as fases de viabilidade e projeto básico foi aplicada:

- (1) Em rochas ígneas consistentes, riolitos do maciço rochoso de fundação de duas estruturas do AHE Jirau, em fase de desenvolvimento do projeto básico: barragem de concreto e tomada d'água/casa de força;
- (2) Em rochas metamórficas consistentes, mica-xistos da UHE Serra do Facão, em fase de projeto executivo com a obra em andamento para as situações:
 - Com obtenção dos parâmetros classificatórios por meio de sondagens rotativas, simulando, portanto, a fase de projeto da tomada de desvio;
 - Determinação dos parâmetros classificatórios, com base no mapeamento geológico-geotécnico de fundação, com apoio em sondagens rotativas em xistos consistentes, com intercalações de grafita-xistos, localmente caracterizadas como rochas brandas, presentes nas fundações das estruturas de concreto e barragens de terra e rocha da UHE Serra do Facão, referência (Setembro/008).

7.3.1. AHE Jirau - Barragem de concreto

Adotou-se a forma tradicionalmente utilizada no meio técnico do uso das descrições de sondagens rotativas para determinação da classe de maciço por trecho perfurado. Para tanto, foi aplicada a metodologia descrita no item 7.1, estando apresentada na Figura 7.2 e na Tabela 7.14. As descrições das sondagens e os dados gerais da Proposta de Classificação

Geomecânica de Maciços Rochosos (CGM) para a Barragem de concreto encontram-se no Apêndice B.

Tabela 7.14. AHE Jirau - Barragem de concreto: Síntese dos resultados da CGM, fase de viabilidade e projeto básico.

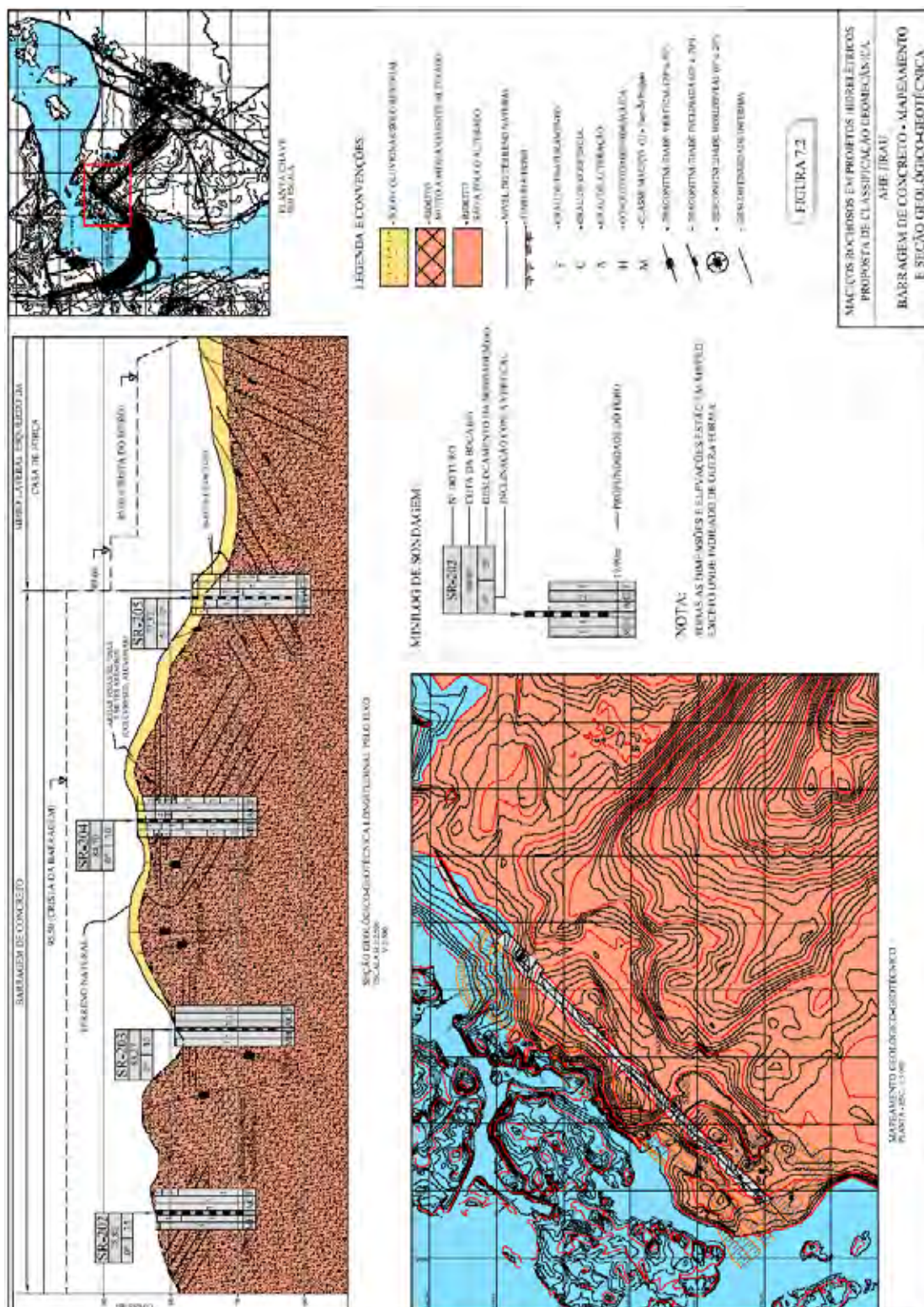
Sondagem	Trecho (m)	Pontos	Classe	Sondagem	Trecho (m)	Pontos	Classe
SR-202	0,90-2,30	88	CGM-1	SR-204	4,75-10,04	70	CGM-2
SR-202	2,30-3,05	83	CGM-1	SR-204	10,04-12,34	87	CGM-1
SR-202	3,03-15,23	93	CGM-1	SR-204	12,34-14,98	77	CGM-2
SR-203	0,10-15,20	88	CGM-1	SR-205	4,36-5,95	40	CGM-4
SR-204	2,50-3,18	40	CGM-4	SR-205	5,95-7,40	78	CGM-2
SR-204	3,18-3,83	73	CGM-2	SR-205	7,40-15,15	80	CGM-2
SR-204	3,83-4,75	15	CGM-5	-	-	-	-

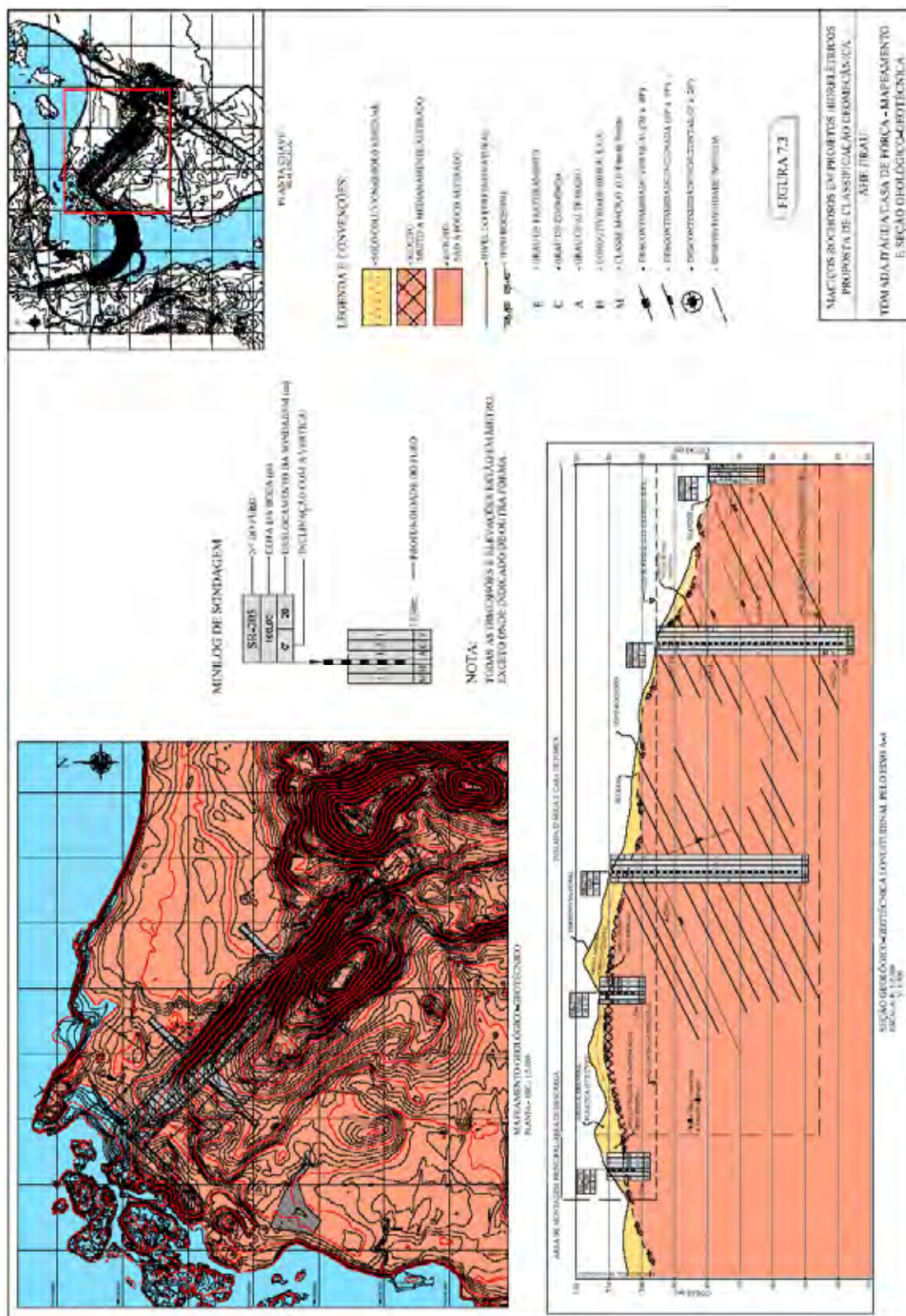
7.3.2. AHE Jirau - Tomada d'água/Casa de força

Da mesma forma empregada para a Barragem de concreto, foram utilizadas as descrições das sondagens rotativas e aplicou-se a metodologia descrita em 7.1, para determinação da classe de maciço por trecho perfurado, estando a CGM (projeto) da Tomada d'água/Casa de força apresentada na Figura 7.3 e sintetizada na Tabela 7.15. As descrições das sondagens e os dados gerais da Proposta de Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos para a Tomada d'água/Casa de força, encontram-se no Apêndice B.

Tabela 7.15. AHE Jirau - Tomada d'água/Casa de força: Síntese dos resultados da CGM, fase de viabilidade e projeto básico.

Sondagem	Trecho (m)	Pontos	Classe	Sondagem	Trecho (m)	Pontos	Classe
SR-205	4,36-5,95	40	CGM-4	SR-270	48,31-51,59	88	CGM-1
SR-205	5,95-7,40	78	CGM-2	SR-270	51,59-52,35	78	CGM-2
SR-205	7,40-15,15	80	CGM-2	SR-270	52,35-56,11	88	CGM-1
SR-270	0,00-11,70	78	CGM-2	SR-276	2,43-10,00	80	CGM-2
SR-270	11,70-15,67	78	CGM-2	SR-276	10,00-58,28	88	CGM-1
SR-270	15,67-45,25	88	CGM-1	SR-277	4,10-5,84	60	CGM-3
SR-270	45,25-46,20	83	CGM-1	SR-277	5,84-11,90	78	CGM-2
SR-270	46,20-47,40	88	CGM-1	SR-278	6,10-7,27	40	CGM-4
SR-270	47,40-48,31	83	CGM-1	SR-278	7,27-11,25	65	CGM-2





7.3.3. UHE Serra do Facão - Barragem de concreto e Barragens do leito do rio e margem direita

Aplicou-se a CGM, fases de Projeto de Viabilidade e Básico, conforme descrito no item 7.3.1, utilizando-se sondagens rotativas executadas para projeto: SR-05, 06, 55, 57, 101, 102, 103, SRBL02 (Fls. 1/2, 2/2), SRBL03, SRBL04, SRBL05, SRBL06, SRMJ e SRMM. Os resultados desse estudo estão apresentados nas seções e tabelas constantes das Figuras 7-5, 7-7 e 7-8, tanto para a Barragem de concreto como para as Barragens do leito do rio e margem direita. Os dados gerais da proposta classificação geomecânica do maciço rochoso (CGM) destas estruturas encontram-se na forma de tabelas no Apêndice B e os perfis individuais (logs) constam no Apêndice C.

7.4. Aplicação da CGM durante a fase de projeto executivo na UHE Serra do Facão

Foram escolhidas para aplicação da CGM, fase de Projeto Executivo (obra), as estruturas da barragem principal, que se localizam na margem direita e leito do rio, abrangendo três blocos de concreto (Bloco 6, Bloco 7, onde será implantado o vertedouro, e Muro de encontro da barragem do leito do rio), e a Barragem do leito do rio e da margem direita. Os valores dos parâmetros/índices classificatórios foram obtidos com base no mapeamento geológico-geotécnico da superfície de fundação, de acordo com a metodologia descrita em 7.2, e apoio nas sondagens citadas em 7.3.3.

7.4.1. UHE Serra do Facão – Fundação da barragem de concreto

A CGM da superfície de fundação está mostrada no mapeamento geológico-estrutural das principais discontinuidades da fundação, em planta e seções (Figuras 7.4 e 7.5). Os pontos e classes do CGM referem-se à pontuação básica, sem a incidência dos ajustes decorrentes da aplicação dos tratamentos superficiais e subsuperficiais, ora em execução (referência setembro/2008), sintetizado na Tabela 7.16.

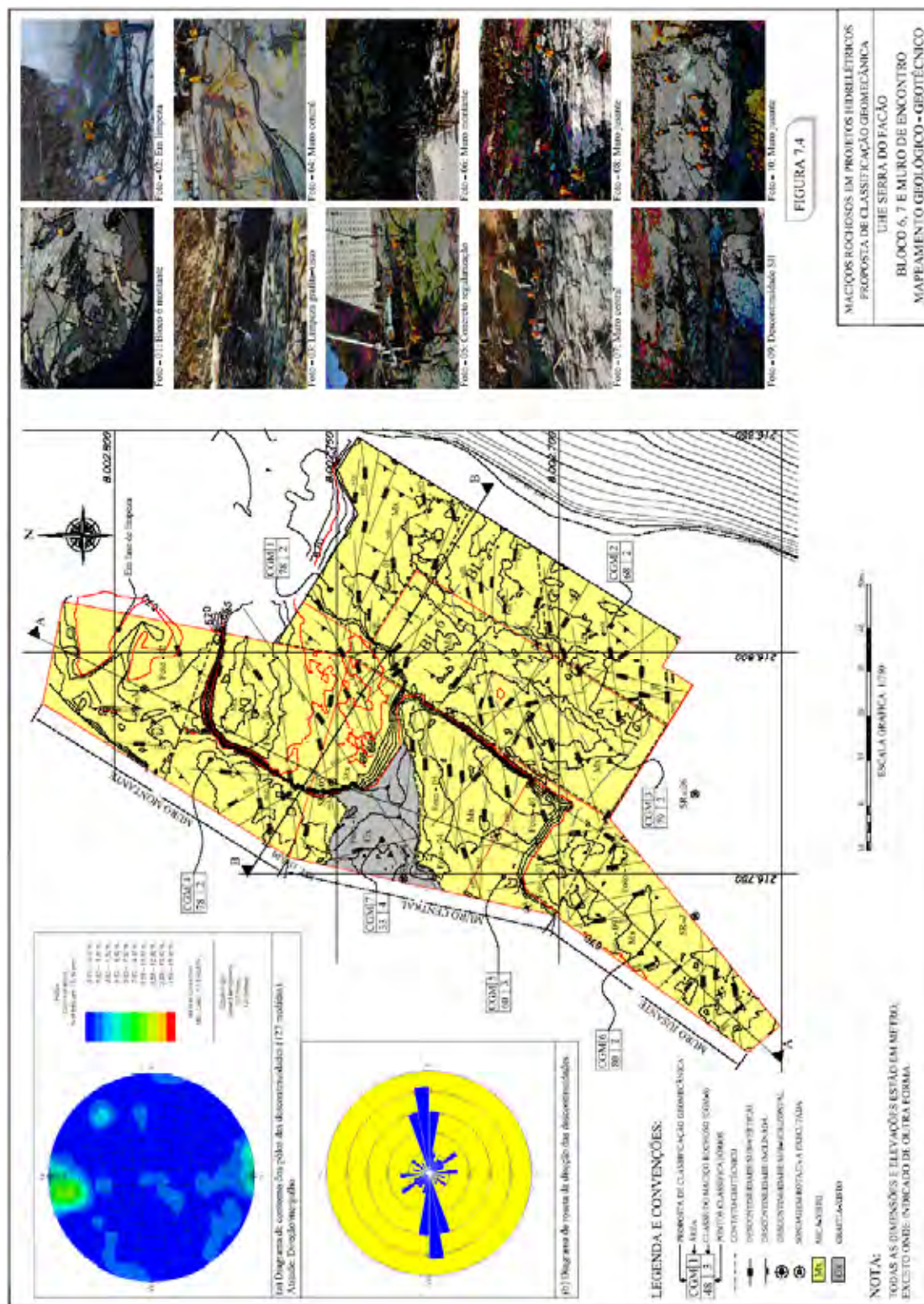


Tabela 7.16. UHE Serra do Facão - Barragem de concreto: Síntese da CGM (básica)

Localização		Res. Rocha intacta		Fraturamento		Condição das Descont.	Classe de Permeab.	Ajuste da Descont.	CGM	
Estruturas de Concreto	Área	Rocha Consistente	Rocha Branda	Rocha Consistente	RQD Rocha Branda				Pontos	Classe
Blocos 6-7	1	25		25		15	15	-2	78	CGM-2
Blocos 6-7	2	25		20		10	15	-2	68	CGM-2
Blocos 6-7	3	28		28		10	15	-2	79	CGM-2
Muro mont.	4	30		23		10	15	0	78	CGM-2
Muro central.	5	25		20		5	15	-5	60	CGM-3
Muro jusante.	6	25		25		15	15	0	80	CGM-2
Muro central.	7		3		20	10	10	-10	33	CGM-4

A CGM do maciço rochoso, fase de projeto executivo (obra), conforme item 7.2.2, inclui os ajustes decorrentes da aplicação dos tratamentos de fundação, majorando os pontos da classificação básica, estando previsto para cada área, com características geomecânicas similares da Barragem de concreto, os tratamentos com os respectivos pontos, indicados na Tabela 7.17.

Tabela 7.17. UHE Serra do Facão - Barragem de concreto: CGM fase de projeto executivo (obra) – Ajustes decorrentes dos tratamentos de fundação

Ajustes decorrentes dos tratamentos superficiais e subsuperficiais - referência Tabela 7-1 e Figura 7-1									
Barragem de concreto - CCR	Área	Identificação do tratamento de acordo com a Tabela 7-1 e Figura 7-1							Total Pontos
		7.2.1	7.2.2	7.2.3	7.2.4	7.2.5	7.2.6	7.2.7	
Blocos 6-7	1	2		3	2				7
Blocos 6-7	2	2		3	2				7
Blocos 6-7	3	2		3	2				7
Muro montante	4	2		3	2				7
Muro central.	5	2		3	2				7
Muro jusante	6	2			2				4
Muro central	7	2		3	2				7

Incidindo sobre a pontuação básica de cada área os pontos obtidos dos ajustes (Tabela 7.17), obteve-se a pontuação final e as respectivas classes (CGM) do maciço rochoso de fundação (Tabela 7.18).

Tabela 7.18. UHE Serra do Facão - Barragem de concreto: CGM fase de projeto executivo (obra)

CGM (Básica)			CGM - Projeto executivo (Obra)		
Estrutura	Área	Pontos	Ajuste dos Tratamentos de Fundação	Pontos	Classe (CGM)
Blocos 6-7	1	78	7	85	1
Blocos 6-7	2	68	7	75	2
Blocos 6-7	3	79	7	86	1
Muro montante	4	78	7	85	1
Muro central	5	60	7	67	2
Muro jusante	6	80	4	84	1
Muro central	7	33	7	40	4

7.4.2. UHE Serra do Facão - Barragens do leito do rio e margem direita

A classificação geomecânica do maciço rochoso da superfície de fundação mostrada no mapeamento geológico-estrutural com as principais descontinuidades da fundação, apresentado em planta e seções (Figuras 7.6, 7.7 e 7.8), refere-se à pontuação básica e a respectiva classe de maciço rochoso, obtida com base nas sondagens rotativas existentes e apoio no mapeamento da superfície escavada da fundação. Para essa fase, não foram incididos os ajustes decorrentes da aplicação dos tratamentos superficiais e subsuperficiais, ora em execução (referência setembro/2008), sintetizado na Tabela 7.19.

Tabela 7.19 UHE Serra do Facão - Barragem do leito do rio e da margem direita: Classificação geomecânica do maciço rochoso de fundação por meio da CGM

Localização		Resistência Rocha Intacta		Espaçamento das Descontinuidades		Condição das Descontinuidades	Classe de Permeabilidade	Ajuste das Descontinuidades	CGM	
Barragem Leito Rio e Margem Direita	Área	Rocha Consistente	Rocha Branda	Rocha Consistente	RQD Rocha branda				Pontos	Classe
Enrocamento Montante	1	20		20		5	5	-2	48	CGM-3
Núcleo leito do rio	2	25		20		5	15	-5	60	CGM-3
Enrocamento Jusante	3	20		25		5	5	-2	53	CGM-3
Grafito jusante	4		5		15	10	15	-10	35	CGM-4
Núcleo e transição	5	25		20		5	5	-5	50	CGM-3
Espaldar montante	6	15		20		10	5	-2	48	CGM-3
Espaldar jusante	7a		5		15	10	15	-10	35	CGM-4
Espaldar jusante	7b	13		10		10	5	-2	36	CGM-4
Núcleo e trans. E 9-3	8	20		8		10	10	0	48	CGM-3
Espaldar mont. E 9-13	9	15		20		10	5	0	50	CGM-3
Espaldar jus. Est. 9-13	10	13		10		10	5	-2	36	CGM-4
Núcleo Estaca 1-8	11	10		20		10	10	0	50	CGM-3
Espaldar mont. E. 4 - 9	12	10		20		10	10	0	50	CGM-3
Espaldar jus. E. 4 - 9	13	10		20		10	10	0	50	CGM-3
Grafito Núcleo	14		5		15	10	15	-5	40	CGM-4
Grafito Esp. mont-jus.	15		5		15	10	15	-10	35	CGM-4

Tratamentos similares aos da Barragem de concreto foram aplicados na fundação da Barragem do leito do rio e margem direita, região do núcleo, ocasionando sensível melhoria nas características geomecânicas do maciço rochoso, conforme poderá ser visualizado nas Figuras 7.9 e 7.10.



Figura 7.9. Fundação no núcleo da barragem leito do rio em mica-xisto com classe CGM- 3 (60 pontos), em fase inicial de lançamento do concreto dental.



Figura 7.10. Fundação no núcleo da barragem leito do rio em mica-xisto classe CGM-3, com a execução dos tratamentos atinge a classe CGM - 2 (73 pontos).

Os tratamentos superficiais mencionados, de forma similar, foram executados na região do núcleo da Barragem da margem direita, mostrados na Figura 7.6 (Fotos 2 e 3), e ainda os tratamentos subsuperficiais, por meio de injeção de calda de cimento (Detalhes 1 e 2 da Figura 7.7), condicionam ao maciço rochoso melhorias no comportamento hidro-geomecânico retratadas nos ajuste da pontuação da CGM. Os ajustes decorrentes da aplicação dos tratamentos de fundação, previstos para cada área com características geomecânicas similares, estão indicados na Tabela 7.20.

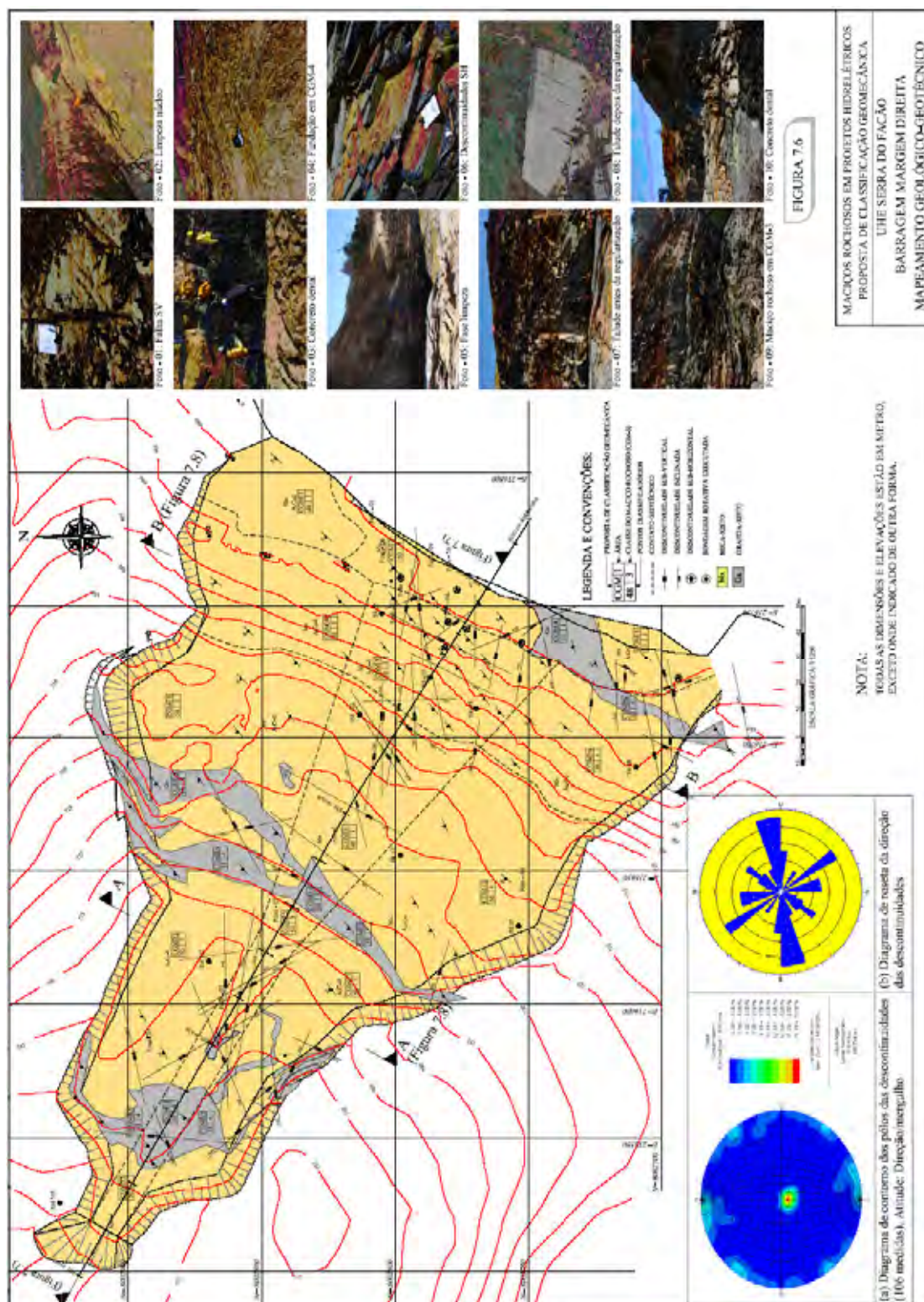
Tabela 7.20. UHE Serra do Facão - Barragem da margem direita: CGM fase de projeto executivo (obra) – Ajustes decorrentes dos tratamentos de fundação

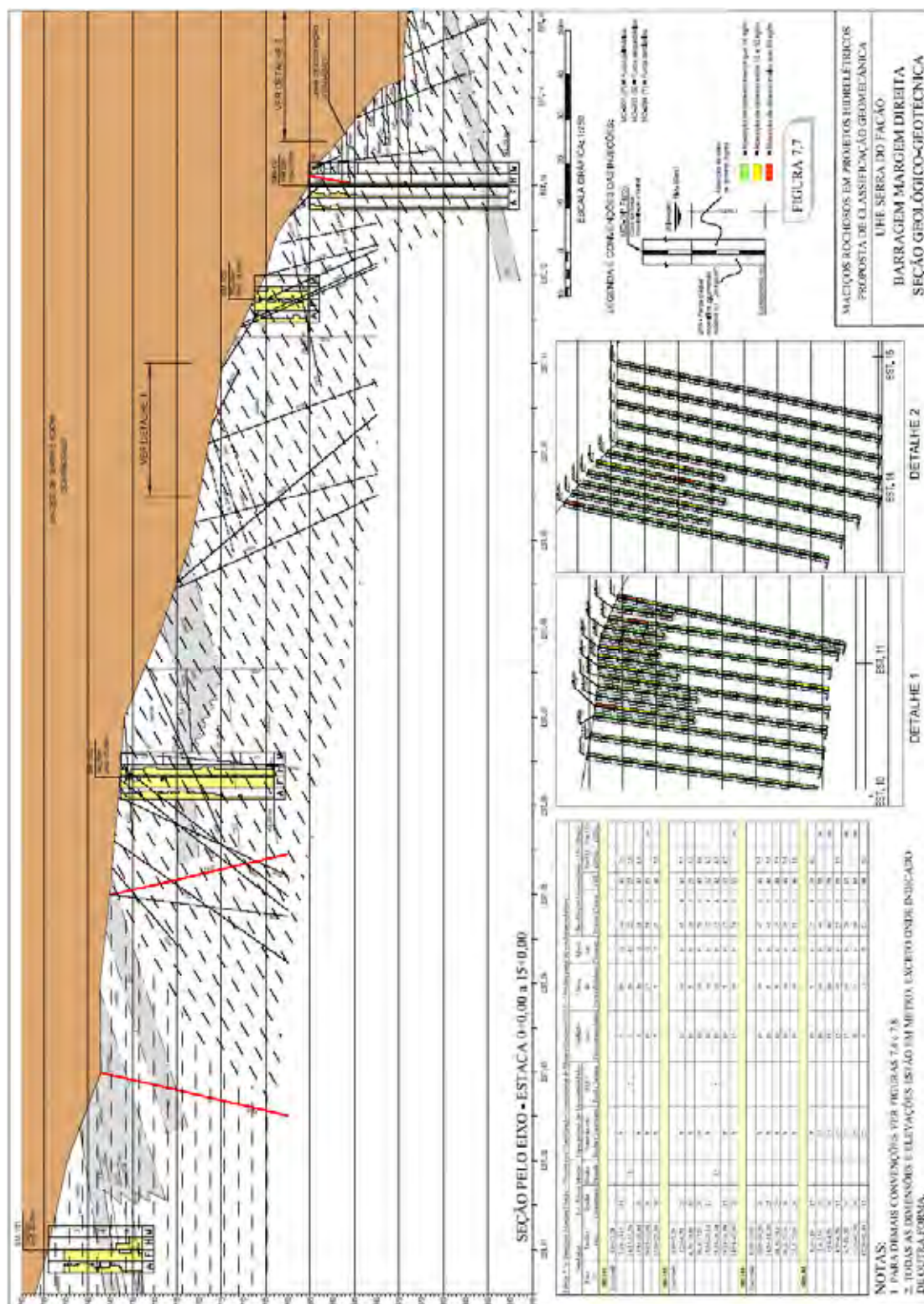
Ajustes decorrentes dos tratamentos superficiais e subsuperficiais - referência Tabela 7-1 e Figura 7-1									
Barragem Leito Rio e Margem Direita	Área	Identificação do tratamento conforme Tabela 7-1 e Figura 7-1							Total Pontos
		7.2.1	7.2.2	7.2.3	7.2.4	7.2.5	7.2.6	7.2.7	
Enrocamento montante	1								0
Núcleo no leito do rio	2	2	3	3			3	2	13
Enrocamento Jusante	3								0
Grafita jusante	4				2				2
Núcleo e transição	5	2		3			3	2	10
Espaldar montante	6								0
Espaldar jusante	7a				2				2
Espaldar jusante	7b								0
Núcleo e trans. Est. 9 -13	8	2		3			3	2	10
Espaldar mont. Est. 9 -13	9								0
Espaldar jus. Est. 9 -13	10								0
Núcleo Estaca 1-8	11	2		3					5
Espaldar mont. Est. 4 - 9	12								0
Espaldar jus. Est. 4 - 9	13								0
Grafita Núcleo	14	2		3				2	7
Grafita Esp. mont e jus.	15				2				2

Para determinação da CGM da fase de Projeto Executivo (obra), utilizou-se o mapeamento da superfície de fundação com apoio nas sondagens existentes, indicadas na Figura 7.6 e cujos perfis se encontram no Apêndice C. Inicialmente, obteve-se a pontuação básica da CGM para cada área mapeada de fundação e, incidindo os pontos obtidos dos ajustes (Tabela 7.20), obteve-se a pontuação final e as respectivas classes CGM do maciço rochoso de fundação, conforme apresentado na Tabela 7.21.

Tabela 7.21. UHE Serra do Facão - Barragem do leito do rio e da margem direita: CGM fase de projeto executivo (obra)

Estruturas		CGM (Básico)		CGM (Obra)		
Barragem Leito Rio e Margem Direita	Área	Pontos	CGM	Ajuste Trat°	Pontos	CGM
Enrocamento Montante	1	48	3	0	48	3
Núcleo leito do rio	2	60	3	13	73	2
Enrocamento Jusante	3	53	3	0	53	3
Grafita jusante	4	33	4	2	35	4
Núcleo e Transição	5	50	3	10	60	3
Espalдар Montante	6	48	3	0	48	3
Espalдар Jusante	7a	33	4	2	35	4
Espalдар Jusante	7b	36	4	0	36	4
Núcleo e Transição Estaca 9 -13	8	48	3	10	58	3
Espalдар Montante Estaca 9-13	9	50	3	0	50	3
Espalдар Jusante Estaca 9-13	10	36	4	0	36	4
Núcleo Estaca 1-8	11	50	3	5	55	3
Espalдар Montante Estaca 4 - 9	12	50	3	0	50	3
Espalдар Jusante Estaca 4 - 9	13	50	3	0	50	3
Grafita Região do Núcleo.	14	38	4	7	45	3
Grafita Espalдар Montante e Jusante	15	33	4	2	35	4





7.5. Determinação do *Geological Stress Index* (GSI), do módulo de deformabilidade (E_m) e correlações com a Proposta Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos (CGM).

A CGM, por ter a mesma base estrutural do RMR, pode ser utilizada para determinação de parâmetros de projeto, por meio da proposta do GSI de Hoek (1994), utilizando as mesmas equações semi-empíricas, assumindo a mesma condição do maciço totalmente seco (na CGM, tem peso de 20 pontos) e sem considerar a orientação das descontinuidades, com peso 0 (zero). Vale observar que este procedimento deve ser utilizado com reservas até se obter experiência mais sólida a partir de maior número de casos com o uso da CGM.

A CGM sendo correlacionada ao GSI para obtenção de parâmetros geomecânicos preliminares, a expressão 2.31 passa a ser expressa conforme:

$$GSI = CGM - 5 \quad (7.1)$$

Dentro dessa mesma concepção e restrições, pode-se utilizar as expressões 3.45 de Bieniawski (1978) e 3.46 de Serafim e Pereira (1983) para estimar valores de módulo de deformabilidade. Na Tabela 7.22, constam os valores do GSI e do módulo de deformabilidade estimados para a Barragem de concreto do AHE Jirau, seguindo essa proposta.

Tabela 7.22. AHE Jirau - Barragem de concreto: GSI e Módulo de deformabilidade estimados com base na CGM.

Sondagem	Trecho (m)	GSI	Em (GPa)	Sondagem	Trecho (m)	GSI	Em (GPa)
SR-202	0,90-2,30	85	76	SR-204	4,75-10,04	72	40
SR-202	2,30-3,05	80	66	SR-204	10,04-12,34	85	74
SR-202	3,03-15,23	90	86	SR-204	12,34-14,98	75	54
SR-203	0,10-15,20	85	76	SR-205	4,36-5,95	59	5,6
SR-204	2,50-3,18	57	5,6	SR-205	5,95-7,40	80	56
SR-204	3,18-3,83	75	46	SR-205	7,40-15,15	82	60
SR-204	3,83-4,75	30	1,3	-	-	-	-

Da mesma forma empregada para a Barragem de concreto, foram estimados os valores do GSI e do módulo de deformabilidade ao longo dos furos da Tomada d'água/Casa de força, estando apresentados na Tabela 7.23.

Tabela 7.23. AHE Jirau - Tomada d'água/Casa de força: GSI e do módulo de deformabilidade estimados obtidos com base na CGM.

Sondagem	Trecho (m)	GSI	Em (GPa)	Sondagem	Trecho (m)	GSI	Em (GPa)
SR-205	4,36-5,95	59	5,6	SR-270	48,31-51,59	85	76
SR-205	5,95-7,40	80	56	SR-270	51,59-52,35	75	56
SR-205	7,40-15,15	82	60	SR-270	52,35-56,11	85	76
SR-270	0,00-11,70	85	56	SR-276	2,43-10,00	85	60
SR-270	11,70-15,67	76	56	SR-276	10,00-58,28	85	76
SR-270	15,67-45,25	85	76	SR-277	4,10-5,84	75	20
SR-270	45,25-46,20	80	66	SR-277	5,84-11,90	80	56
SR-270	46,20-47,40	85	76	SR-278	6,10-7,27	55	5,6
SR-270	47,40-48,31	80	66	SR-278	7,27-11,25	75	30

Conforme empregada para a Barragem de concreto do AHE Jirau, foram estimados os valores do GSI e do módulo de deformabilidade para a fundação da Barragem de concreto da UHE Serra do Facão.

A grafita-xisto, que ocorre, aleatoriamente, no sítio da UHE Serra do Facão, apresenta forte anisotropia, decorrente da sua maior competência, moldando-se com a xistosidade das rochas encaixantes, muitas vezes afetada pelos sistemas de falha, dando contorno às camadas e lentes. Nas ombreiras (níveis mais elevados) e na região do leito do rio, a grafita-xisto foi submetida a intenso intemperismo, com características geotécnicas e geomecânicas típicas de rocha branda.

Citado por Maia (2007), a escolha de um valor de GSI representativo do maciço rochoso deverá obrigatoriamente ser obtido, a partir da análise visual de campo e descritivos dos ábacos, podendo ocorrer casos em que o valor representativo do GSI se situe no intervalo entre diferentes formas figurativas e/ou descritivas dos ábacos.

Considerando as características do maciço constituído de rocha branda, mesmo em camadas descontínuas, configura-se válido o uso do ábaco da Figura 2.8, na estimativa do GSI para maciços rochosos heterogêneos (tipo *Flysch*), caracterizados como pobres. Dessa forma, a grafita-xisto, conforme amostrado em sondagem e exposta em área escavada, Figura 7.4 (Foto 03), se enquadra neste tipo de maciço rochoso.

A expressão 7.1 não se aplica a rocha branda com baixo valor de CGM, visto que ao ser assumido na condição de maciço totalmente seco (Hoek, 1994) o valor da classe CGM majorada não representa a situação deste maciço em se tratando de fundação de barramento hidrelétrico. Desta forma o GSI da área de ocorrência de grafita-xisto na região do Muro central (área 7) foi obtido por meio do ábaco de Marinos e Hoek (2000). Na Tabela 7.24, constam os valores do GSI e do módulo de deformabilidade, determinados para as duas fases da CGM.

Tabela 7.24. UHE Serra do Facão - Barragem de concreto: Determinação do GSI e do Módulo de deformabilidade do maciço rochoso (Em) por meio da CGM.

Localização		CGM (Projeto)			CGM (Obra)		
Bar. CCR	Área	Classe	GSI	Em (GPa)	Classe	GSI	Em (GPa)
Blocos 6-7	1	CGM-2	73	56	CGM-1	80	70
Blocos 6-7	2	CGM-2	63	36	CGM-2	70	50
Blocos 6-7	3	CGM-2	74	58	CGM-1	81	72
Muro montante	4	CGM-2	73	56	CGM-1	80	70
Muro central.	5	CGM-3	55	20	CGM-2	62	34
Muro jusante.	6	CGM-2	75	60	CGM-1	79	68
Muro central.	7	CGM-4	30 (1)	3,8	CGM-3	35 (1)	5,6

(1) Obtido de acordo com a Figura 4-8. Ábacos para maciços rochosos heterogêneos.

Conforme a Barragem de concreto da UHE Serra do Facão, determinou-se o GSI e o módulo de deformabilidade (Em) para as fundações da Barragem do leito do rio e da Margem direita, para as fases de projeto básico e projeto executivo (obra), estando apresentados na Tabela 7.25.

Tabela 7.25. UHE Serra do Facão - Barragem do leito do rio e da margem direita: Determinação do GSI e do Módulo de deformabilidade do maciço rochoso (Em) por meio da CGM.

Estruturas		CGM (Básico)		CGM (Obra)		
Barragem Leito do Rio e Margem. Direita	Área	GSI	Em (GPa)	Ajuste Trat ^o	GSI	Em (GPa)
Enrocamento Montante	1	60	8,9	0	60	8,9
Núcleo	2	65	20	13	78	46
Enrocamento Jusante	3	65	12	0	65	12
Grafita jusante	4	30	3,8	2	32 (1)	4,2
Núcleo e Transição	5	65	10	10	75	20
Espaldar Montante	6	60	8,9	0	60	8,9
Espaldar Jusante	7a	30	3,8	2	32 (1)	4,2
Espaldar Jusante	7b	48	4,5	0	48	4,5
Núcleo e Trans.Est. 9-13	8	53	8,9	10	63	16
Espaldar Mont. Est. 9-13	9	60	10	0	60	10
Espaldar Jus. Est. 9-13	10	48	4,5	0	48	4,5
Núcleo Est. 1-8	11	55	10	5	60	13
Espaldar Mont. Est. 4 - 9	12	55	10	0	55	10
Espaldar Jus. Est. 4 - 9	13	55	10	0	55	10
Grafita Região Núcleo.	14	33 (1)	5,0	7	35 (1)	7,5
Grafita Espaldar Mont. Jusante	15	30 (1)	3,8	2	33 (1)	4,2

Obs. (1) Obtido de acordo com a Figura 4-8. Ábacos para maciços rochosos heterogêneos.

As escavações do Muro de encontro na parte central se restringiram a remoções mecânicas (Figura 7.4, Foto 4), enquanto que nas demais regiões dessa estrutura atingiram níveis mais baixos, em decorrência da presença de descontinuidades sub-horizontais

desfavoráveis, conforme citado no item 5.4.2, presentes em paredes escavadas e remanescentes da fundação, (Figura 7, Fotos 6 a 9). Dessa forma, os valores do GSI e do módulo de deformabilidade são bem mais baixos que nas demais áreas (Tabela 7.24).

Na barragem da margem direita, os valores do GSI e módulo de deformabilidade (Tabela 7.25) são bastante variados e em geral mais baixos que os dos blocos da Barragem de concreto citados. Nessa estrutura, o nível de escavação atingiu somente os horizontes de rocha com características geotécnicas e geomecânicas necessárias para assentar os maciços de terra e rocha, constituindo-se situação previsível (Figura 7.6, Fotos 1 a 10).

Conforme Silveira (2003) citado por CNEC (2008), “os valores de módulos de deformabilidade determinados em ensaios *in situ* em maciços de mica-xisto no estado de Goiás, situam-se entre 7.560 e 17.880 MPa”, bem mais baixos que os encontrados nos mica-xistos (maciço classe CGM-2) da fundação dos Blocos 6 e 7 (Tabela 7.24).

7.6. Comparações e correlações entre RMR e CGM

Compararam-se e correlacionaram-se as classificações CGM e RMR, em três furos típicos do maciço rochoso da UHE Serra do Facão, como mostrado na Figura 7.11. Vale observar que, para os trechos analisados, os valores de RMR são predominantemente menores que os de CGM, acentuando-se para o mica-xisto nas classes de maciço 1 a 3. Rochas estruturadas, xistosas em geral apresentam valores baixos de RQD, constituindo-se no caso em um parâmetro redutor.

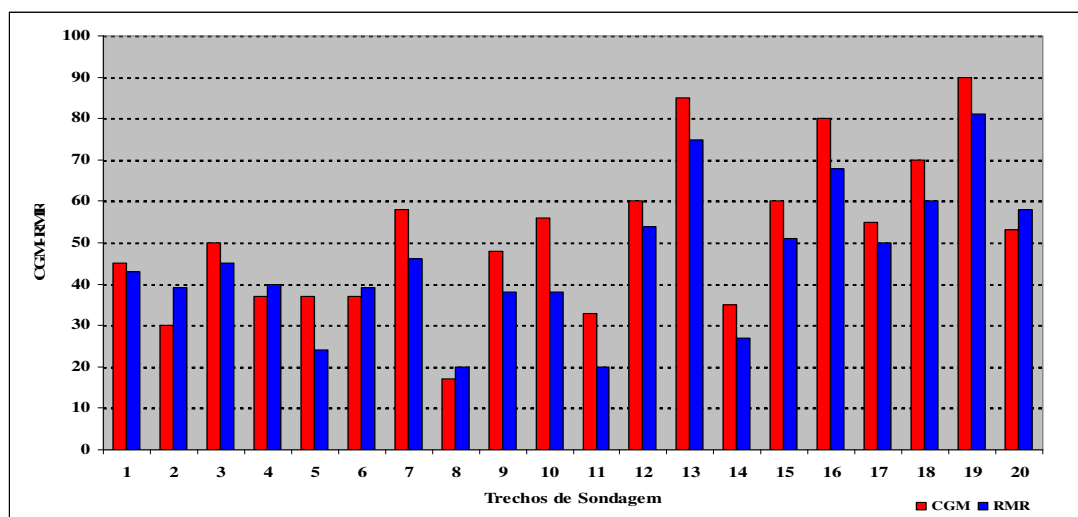


Figura 7.11. Correlação do maciço rochoso da UHE Serra do Facão, sondagens SR102, SRBL-02 e SRBL-04, para CGM - fase de projeto básico e o índice RMR, de Bieniawski (1989).

No gráfico (a) da Figura 7.12, consta a correlação do riolito do AHE Jirau, no gráfico (b), do maciço xistoso da UHE Serra do Facão e no gráfico (c), os dois maciços dos dois projetos.

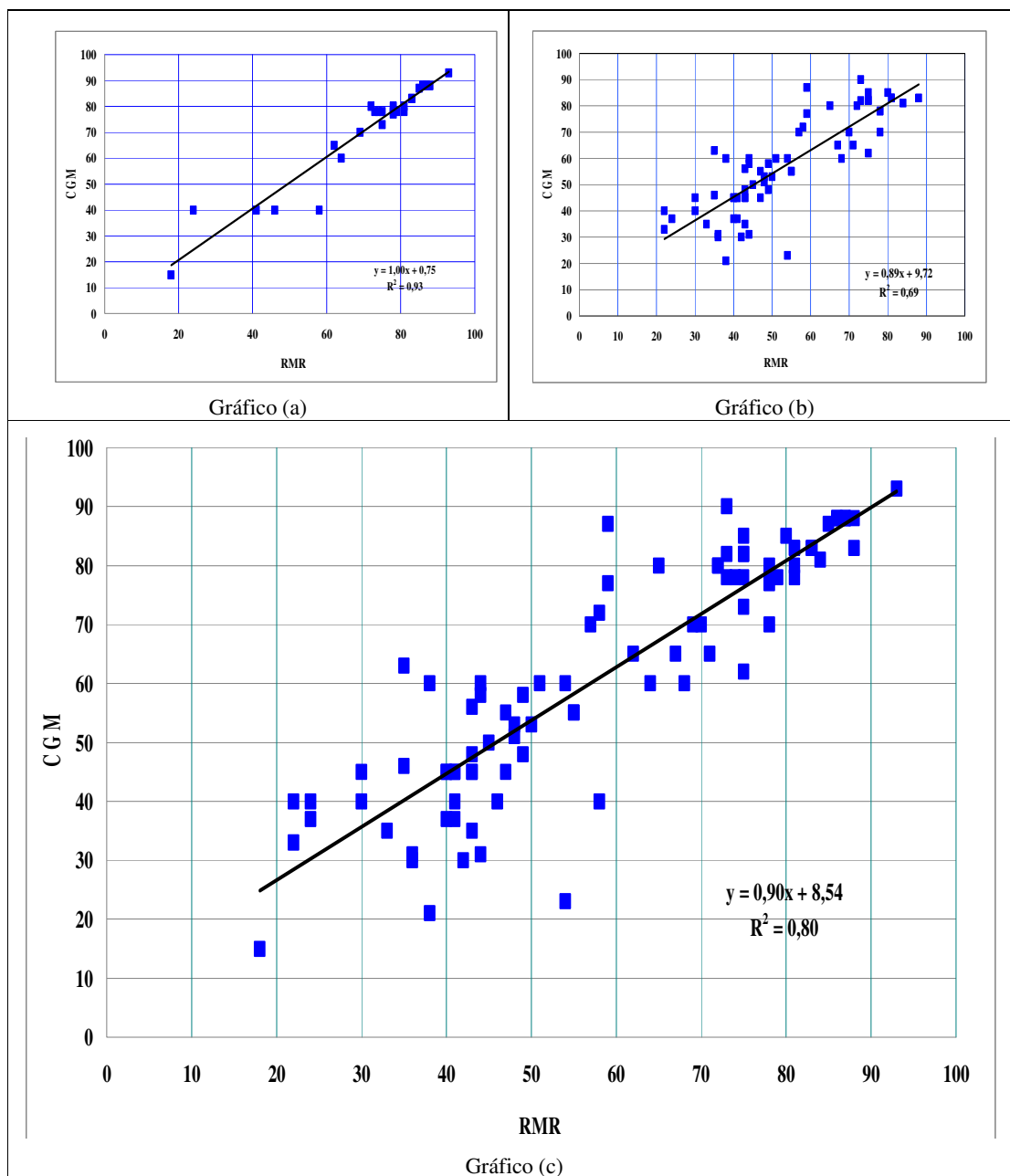


Figura 7.12. Regressão linear entre os sistemas de classificação geomecânica CGM e RMR. Gráfico (a) maciço rochoso do AHE Jirau; Gráfico (b) maciço rochoso da UHE Serra do Facão e Gráfico (c) os maciços dos dois projetos.

Os elementos da regressão linear da Tabela 7.26 mostram que, para o maciço de rocha ígnea consistente do Jirau, o comportamento é praticamente linear entre os dois sistemas, nesse caso, o RQD mais favorável contribui positivamente, enquanto que para os xistos prevalece a situação mostrada na Figura 7.11. Dos resultados apresentados, pode-se concluir que a correlação entre RMR e CGM é bastante significativa, podendo variar em função do tipo de maciço. No entanto, para os maciços avaliados, a CGM se mostrou bastante aderente à sua classificação base (RMR) e diferente da mesma, no máximo em 10 pontos para a aplicação básica, sem tratamentos.

Tabela 7.26. Elementos da regressão linear do maciço rochoso do AHE Jirau e da UHE Serra do Facão, para CGM - fase de projeto básico e o índice RMR (Bieniawski 1989).

AHE Jirau	UHE Serra do facão	Os dois projetos
$CGM = 1,00RMR + 0,8$ $R^2 = 0,93$	$CGM = 0,89RMR + 9,7$ $R^2 = 0,69$	$CGM = 0,90RMR + 8,5$ $R^2 = 0,80$

Capítulo 8

Conclusões e Sugestões para Prosseguimento das Pesquisas

8.1. Considerações

Durante o desenvolvimento desta tese, entre as várias discussões sobre o uso de classificações geomecânicas de maciços rochosos, questionou-se o motivo dessas basicamente serem direcionadas para obras subterâneas. Concluiu-se que:

- O principal fundamento é a obtenção de parâmetros geomecânicos para projetar e executar galerias e cavernas sob as mais diferentes situações e condições litológicas, estruturais, que caracterizam os maciços rochosos;
- Considerando a linearidade dos túneis, nos quais é sempre possível associar aspectos qualitativos e quantitativos das intervenções de trechos correlatos, portanto com características geológico-geotécnica-estruturais similares.

A vivência de casos, em grande parte busca na experiência as soluções para os projetos futuros, o que se constitui a base de dados para o desenvolvimento e ajustes das classificações geomecânicas tradicionais aplicadas a projetos de túneis. Essa possibilidade também poderá ocorrer em projeto hidrelétrico a céu aberto de grande porte, entendendo ser este o momento de catalogar toda experiência, rever os conceitos, critérios e especificações

técnicas de projeto, aplicando na prática classificações geomecânicas de maciços rochosos, próprias, direcionadas também para as complexas fundações de projetos hidrelétricos.

As empresas consultoras de projetos hidrelétricos, na sua maioria, classificam os maciços rochosos de maneira específica para determinado projeto. Em geral, correlacionam ou agrupam os parâmetros geotécnicos utilizados nas descrições de sondagens (graus de alteração, coerência e fraturamento), com denominações de compartimentação, horizontes geotécnicos, setorização etc.

A compartimentação de maciço rochoso, quando bem formulada, poderá auxiliar, por exemplo, na avaliação das contenções de taludes escavados; embora nesse caso seja específica para determinada situação encontrada, tem sido empregada, principalmente para maciço de mesma litologia.

Na UHE Serra do Facão, o maciço rochoso foi compartimentado, com a denominação de horizontes Geotécnicos (HG), de I a IV, aplicados a partir da superfície. O intemperismo nos xistos é intenso e transicional, com ocorrências localizadas e sem continuidade, de rochas com características muito diferentes da média de determinado horizonte geotécnico. Por outro lado, a inversão da ordem dos horizontes geotécnicos HG-I e HG-IV, para os maciços de pior e de melhor qualidade, respectivamente, também não é uma boa prática e até confunde na interpretação de campo. Dessa forma, essa ferramenta não foi plenamente assimilada e seu emprego no projeto executivo foi muito limitado.

O maciço rochoso do APM Manso, representado por rochas metassedimentares consistentes, foi facilmente assimilado pelos técnicos de campo, pela estreita correlação com o grau de alteração; exemplo: exposição de rocha com grau de alteração A3 (Tabela 2.1), que era reconhecida como maciço classe III (FURNAS, 2000, 2002). Já na UHE Tucuruí, a coerência, juntamente com o grau de fraturamento foram os únicos parâmetros utilizados para compartimentação (zoneamento) do maciço (SATHLER, 1977), em termos qualitativos.

No projeto básico da UHE Batalha (FURNAS *et al.* 2006), em execução no rio São Marcos, na divisa dos estados de Goiás e Minas Gerais, o maciço rochoso foi subdividido em cinco classes geotécnicas (Horizontes Geotécnicos), com base nos graus de alteração, coerência e fraturamento, HG-I à HG-V, para os maciços de melhor e de pior qualidade (solo), respectivamente. No projeto executivo, conforme citado no Capítulo 1, foi desenvolvida classificação própria (MALAFAIA 2007), como solução encontrada no

desenvolvimento do referido projeto de criar uma ferramenta que possibilitasse a modelagem das escavações a céu aberto.

Com esses exemplos, conclui-se que a compartimentação de maciços rochosos, além de não ter em geral uma padronização em sua formulação, é específica para determinado projeto, não se constituindo, portanto, uma classificação geomecânica.

Em relação às especificações técnicas aplicadas nos serviços de preparo e liberação de fundações de empreendimentos hidrelétricos, citadas no Capítulo 1, a classificação geomecânica de maciços rochosos proposta CGM, permite, a partir da obtenção dos parâmetros geomecânicos, fornecer relevantes subsídios ao projeto, em praticamente todas as etapas de seu desenvolvimento e, ainda possibilita na fase inicial de implantação da obra, por ocasião dos serviços de preparo de fundação, reavaliar e ajustar os parâmetros e até mesmo a aplicabilidade do projeto de tratamento de fundação.

Durante o período de um ano, a CGM passou por etapas de calibração e ajustes na pontuação, particularmente o parâmetro característica das descontinuidades e o ajuste decorrentes dos tratamentos de fundação. Nesses, entende-se ser de difícil definição qual tratamento aplicado é o mais eficiente para determinado projeto, portanto com maior peso relativo. Esse problema deverá ser solucionado, a partir da experiência e da aplicação de um maior número de casos em situações específicas encontradas.

A CGM, objetivo da presente tese, tem como base estrutural o sistema RMR, portanto, poderá ser correlacionada de forma empírica com classificações geomecânicas de base correlata, inclusive com uso do GSI (HOEK *et al.* 1994, 1995, 1998, 2002, 2006). Essa possibilidade amplia utilização da classificação proposta, na determinação e uso dos parâmetros geomecânicos preliminares, com base no critério de resistência de Hoek e Brown (1980 b), atualmente um dos mais utilizados em mecânica das rochas. No entanto, essa utilização ainda carece de maiores validações.

8.2. Conclusões

A CGM a ser empregada em projetos hidrelétricos a céu aberto, nas fases de viabilidade e projeto básico e para a fase de projeto executivo (obra), está respaldada, entre outros, nos seguintes atributos:

- Tem uma base estrutural de um sistema de classificação geomecânica (RMR) consagrado, amplamente divulgado no meio técnico;

- Os parâmetros classificatórios são os mais significantes dos maciços rochosos, determinados por meio de sondagens e/ou mapeamentos e ensaios a baixo custo;
- É de fácil assimilação no meio técnico e aplicação com avaliação qualitativa e, sobretudo quantitativa.
- A CGM é abrangente, podendo ser generalizada para todo o maciço rochoso, para uma estrutura específica, ou até mesmo para uma região limitada dentro da estrutura de determinado projeto, sendo aplicável a qualquer tipo de maciço rochoso, desde rochas ígneas ou metamórficas consistentes a rochas metamórficas e sedimentares, de baixa resistência (brandas) ou intemperizadas.

Uma diferença importante entre os sistemas tradicionais de classificação geomecânica de maciços rochosos, a exemplo do RMR, e da CGM, é que esta, ao considerar no primeiro parâmetro uma maior abrangência da resistência da rocha intacta, com o objetivo de melhor descrever a faixa de resistência das rochas brandas ou intemperizadas, considera as condições impostas pelo clima tropical brasileiro, conforme citado no Capítulo 2, em que o maciço rochoso é afetado por intenso intemperismo, condições diferentes daquelas onde foram formuladas na grande maioria das classificações geomecânicas tradicionais.

Os aspectos de deformabilidade, resistência e permeabilidade do maciço rochoso, principais atributos que devem caracterizar uma fundação de um barramento hidrelétrico, foram plenamente considerados na CGM, ao elevar o peso dos parâmetros da rocha consistente, do fraturamento e da presença de água (permeabilidade). No entanto, vale observar que o parâmetro classe de permeabilidade na CGM é apenas um fator contributivo que pode afetar os parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso.

O RQD (*Rock Quality Designation*), em sua versão original, proposta por Deere (1963, 1968) e determinado, conforme recomendações do ISRM (1981), constitui-se em uma classificação e não somente em um parâmetro geomecânico. O Sistema RMR inclui como parâmetros classificatórios o espaçamento das discontinuidades e o RQD, ambos obtidos a partir de medições em testemunhos de sondagem ou determinados no campo, a partir de medições com uso de trena dos espaçamentos entre fraturas. Essa duplicidade foi resolvida na presente classificação, não o adotando na CGM como parâmetro classificatório para rocha consistente.

A comparação entre os dois sistemas de classificação, base (RMR) e proposto (CGM), mostrou uma correlação bastante significativa, mas que pode variar em função do tipo de maciço. No entanto, para os maciços avaliados, a CGM se mostrou bastante aderente à sua

classificação base (RMR) e diferente da mesma em no máximo 10 pontos para a aplicação básica, sem tratamentos.

Uma amostra da eficiência dos tratamentos de fundação em curso na UHE Serra do Facão pode ser vista no Capítulo 7. Na barragem de concreto (Tabela 7.24), com exceção da área 2, as demais galgaram uma classe na CGM, com considerável aumento nos índices GSI e, conseqüentemente, parâmetros de resistência e módulo de deformabilidade (Em). Já nas barragens do leito do rio e margem direita (Figura 7.25), na região do núcleo junto ao leito do rio (área 2), onde intensos tratamentos foram executados, o GSI teve um acréscimo de 13 pontos (20%), enquanto o Em de 20 GPa passou para 46 GPa (130%). A região do núcleo, na margem direita (área 14), com presença de grafita-xisto, galgou uma classe, com o Em melhorando em 2,5 GPa (50%).

O uso de classificação geomecânica de maciços rochosos, a exemplo da CGM no desenvolvimento de projetos de barramentos hidrelétricos, está respaldado nos seguintes fatos:

- A compartimentação adotada nos estudos para projeto é específica para aquele tipo de maciço rochoso investigado, de determinado projeto, e fornece basicamente dados qualitativos. Não é normalizada no meio técnico e nem muito menos foi catalogada em bancos de dados;
- As classificações geomecânicas de maciços rochosos que adotam a base estrutural do sistema RMR, a exemplo da CGM, além de catalogar o maciço rochoso em classes, são factíveis de uso nas soluções de engenharia, por fornecerem parâmetros de projeto tratados com lógica matemática e ainda são correlacionáveis, visto que as classificações geomecânicas tradicionais ao longo dos anos vêm se desenvolvendo e acumulando experiência que é repassada aos projetos, sobretudo de obras subterrâneas;
- A partir do critério de ruptura de Hoek & Brown (1980b) e da introdução do GSI (Hoek, 1994), baseado no conceito de que a resistência do maciço rochoso depende não somente das propriedades da rocha intacta, mas também da liberdade que os blocos de rocha têm de escorregar ou rodar sob diferentes condições de tensão, as classificações geomecânicas passaram a ter nova conotação, sobretudo os sistemas RMR e Q, por terem uma larga e bem estudada base de dados de casos de obra e por serem de aplicação relativamente fácil (MIRANDA, 2003). Nesse contexto, a CGM é introduzida tendo a mesma base metodológica do RMR, mas diferenciada desta por ter parâmetros classificatórios com pesos ajustados e específicos às condições impostas de barramentos hidrelétricos a céu aberto;

- Os parâmetros e constantes das equações de Hoek-Brown, (m_b , m_i , a , s , E , c), determinados a partir do GSI, constituem-se como um grande avanço ao transformar as classificações geomecânicas, antes totalmente qualitativas e tratadas empiricamente, em semi-empíricas e com tratamentos matemáticos. O GSI, sendo obtido por meio do RMR, também poderá ser determinado a partir do CGM, considerando o maciço rochoso totalmente seco e sem o ajuste das descontinuidades. No entanto, esta extrapolação no uso da CGM ainda carece maiores validações futuras;
- O maciço rochoso, ao ser escavado a fogo, sofre perturbações e, ao ser desconfinado, a exemplo de túneis, é submetido à libertação de tensões, portanto, as características do maciço rochoso são alteradas. Hoek *et al.* (2002), depois de definido o GSI, para maciço rochoso, correlacionaram os parâmetros do critério de ruptura, por meio de relações, introduzindo o fator D, que depende do grau de perturbação do maciço rochoso escavado. Portanto, esse fator (D) é um índice corretivo dos parâmetros, originários do GSI, obtido a partir de uma classificação geomecânica (RMR), cujo valor foi alterado. Situação similar ao fator D mencionado ocorre com a CGM, ao ser aplicada na fase de projeto executivo (obra). O maciço rochoso de fundação, ao ser objeto de tratamentos, é submetido a melhorias de suas características geotécnico-geomecânicas, nos aspectos de coesão, resistência, deformabilidade, estanqueidade etc., recebendo, desta forma, ajuste de pontos positivos, elevando o valor final da classe CGM, refletindo nos índices e parâmetros a serem determinados para subsídios do projeto.

8.3. Sugestões para futuras pesquisas.

No percurso das pesquisas da presente tese verificou-se a necessidade de complementação dos seus estudos. Assim, algumas sugestões podem ser repassadas a futuras pesquisas.

- **Rochas brandas**

São encontradas grandes dificuldades na obtenção de parâmetros geomecânicos de rochas brandas, em decorrência da metodologia empregada nas investigações e determinação dos parâmetros geotécnicos, a partir de sondagens mecânicas. Propostas de programas de investigação específicos, recomendações de ensaios geotécnicos e até mesmo a criação e/ou ajuste nos parâmetros ora empregados em descrições de sondagens e mapeamentos geológico-geotécnicos.

- **Aplicação e calibração da CGM**

Os sistemas de classificação tradicionais para projetos de túneis vêm sendo objeto de ajustes e revisões, a partir do conhecimento e aplicabilidade em obras ao longo do tempo. A proposta CGM objetivo da presente tese poderá ser estendida para uso em outras áreas dentro dos empreendimentos hidrelétricos, como escavação em rocha, contenções de taludes, sendo, portanto, algumas das sugestões para prosseguimento de futuras pesquisas.

O conceito do Ajuste positivo na pontuação da classificação de maciço rochoso (básica), com aplicação dos tratamentos de fundação, que compõe a proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para a fase de projeto executivo (obra), é antes de tudo uma forma de avaliação do coeficiente de segurança de determinada estrutura. Pesquisa direcionada para avaliar o ganho nesses requisitos de projeto, com aplicação de determinado tratamento, vem ao encontro da seguinte questão: “qual tratamento aplicado é o mais eficiente para determinado projeto em termos de coeficiente de segurança”? São algumas indicações para futuras pesquisas nessa área de interesse.

Referências

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Ensaio de perda d'água sob pressão: Diretrizes Boletim nº 2. 16 p. São Paulo - SP, 1975.

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua execução no campo. Boletim nº 04 3ª Edição. 30 p. São Paulo, 1996.

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Manual de Sondagens. Boletim nº 3, 4ª Edição. 73 p. São Paulo, 1999.

ABGE/CBMR - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas. Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos (tradução 12). São Paulo - SP, 1983.

ALMEIDA, S. J. Túneis em Maciços Terrosos. Comportamento e Simulação Numérica. Tese de Doutorado. FCTUC, Coimbra, 623 p. 1998.

ASSIS, A. P. Métodos Construtivos aplicados a túneis urbanos. Curso sobre Túneis em Meios Urbanos. Sociedade Portuguesa de Geotecnia & Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 1:1-12, Coimbra, Portugal, 2001.

ASSIS, A. P. Mecânica das Rochas – Apostila do Curso Básico. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT - Geotecnia. Publicação G.AP – AA001/03. 93 p. Brasília-DF, 2003 a.

ASSIS, A. P. Mecânica e Engenharia de Rochas – Apostila do Curso Avançado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT - Geotecnia. Publicação G. AP – AA002/03. 69 p. Brasília-DF, 2003b.

ASSIS, A. P. Nota de Aula. Curso de Mestrado. Disciplina de Barragem. Universidade de Brasília – UNB. Brasília-DF, 2004.

ASSIS, A. P. AHE Simplício Proposta de Investigações Complementares - Relatório de Consultoria. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT - Geotecnia. Publicação G.RE – AA001/07. 24 p. Brasília-DF, 2007.

BAHIA, R. B. C. A Formação Palmeiral (Proterozóico Superior) na Serra dos Pacaás Novos, oeste de Rondônia. Tese de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 88 p. 1997.

BANDIS, S. C.; LUMSDEN, A. C.; BARTON, N. R. Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20 (6): 249-268. 1983.

BARLA, G. & BARLA, M. Continuum and discontinuum modeling in tunnel engineering. Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 61: 25-35p. 2000.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Wien, v. 6, p. 183-236, 1974.

BARTON, N. The shear strength of rock joints. Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19: 255-279, 1976.

BARTON, N. & CHOUBEY, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics 1/2:1-54. Vienna: Springer. Also NGI Publ. 119, 1978.

BARTON, N. & BANDIS, S. C. Effects of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock. Keynote Lecture, 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics, pp.739-760. Berkeley, California, 1982.

BARTON, N. "Application of Q-System and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses." Proc. Int.Symp.Eng. Geol. Underground Constr., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 51-70. 1983.

BARTON, N.; BANDIS, S.; BAKHATAR, K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22(3): 121 -140. 1985.

BARTON, N. "Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-System." Proc. Symp. Rock Class. Eng. Purp., ASTM Special Technical Publication 984, Philadelphia, pp.59-84. 1988.

BARTON, N. & BANDIS, S.C. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. International Symposium on Rock Joints. Loen 1990. Proceedings, pp. 603-610, Balkema, eds, Barton & Stephansson. 1990.

BARTON, N. 1990. Scale effects or sampling bias? Closing lecture. Proceedings of the First International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen, Norway, 1990.

BARTON, N. The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses. 8^o International Congress of Rock Mechanics, ISRM, Tokio, Japan, 3: 1023-1032. 1995.

BARTON, N. Quantitative Description of Rock Masses for the Design of NMT reinforcement. Keynote Lecture – Int. Conf. on Hydro Power Developmet in Himalayas, Shimla, India, pp.379-400. 1998.

BARTON, N. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam, 172p. 2000.

BARTON, N. & ASSOCIATES. Shear Strength Estimation for Serra do Facão UHE Dam Foundation. Relatório de consultoria à Camargo Correa. 50p. Catalão-Go, 2007.

BERTIN, N. S. Interface Concreto–Rocha – Critérios para Liberação de Fundações das Estruturas de Concreto da UHE – Tucuruí. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, 20 p. Rio de Janeiro, 1980.

BETTENCOURT, J. S.; LEITE, J. R. W. B.; PAYOLLA, B. L. ; SCANDOLARA, J. E. ; MUZZOLON, R. ; VIAN, J. A. J. The rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, northern Brazil. In: CBPM/SGM, International Symposium on Granites and Associated Mineralizations, 2, *Excursions Guide*, 162p. p. 3-31. 1997.

BETTENCOURT, J. S.; TOSDAL, R. M.; LEITE, J R.; W. B.; PAYOLLA, B. L. U-Pb, Sm-Nd, Pb-Pb and Rb-Sr isotopic constraints on the origin of the rapakivi granites of Rondônia. In: South-American Symposium on Isotop Geology, p. 47-48. 1997a.

BETTENCOURT, J. S.; TOSDAL R. M.; LEITE JR.; W. B. PAYOLLA B. L. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, southwestern border of the Amazonian Craton, Brazil-I. Reconnaissance U-Pb geochronology and regional implications. *Precambrian Research*, 95: 41-67. 1999.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering. Classification of Rock Masses”. Transictions, Soth-African Institution of Civil Engineering. V. 15, n. 12, pp 334-335, South Africa, 1973.

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

BIENIAWSKI, Z. T. Rock Mass Classification in Rock Engineering. In: Symposium on Exploration for Rock Engineering, ed. Z. T. Bieniawski, A. A., pp. 97-106, Balkena, Johannesburg, 1976.

BIENIAWSKI, Z. T. “Elandsberg Pumped Storage Scheme - Rock Engineering Investigations.” Exploration for Rock Engineering, ed. Z. T. Bieniawski, A. A. Balkema Johannesburg. pp. 273-289, 1976.

BIENIAWSKI, Z.T.; ORR, C. M. “Rapid site appraisal for dam foundation by geomechanics classification”. In: Proc.12th Int. Congr. Lange Dams, Q46. R32, pp. 483-501. ICOLD, México.1976.

BIENIAWSKI, Z. T. Determining Rock Mass deformability. Experience from Case Histories. *International Journal of Rock Mecanics and Mining Science & Geomech. Abstr*, Pergamon, 15, pp. 237-247. 1978.

BIENIAWSKI, Z. T. The Geomechanics Classification in rock engineering applications. In: Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., Montreux, chap 5 pp. 55-95. Balkema, Rotterdam, 1979.

BIENIAWSKI, Z. T. Tunnel Design by Rock Mass Classifications, U. S. Army Corps of Engineers Technical Report GL – 799 –19, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 50-62, 1979.

BIENIAWSKI, Z.T. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. 1 ed. 272 p. Rotterdam, A. A. Balkema, 1984.

BIENIAWSKI, Z. T. The Rock Mass rating (RMR) system (Geomechanics Classification in Engineering practice. Kirkaldie, L. (ed), Rock classification systems for engineering purposes (STP 984). Philadelphia, USA: ASTM. pp. 17-34, 1988.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Rock Mass Classifications. A complete manual for in engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 251 p. 1989.

BIENIAWSKI, Z. T. “Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends”. In: *Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practice & Projects*, v. 3, pp. 553-573, Pergamon Press, 1993.

BIODINÂMICA Engenharia e Meio Ambiente Ltda.; Furnas; ALSTOM; ABB. UHE SERRA DO FACÃO Rio São Marcos (GO/MG)- Estudo de Impacto Ambiental EIA, volumes I / II, Rio de Janeiro, 2000.

BUOSI, M. A.; VALERIO, A.; MESQUITA, J. B. Barragem de Terra e Enrocamento de Tucuruí, Condicionantes Geológico-Geotécnicos e Tratamentos das Fundações. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3^o, Itapema – SC, Anais V. 2, p.225-245. 1981.

CARVALHO, J. A. **Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM – 099A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília DF, 196 p. 2003.

CNEC ENGENHARIA SA. AHE Serra do Facão Projeto Básico Consolidado – Especificações Técnicas Obras Civas – E G038/SF.00/ET.0101, 165 p., S. P., 2002.

CNEC ENGENHARIA SA. UHE Serra do Facão e Sistema de Transmissão Associado – Projeto Básico Consolidado - Volume 1/2, 175p. Nº EG038/SF.55/RT.004, S. P., 2002a.

CNEC ENGENHARIA SA. UHE SERRA DO FACÃO E SISTEMA DE TRANSMISSÃO ASSOCIADO – BARRAGEM DE CCR – MARGEM ESQUERDA. Parâmetros Geomecânicos das Juntas Sub-horizontais da Fundação. Relatório Técnico Nº NE218-GE-014-RT-8001, S. P., 18p. 2008.

CELLA, P. R. C.; SANTORO, E.; COELHO, L. F. M. Interação de Ferramentas Geofísicas e Geomecânicas para Qualificação das Fundações de uma Estrutura de Concreto em Rocha Branda. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, SP. 12p. 1998.

COSTA, W. D. Um modelo de classificação de maciços rochosos para fundação de barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: CBDB, 1999. v. 2, p. 219-227.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Residência de Porto Velho. Levantamento de Informações para subsidiar o Estudo de Viabilidade do Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) do Rio Madeira. Porto Velho –RO. 627 p. 2005.

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

DAVIDOVITSCH, A.. et al. Classificação e Caracterização Geomecânica de Maciços Aplicada aos Túneis da Ligação Ferroviária Belo Horizonte – São Paulo (Ferrovia do Aço). São Paulo. 1976.

DALBERTO, D. M. Ações estratégicas adotadas para a gestão ambiental e da segurança no trabalho em usina hidrelétrica no Brasil. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DEERE, D. U. “Technical Description of Rock Cores for Engineerong Porposes”. In: *Rock Mechanition (RQD) aften Twenty Years. ncs and Engineering Geology*, v. 1, n. 1, pp. 16-22. , 1963.

DEERE, D. U. Geological Considerations. In: Stagg, K. G.; Zienkiewics, O. C. (Ed.). *Rock mechanics in Engineering Practice*. London, UK: John Wiley & Sons, pp. 1-20, 1968.

DEERE, D.U. Rock Quality Designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Enginiers Contract Report GL-89-1. Waterways Experimental Station. Vicksburg, MS, 67p. 1989.

DEERE, D. U.; et al. *Design of túnel support systems*, In: Highway Research Record, n. 339, pp. 26-33. 1970.

DINIS DA GAMA, C.; BORGES, C. A. Estudo geológico-geotécnico da área de ampliação da ETAR da Guia. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 8. 2002, Lisboa. Actas Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotécnica, 2002.

DURAND, A. **Estudo de Estabilidade de Taludes em Mineração a partir de Classificação Geomecânica.** Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil Publicação G DM – 023/95. Brasília./DF, p. 19-39. 1995.

DURAND, A.; ASSIS, A. P. Estudo da Estabilidade de Taludes em Mineração Através de Classificação Geomecânica. In: 2nd Panamerican Symposium on Landslides, Rio de Janeiro. 2 PSL / COBRAE. : ABMS / ISSMGE, v. 1. p. 319-328. Rio de Janeiro, Brazil, 1997.

FERGUSON, G. A. "Optimization of Block Caving with a Complex Environment". *Mining Magazine*, v. 140, pp.126-139, 1979.

FIALHO, J. R. R. **Desempenho de sistemas de suporte de estruturas subterrâneas por meio de modelagem numérica.** 2003. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2003.

FIALHO, J. R. R. ; ASSIS, A. P. Avaliação do Desempenho de Sistemas de Suporte de Escavações Subterrâneas em Maciços Rochosos por Meio de Elementos Finitos. In: Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas CBT 2004, Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas CBT 2004. São Paulo, SP : CBT, 2004. v. 1. p. 1-6. São Paulo, 2004.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas – aplicação na estabilidade de taludes. UFPR, 548 p. Curitiba, PR, 2001.

FRANCIS F. O. Classificação geotecnológica de rochas. Apreciação sintética da Questão (I/II Partes).: PUC (Geotecnia), 56 p. Rio de Janeiro, 1976.

FLEURY, S. V. **Análise da Distribuição de Tensões em Descontinuidades de Rocha Utilizando a Técnica da Fotoelasticidade.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 147 f. Brasília, DF, 2001.

FLEURY, S. V. ; ASSIS, A. P. Análise da distribuição de tensões em descontinuidades de rocha utilizando a técnica da fotoelasticidade.. In: III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas., III SBMR. São Paulo, SP : ABMS / CBMR, 2002. v. 1. p. 79-90. São Paulo. 2002.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S. A. APM MANSO DIVISÃO DE GEOTECNIA – Estruturas de Concreto – Tratamentos Superficiais e Liberação das fundações – Como Construído, Relatório: DVGM. T.028.00-R0, 28 p. 2000.

FURNAS/ABB/ALSTON/BIODINÂMICA. Estudo de Impacto Ambiental do Aproveitamento Hidrelétrico Serra do Facão. 180p. Rio de Janeiro, 2000.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA. Aproveitamento Múltiplo Manso: MEMÓRIA TÉCNICA – Coordenação Superintendência de Engenharia S.E. T/ Sondotécnica Engenharia de Solos S. A. Rio de Janeiro, Chapada dos Guimarães, MT, 1070 p. 2002.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA; CONSTRUTORA NORBERTO ODEBRECHT; PROJETOS E CONSULTORIA DE ENGENHARIA LTDA. Complexo Hidrelétrico do Madeira - Estudos de Viabilidade do AHE Jirau. Processo Nº 48500.000104/03-53 - Relatório Final: PJ-0519-V1-00-R1-0001. 2004.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA; CONSTRUTORA NORBERTO ODEBRECHT; PROJETOS E CONSULTORIA DE ENGENHARIA LTDA. Complexo Hidrelétrico do Madeira - Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antônio. Processo Nº 48500.000103/03-91 - Relatório Final: PJ-0532-V1-00-R1-0001. 2005 a.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA; CONSTRUTORA NORBERTO ODEBRECHT; LEME ENGENHARIA. EIA RIMA – Estudos de Impacto Ambiental: Aproveitamentos Hidrelétricos Santo Antônio e Jirau, Rio Madeira - RO - Nº 6315-RT-G90-001. 2005 b.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA; PCE - PROJETOS E CONSULTORIA DE ENGENHARIA. UHE BATALHA – PROJETO BÁSICO: Apêndice A Estudos Geológico-Geotécnicos PJ0606-B-G00-GR-RL-001-0, 54 p. 2006.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA; PCE - PROJETOS E CONSULTORIA DE ENGENHARIA. UHE BATALHA – PROJETO BÁSICO: Caracterização de Rochas Ensaio Geomecânicos, Índices Físicos e Caracterização por Difração de Raios-X. Relatório interno DCT.C.04.003.2007-R0, 45 p. 2007.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA. UHE Serra do Facão: Relatório Preliminar de Resultados de Ensaio de Campo em Mecânica das Rochas - DGA.C.AG.0XX.2007-R0, 65p. Catalão – Go, 2007.

GRIMSTAD, E.; BARTON, N. “Updating of the Q-System for NMT”. In: Proc. International Symposium on Sprayed Concrete – Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes, pp. 46-66, Oslo: Norwegian Concrete Assn, 1993.

HACK, R. “An Evaluation of Slope Stability Classification”. In: *ISRM Eurock*, Portugal. 2002.

HUDSON, J. A, & HARRISON, J. P. Engineering Rock Mechanics. Pergamon, Oxford, UK, 444p. 2000.

HIDALGO, C. A. Classificação geomecânica e simulação numérica de estruturas subterrâneas de barragens. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200 p. 2002.

HIDALGO, C. A. ; ASSIS, A. P. Determinación de parámetros de macizos rocosos para simulación numérica.. In: IX Congresso Colombiano de Geotecnia, 2002, Medellín. IX Congresso Colombiano de Geotecnia: SCG, v. 1. p. 1-12. Medellín, 2002.

HIDALGO, C. A. ; PASTORE, E. L. ; ASSIS, A. P. Determinación de la resistencia de la roca intacta en la caracterización de macizos rocosos. Revista Ingenierías, Univ. de Medellín, Colombia, v. 3, p. 89-102, 2003.

HIDALGO, C. ; ASSIS, A. P. Estabilidade de Túneis Escavados em Rocha e Projetados por Métodos de Classificação Geomecânica. In: Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. In: CBT 2004, Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, v. 1. p. 1-6. São Paulo, SP, 2004.

HOEK, E. & BRAY, J. W. Rock Slope Engineering. IMM, London, UK, 358 p. 1981.

HOEK, E. & BROWN, E. T. Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p. 1980 a.

HOEK, E. & BROWN, E. T. Empirical strength criterion for rock masses. In: J. Geotech Engng Div., ASCE 106 (GT9), pp.1013-1035, 1980 b.

HOEK, E. Strength of jointed rock masses. *Géotechnique*, London, v. 33, n. 3, pp. 187-223, Twenty-third Rankine Lecture. 1983.

HOEK, E. Practical rock mechanics - development over the past 25 years Keynote address delivered 24.2.1986

HOEK E. & BROWN E. T. The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update. *Proc. 15th Can. Rock Mech. Symp.* University of Toronto, pp. 31-38, 1988.

HOEK, E.; WOOD, D.; SHAH, S. A modified Hoek-Brown criterium for jointed rock masses. In: HUDSON J. (Ed.). Eurock'92. London: British Geotechnical Society, pp.209-213. 1992.

HOEK, E. Strength of Rock and Rock Masses. *International Society for Rock Mechanics – News Journal*, 2(2): 4–16, 1994.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: Balkema, 215 p. 1995.

HOEK, E. & BROWN, E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, New York, v. 34, n. 8, p. 1165-1186, 1997.

HOEK, E.; MARINOS, P.; BENISSI, M. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Heidelberg, v.57, n. 2, p.151-160, 1998.

HOEK, E. Course of Rock Tunnelling Case Histories and the Application of Modern Rock Engineering Techniques” – São Paulo – Brasil. 1998.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. Toronto: North American Rock Mechanics Society, 2002.

HOEK, E.; DIEDERICHS, M. S. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.43, p.203 -215. 2006.

HOEK, E. Practical Rock Engineering. [www. Rocscience.com](http://www.Rocscience.com). 2007.

INFANTI JÚNIOR, Jr. *Erosão Acelerada em Leitões Rochosos a Jusante de Vertedouros: Prognósticos Geológicos e Impactos Ambientais*. Tese de doutorado. UNESP- Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro – SP. 320 p. 1995.

ISRM. Basic Geotechnical Description of Rock Masses. Commission on Classification of Rock and Rock Masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.* 18: 85-110. 1980.

ISRM. International Society for rock Mechanics - Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, 211 p. 1981.

KENDORSKI, F. S. *et al.* “Rock mass classification for block caving mine drift support”. In: *Proc., 15th Int. Congr. Rock Mech.*, pp. B101-113, ISRM, Melbourne, 1983.

KIRSTEN, H. A. D. “A Classification System for Excavation in Natural Materials.” *Civ. Eng. S. Afr.* 24, pp. 293-308, 1982

KIRSTEN, H. A. D. “Case Histories of Groundmass Characterization for Excavability.” *Proc. Symp. Rock Class. Eng. Purp.*, ASTM Special Technical, 1988.

KULHAWY, F. H. Stress deformation properties of rock and rock discontinuities. , 9: 327-350, 1975.

LAUFFER, H. “Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau.” *Geol. Bauwesen* 74, pp. 46-51. 1958.

LAUBSCHER, D. H. “Class distinction in rock masses”. In: *Coal, Gold and Base Minerals of S. Africa*, v. 23, n. 6, pp. 37-50, South Africa. 1975.

LAUBSCHER, D. H.; TAYLOR, H. W. “The Importance of Geomechanics Classification of Jointed Rock masses in Mining Operations”. In: *Exploration for Rock Engineering*, v. 1, pp. 119-128, Rotterdam. 1975.

LAUFFER, H. “Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau”. In: *Geologie und Bauwesen*, v. 24, n. 1, pp. 46-51. 1958.

LAURO, C. A. **Modelo Probabilístico de Distribuição Tridimensional de Descontinuidades em Maciços Rochosos Fraturados.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-008ª/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 253 p. Brasília, DF, 2001.

LAURO, C. A. ; ASSIS, A. P. Modelo probabilístico de distribuição de descontinuidades de maciços rochosos visando a análise de estabilidade de taludes em rocha. In: III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, III SBMR. São Paulo, SP : ABMS / CBMR, v. 1. p. 179-189. São Paulo, 2002.

LEVIS, S. D. **Verificação da Eficiência dos Sistemas de Vedação e Drenagem em Fundações de Barragem de Concreto.** Dissertação de mestrado. USP – São Carlos, 186 p. 2006.

LOPES, M. C.; LANA, M. S.; RIBEIRO, L. F. Comportamento geotécnico de rochas brandas na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG). *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 60(3): pp. 471-476, jul. set. 2007, Ouro Preto, MG, 2007.

MACKAY, F. E. **Análise do comportamento de aberturas circulares em maciços rochosos utilizando diferentes sistemas de suporte.** 2004. 162 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

MAFRA, J. M. Q. Estudo de Tensões Virgens em Maciços Rochosos: O Caso UHE Itá. Ouro Preto – MG. 2001.

MAIA, P. C. A. **Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos.** 2001. 351 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MAIA, J. A. C. **Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha.** 2003. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 2003.

MAIA, J. A. C.; ASSIS, A. P. Utilização da Análise de Confiabilidade no Estudo de Estabilidade das Obras Subterrâneas de um Aproveitamento Hidrelétrico.. In: Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. In: CBT '2004, Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, v. 1. p. 1-7. São Paulo, SP, 2004.

MAIA, J. A. C. **Modelagem probabilística da zona plástica de obras subterrâneas em meios rochosos.** 2007 161 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

MALFAIA, A. L. **Sistemas de Classificação Geomecânica Aplicados aos Maciços Rochosos da UHE Batalha.** COPPE – UFRJ Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil. 290p. Rio de Janeiro, 2007.

MARINOS, P.; HOEK, E. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING – GEOENG. Proceedings... Melbourne, Australia: Institution of Engineers, 19 p. 2000.

MARINOS, P.; HOEK, E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock mass such as flysch. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Heidelberg, v. 64, n. 1, p. 55-65, 2001.

MARINOS, V.; MARINOS, P.; HOEK, E. The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Heidelberg, v. 60, n. 2, p. 85-92, 2005.

MARQUES FILHO, P. L.; GERALDO, A. Barragens e Reservatórios. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, pp. 397-418, 1998.

MARQUES, R. A.; SCHEMBERG, F. C.; PORTO, M. A. A. Modelos de Gestão do AHE Peixe-Angical – Um Estudo de Caso In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Anais CBDB, 15 p. Goiânia, 2005.

MATTOS, G.; SATHLER, G.; BULL, J. F.; MESQUITA, J. B. Influência do zoneamento nos critérios executivos de preparo de fundações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., 1984, Belo Horizonte. Anais V São Paulo: ABGE, v. 2, pp.123-132, 1984.

MESQUITA, J. B.; MATTOS, G.; SATHLER, G. Falha da Lagoa, metodologia de execução dos tratamentos executados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., Belo Horizonte. Anais 2. São Paulo: ABGE, v. 2, pp.133-150, 1984.

MILNE, D.; HADJIGEORGIOU, J.; PAKALNIS, R. Rock mass characterization for underground hard rock mines. Tunnelling and Underground Space Technology, Oxford, v. 13, n. 4, p. 383-391, oct. 1998.

MIRANDA, T. F. S. **Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos. 186p.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2003.

MIRANDA, T.; GOMES CORREIA, A.; RIBEIRO E SOUSA, L.; LIMA, C. Modelação numérica de uma central hidroeléctrica subterrânea utilizando parâmetros geomecânicos obtidos através de técnicas de inteligência artificial. 4.º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, pp. 807-816. Maputo, Moçambique, 2005.

MONTI, H. C.; CARVALHO, A. P. F.; MESQUITA, J. B. Aproveitamento múltiplo de manso, aplicação de materiais não convencionais. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., Belo Horizonte. Anais 2 Rio de Janeiro: CBDB, v. 2, p. 145-158. 1999.

MONTICELLI, J. J. **Influência da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos no projeto de fundações de barragens - fase de viabilidade.** Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo. 149p. 1984.

MORENO, E. Application de Las Classificaciones Geomechanicas a los Tuneles de Parjares. II Curso de Sostenimientos Activos en Galerías y tuneles. Madrid: Fundation Gomez - Parto. 1980.

NIEBLE, C. M. Aspectos geológicos e geomecânicos relativos ao projeto de túneis em maciços de rochas metamórficas. Anais do Primeiro Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, V. 1, p.399-414. 1976.

NIEBLE, C. M; FRANCIS, F. O. Classificação de maciços rochosos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1º Anais V. 2, p.379-411. Rio de Janeiro, 1976.

NICHOLSON, G. A.; BIENIAWSKI, Z.T. A Non-Linear Deformation Modulus Based on Rock Mass classification. International Journal of Mining & Geology Eng., pp.181-202. 1990.

OJIMA, L. M. Metodologia de classificação de maciços rochosos aplicável a túneis. In: Síntese de Teses de Pós-Graduação, ABGE. 102 p. São Paulo - SP, 1982.

PALMSTRÖM, A. "The Volumetric Joint Count – a Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Jointing. "Proc. 4th Int. Congr., Int. Assoc. Eng. Geol., Dehli, vol. 5, pp. 221-228, 1982.

PALMSTRÖM, A. “Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering – Part 1: The development of the Rock Mass index (R_{Mi})”. In: *Journal of the Tunneling and Underground Space Technology*, v. 11, n. 2, pp. 175-188, 1996a.

PALMSTRÖM, A. “Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering – Part 2: Some practical applications of the Rock Mass index (R_{Mi})”. In: *Journal of the Tunneling and Underground Space Technology*, v. 11, n. 3, pp. 287-303, 1996b.

PANITZ, J. S. P. Desenvolvimento e Implementação de Metodologias para a Determinação da Deformabilidade e Tensões em Maciços Gnáissicos. Dissertação de Mestrado. PUC – R.J., 150p. 2007. Disponível em www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/11328_1.PDF, acessado em 22 de maio de 2008.

PORTO, E. C. Critério para determinação de vazões pela fundação de barragens com base nos ensaios de perda d’água: o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 93p. 2002.

PORTO, M. A. A. Modelos de Gestão de Empreendimentos de geração de Energia Elétrica: um Estudo de Caso de Furnas Centrais Elétricas S. A. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Anais CBDB, 15 p. Goiânia, 2005.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Discontinuity spacings in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, p.135-148, 1976.

REDAELLI, L. L.; CERELLO, L. Escavações. In: OLIVEIRA, A M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). *Geologia de engenharia*. ABGE, pp. 311-330, São Paulo-SP, 1998.

REDONDO, F. Classificação Probabilística do Padrão Geomecânico de um Maciço Rochoso Mineralizado com Base no índice RQD. Dissertação de Mestrado. UNESP-Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro – SP. p. 2-71. 2003.

ROCHA, M. “Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência” 5º Congresso Panamericano de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones. Buenos Aires, 1975.

ROCHA M. “Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistencia” *Geotecnia. Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia*. Nº 18, Novembro-Dezembro. Pp 3-27 (in portuguese) 1976.

ROCHA, M. Estruturas Subterrâneas, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LENEC, 173 p.1976.

ROMANA, M. “New adjustment ratings for applications of Bieniawski classification to slopes”. In: *Proc. Int. Symp. on the Role of Rock Mech.*, pp. 49-53, 1985.

ROMANA, M. “A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating”. In: *Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practice & Projects*. V. 3, pp. 575-600, Pergamon Press, 1993.

ROMANA, M. DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dams foundationn”. Inst. Cong. on Rock Mechanics – ISRM 2003. (Technology roadmap for rock mechanics) South African Institute of Mining and Metallurgy, 14p., 2003a.

ROMANA, M. “DMR , a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR”.4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams MADRID. 9p. 2003b.

ROMANA, M. DMR (una adaptación del RMR), Una Nueva Clasificación Geomecánica para la Cimentación de Presas. Universidad Politécnica de Valencia, España. 9º Congreso Luso de Geotecnia, 14p. Aveiro, 2004.

RUIZ, D. M.; GUIDICINI, G. Introdução. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 1- 5.

SATHLER, G. **Espectos Geológico-Geotécnicos do Maciço Rochoso de Fundação das Estruturas de Concreto da Barragem de Tucuruí** – Dissertação de Mestrado. UFRJ, 156 p. Rio de Janeiro, 1977.

SATHLER, G.; MESQUITA, J. B.; MATTOS, G.; BULL, J. F. Critérios de Preparo de Fundação em Rocha Aplicados na Usina Hidrelétrica Tucuruí. In: 4^o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Anais v. 2, pp.161-171, Belo Horizonte – MG, 1984.

SATHLER, G.; MESQUITA, J. B; BULL, J. F.; MATTOS, G. Planejamento, Programação e Controle dos Serviços de Preparo de Fundação. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 4^o, Belo Horizonte – MG, Anais v: 2, p.151-160. 1984.

SERRA JUNIOR, E; OJIMA, L. M. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. Geologia de Engenharia. Oliveira, A M. S. & Brito, S. N A. (Eds). ABGE, pp. 211-226, São Paulo-SP, 1998.

SERAFIM, J. L.; PEREIRA, J. P. Considerationes of the geomechanics Classification of Bieniawski. Procedings of the International Symposium of Eng. Geol. Underground Construction, v.1, pp. II.33-II.42, LNEC, Lisboa, 1983.

SILVEIRA, J. F. A. Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto. Oficina de Textos. 1ª edição, 320 p. São Paulo-SP. 2003.

SOARES, L. **Determinação do Grau de Coerência de Rochas Brandas**, Tese de Doutorado, USP – São Paulo. 324p. 1991.

STEFFEN, O. K. H “Research and development needs in data collection for rock engineering”. In: *Proc. Int. Symp. Exploration for Eng.*, v. 2, pp. 95-104, Balkema, Rotterdam. 1976.

TAMMERICK, G. R.; SOARES, L.; DAMASCENO, E. C. Sistema de classificação de maciços quanto à escarificação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS. Foz do Iguaçu. São Paulo: ABMS/CBMR, p. 85-92. 1994.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Texto, 568 p. 2003.

TERZAGHI, K. “Rock Defects and Loads on Tunnel Support”. In: *Rock Tunneling with Steel Support*, pp. 15-99, Commercial Shearing Co., Youngstown, Ohio. 1946.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W. et al.. Decifrando a Terra. Oficina de Texto, pp. 139-166, São Paulo-SP, 2003.

TRESSOLDI, M.; SATHLER, G. O papel de Mapeamentos Geológico-geotécnicos de Detalhes na Definição de Maciços Complexos: O Exemplo da UHE Tucuruí. In: 3^o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Anais v. 2, pp.121-140, Itapema - SC, 1981.

VAZ, L. F. Aplicabilidade de Investigações e Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos para Obras Subterrâneas. ABGE - 2^o. Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, 18p, Rio de Janeiro - RJ. 1982.

VAZ, L. F. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais. In: Rev. Solos e Rochas, v.19, n. 2, ABMS/ABGE, São Paulo, SP, p.117-136. 1996.

VINUEZA, G. M. M.; ASSIS, A. P. Classificação Geomecânica e Simulação Numérica de uma Mina Subterrânea. In: 1 Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 1994, Foz do Iguaçu. 1 SBMR.: CBMR / ABMS, v. 1. p. 133-140. São Paulo, SP. 1994.

WICKHAM, G. E., TIEDEMANN, H. R., SKINNER, E. H. “Support Determination Based on Geologic Predictions”. In: *Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME, pp. 43-64, New York. 1972.

WICKHAM, G. E., TIEDEMANN, H. R., SKINNER, E. H. “Ground Support Prediction Model – RSR Concept”. In: *Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME, pp. 691-707, New York. 1974.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração (BIG) Matriz de energia elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/BIG- Banco de Informações de Geração>. Acesso em: 31 dez. 2007.

MIRANDA, T.; CORREIA, G. C.; SOUSA, L. R. Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Formações Rochosas e Maciços Heterogêneos. 40p. Publ. Nº 25, 2006. Disponível em: <http://193.136.14.136/cec/revista/revista.htm>. 20 julho/2007.

FALCÃO NEVES, P; COSTA E SILVA, M.; REIS E SOUSA, M. Variação da Resistência ao Corte de Rochas Brandas com o seu Índice de Durabilidade. CEGEO – Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa - Centro de Geotecnia do IST, 8p. Lisboa, Portugal. (2006) pfalcaoneves@mail.ist.utl.pt. Acessado em 15 de agosto de 2008.

REVISTA FURNAS ANO XXXII N° 329, FEVEREIRO 2006

www.furnas.com.br/arqtrab/ddppg/revistaonline/linhadireta/rf329_pmadei.pdf. Acessado em 20/março/2006.

SEER, H. J. **Evolução tectônica dos Grupos Araxá e Ibiá na sinforma de Araxá, MG.** Universidade de Brasília - Instituto de Geociências. Tese de Doutorado no 28. 1995.

Publicada na Internet em <http://www.unb.br/ig/posg/dout/tese28/Capa.htm> Acessado em 15 de março de 2007.

Apêndices

Apêndices A, B e C

10.1. O Apêndice A é constituído:

- A.1. Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau.
- A.1.1 Ensaios de Compressão Uniaxial.
- A.1.2. Ensaios de Compressão Puntiforme.
- A.1.3. Ensaios de plano inclinado (Tilt Test).
- A.1.4. Ensaios de Cisalhamento Direto.
- A.1.5. Análises Petrográficas Microscópicas.

10.2. O Apêndice B é constituído dos documentos:

- B.1. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau - Barragem de concreto - descrição de sondagens mecânicas.
- B2. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau - Tomada d'água/casa de força - descrição de sondagens mecânicas.
- B.3. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau - Barragem de concreto – classificação do maciço rochoso (fase de viabilidade e projeto básico) - memória.
- B.4. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau - Tomada d'água/casa de força – classificação do maciço rochoso (Fase de viabilidade e projeto básico) – memória.
- B.5. UHE Serra do Facão – Barragem de concreto e Barragem do leito do rio e margem direita.

B.5.1. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica (RMR, BIENIAWSKI, 1989), das sondagens SR-05, 06, 55, 57, 101, 102, 103, SRBL02 (Fls. 1/2, 2/2), SRBL03, SRBL04, SRBL05, SRBL06, SRMJ e SRMM (Logs no apêndice C).

B.5.2. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica proposta para as fases de viabilidade e projeto básico (CGM) das sondagens SR-05, 06, 55, 57, 101, 102, 103, SRBL02 (Fls. 1/2, 2/2), SRBL03, SRBL04, SRBL05, SRBL06, SRMJ e SRMM.

B.5.3. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica proposta para a fase de projeto executivo (obra) (CGM) das sondagens SR-05, 06, 55, 57, 101, 102, 103, SRBL02 (Fl 1/2, 2/2), SRBL03, SRBL04, SRBL05, SRBL06, SRMJ e SRMM.

B.5.4. UHE Serra do Facão – Túnel de Desvio – Sistemas de Classificação do maciço rochoso

10.3. O Apêndice C é constituído dos seguintes documentos:

UHE SERRA DO FACÃO – PERFIS DE SONDAGEM ROTATIVA (LOGs) constantes da Tabela C.1 de números: SR-05, 06, 55, 57, 101, 102, 103, SRBL02 (Fl 1/2, 2/2), SRBL03, SRBL04, SRBL05, SRBL06, SRMJ e SRMM.

Tabela C.1. Relação de sondagens utilizadas no estudo de tese da UHE Serra do Facão

Sondagem	Página	Sondagem	Página
SR-05	256	SRBL02 (Fl. 2/2),	264
SR-06	257	SRBL03	265
SR-55	258	SRBL04	266
SR-57	259	SRBL05	267
SR-101	260	SRBL06	268
SR-102	261	SRMJ	269
SR-103	262	SRMM	270
SRBL02 (Fl. 1/2),	263	-	-

Apêndice A

A.1. Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau

A.1.1. Ensaios de Compressão Uniaxial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial de amostras selecionadas de furos de sondagem para caracterização dos riolitos do AHE Jirau encontram-se na Tabela A.1.1.1.

Tabela A.1.1.1. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para estudos de viabilidade do AHE Jirau

Registro DCT.C	Profundidade (m)	Nº. Amostra	Alteração	Coerência	Relação h/ϕ	Resistência à compressão (MPa)	Deformação específica (m/m)	Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson
4.0425.01	10,35 - 10,50	única	A1	C1	2,53	303,7	5250	60,6	0,18
4.0426.01	30,59 - 30,74	única	A1	C1	2,97	183,3	3025	61,7	0,19
4.0133.04	10,36 a 10,52	única	A1	C1	2,58	76,2 *	5390 *	14 *	0,16
4.0134.04	19,95 a 20,10	única	A1	C1	2,57	317,3	5306	62	0,18
4.0135.04	43,73 a 43,92	Única	A1	C1	2,60	227,9	3528	65	0,18
4.0136.04	08,90 a 09,05	única	A1	C1	2,63	282,4	4910	60	*
4.0137.04	19,69 a 19,82	única	A1	C1	2,50	306,5	5273	61	0,17
4.0138.04	45,94 a 46,07	única	A1	C1	2,54	321,4	5194	63	0,19
4.0139.04	0,87 a 01,01	única	A1	C1	2,51	247,4	4426	56	0,18
4.0140.04	30,46 a 30,62	única	A1	C1	2,56	268,6	4114	67	0,17
4.0141.04	45,64 a 45,79	única	A1	C1	2,50	234,5	3719	63	0,18
4.0120.07	2,64 – 3,35	Am. A	A1	C1	2,63	194,58	2931	66	0,28
4.0120.07	2,64 – 3,35	Am. B	A1	C1	2,64	165,65	2644	65	0,32
4.0121.07	19,56 – 20,18	única	A1	C1	2,6	160,50	3092	60	0,47
4.0123.07	2,53 – 2,69	única	A1	C1	2,59	160,13	3049	55	0,42

Tabela A.1.1.1. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial - estudos de viabilidade do AHE Jirau (cont.)

4.0126.07	15,31 – 15,50	única	A1	C1	2,63	76,24	1237	54	0,27
4.0127.07	1,62 – 2,04	única	A1	C1	2,49	174,98	3127	64	0,25
4.0130.07	17,23 – 17,49	única	A1	C1	2,59	154,25	2665	62	0,30
4.0145.07	20,00 – 20,72	única	A1	C1	2,58	206,07	3410	64	0,34
4.0146.07	37,38 – 38,13	Am. A	A1	C1	2,59	139,56	2064	61	0,31
4.0146.07	37,38 – 38,13	Am. B	A1	C1	2,58	185,56	2958	63	0,38
4.0147.07	14,16 – 14,50	única	A1	C1	2,57	171,29	2682	65	0,27
4.0148.07	20,47 – 20,70	única	A2	C1	2,71	28,95	2385	12	0,16

A.1.2. Ensaios de Compressão Puntiforme

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão puntiforme de amostras selecionadas de furos de sondagem do AHE Jirau para caracterização dos riolitos, encontram-se na Tabela A.1.2.1.

Tabela A.1.2.1. Resultados dos ensaios de resistência puntiformes de amostras selecionadas de furos de sondagem para avaliação da rocha intacta.

Registro	Furo	Comprimento	nº Amostra	Alteração	Coerência	W (mm)	D (mm)	D' (mm)	P (kN)	I _s	I _{s50}
4.0120.07	SR-203	2,64 – 3,35	1	A1	C1	57,61	36,00	36,00	27,00	10,27	10,40
4.0120.07	SR-203	2,64 – 3,35	2	A1	C1	57,60	36,00	36,00	28,00	10,60	10,74
Média										10,44	10,57
4.0121.07	SR-210	19,56 – 20,18	1	A1	C1	57,62	37,00	37,00	24,50	9,08	9,25
Média										9,08	9,25
4.0122.07	SR-210	30,20 – 30,56	1	A1	C1	44,34	37,00	37,00	14,00	6,78	6,51
4.0122.07	SR-210	30,20 – 30,56	2	A1	C1	44,37	33,00	33,00	29,00	15,55	14,56
4.0122.07	SR-210	30,20 – 30,56	3	A1	C1	44,38	32,00	32,00	22,00	12,25	11,39
4.0122.07	SR-210	30,20 – 30,56	4	A1	C1	44,37	33,00	33,00	11,00	5,99	5,60
4.0122.07	SR-210	30,20 – 30,56	5	A1	C1	44,41	36,00	36,00	13,00	6,47	6,18
4.0122.07	SR-210	30,20 – 30,56	6	A1	C1	44,36	33,00	33,00	19,50	10,55	9,87
Média										9,60	9,02
4.0124.07	SR-211	5,28 – 5,44	1	A1	C1	57,65	33,00	33,00	18,00	7,50	7,45
4.0124.07	SR-211	5,28 – 5,44	2	A1	C1	57,65	34,00	34,00	15,00	6,08	6,08
4.0124.07	SR-211	5,28 – 5,44	3	A1	C1	57,65	38,00	38,00	24,50	8,83	9,05
Média		7,47	7,53								
4.0125.07	SR-211	10,00 – 10,16	1	A1	C1	57,75	33,00	33,00	25,00	10,36	10,29
4.0125.07	SR-211	10,00 – 10,16	2	A1	C1	57,75	36,00	36,00	24,00	9,07	9,18
4.0125.07	SR-211	10,00 – 10,16	3	A1	C1	57,74	34,00	334,00	28,00	1,15	1,92
4.0125.07	SR-211	10,00 – 10,16	4	A1	C1	57,74	34,00	34,00	23,50	9,46	9,46
Média										7,51	7,71
4.0127.07	SR-215	1,62 – 2,04	1	A1	C1	57,29	35,00	35,00	22,00	8,68	8,72
4.0127.07	SR-215	1,62 – 2,04	2	A1	C1	57,29	35,00	35,00	18,00	7,12	7,15
4.0127.07	SR-215	1,62 – 2,04	3	A1	C1	57,29	39,00	39,00	23,00	8,14	8,38
Média										7,98	8,08
4.0128.07	SR-215	2,41 – 2,69	1	A1	C1	57,47	33,00	33,00	27,50	11,44	11,35
4.0128.07	SR-215	2,41 – 2,69	2	A1	C1	57,48	33,00	33,00	27,00	11,18	11,09
4.0128.07	SR-215	2,41 – 2,69	3	A1	C1	57,45	34,00	34,00	30,00	12,11	12,10

Tabela A.1.2.1. Resultados dos ensaios de resistência puntiformes de amostras selecionadas de furos de sondagem para avaliação da rocha intacta. (cont.).

4.0128.07	SR-215	2,41 – 2,69	4	A1	C1	57,44	35,00	35,00	29,50	11,57	11,63
4.0128.07	SR-215	2,41 – 2,69	5	A1	C1	57,99	37,00	37,00	26,00	9,57	9,76
Média										11,17	11,19
4.0129.07	SR-215	3,86 – 4,00	1	A1	C1	57,44	36,00	36,00	7,50	2,90	2,93
4.0129.07	SR-215	3,86 – 4,00	2	A1	C1	57,45	34,00	34,00	2,15	0,89	0,88
Média										1,89	1,91
4.0130.07	SR-215	17,23 – 17,49	1	A1	C1	57,47	31,00	31,00	17,00	7,57	7,40
4.0130.07	SR-215	17,23 – 17,49	2	A1	C1	57,45	35,00	35,00	19,00	7,42	7,46
Média										7,49	7,43
4.0131.07	SR-276	22,70 – 22,95	1	A2	C2	44,34	35,00	35,00	5,50	2,84	2,69
4.0131.07	SR-276	22,70 – 22,95	2	A2	C2	44,38	30,00	30,00	7,00	4,21	3,85
4.0131.07	SR-276	22,70 – 22,95	3	A2	C2	44,38	35,00	35,00	8,00	4,12	3,90
4.0131.07	SR-276	22,70 – 22,95	4	A2	C2	44,31	32,00	32,00	3,60	2,04	1,89
Média										3,30	3,09
4.0132.07	SR-276	23,94 – 24,09	1	A2	C2	44,39	33,00	33,00	8,50	4,63	4,34
4.0132.07	SR-276	23,94 – 24,09	2	A2	C2	44,74	34,00	34,00	7,00	3,61	3,41
Média										4,12	3,88
4.0133.07	SR-276	24,65 – 24,78	1	A2	C2	44,38	34,00	34,00	2,05	1,09	1,03
4.0133.07	SR-276	24,65 – 24,78	2	A2	C2	44,36	32,00	32,00	3,35	1,89	1,76
Média										1,49	1,40
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	1	A2	C2	44,41	30,00	30,00	5,00	3,01	2,76
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	2	A2	C2	44,41	33,00	33,00	15,50	8,31	7,78
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	3	A2	C2	44,37	32,00	32,00	19,00	10,60	9,85
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	4	A2	C2	44,43	34,00	34,00	7,50	3,97	3,74
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	5	A2	C2	44,40	30,00	30,00	14,00	8,35	7,66
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	6	A2	C2	44,41	33,00	33,00	18,50	10,00	9,37
4.0134.07	SR-276	25,00 – 25,45	7	A1	C1	44,40	33,00	33,00	12,50	6,79	6,36
Média										7,29	6,79
4.0135.07	SR-277	11,72 – 11,87	1	A2	C1/C2	44,36	30,00	30,00	20,00	11,90	10,90
4.0135.07	SR-277	11,72 – 11,87	2	A2	C1/C2	44,34	34,00	34,00	17,00	8,94	8,43
4.0135.07	SR-277	11,72 – 11,87	3	A2	C1/C2	44,37	34,00	34,00	24,50	12,83	12,09
Média										11,22	10,47
4.0137.07	SR-215	17,45 – 17,75	1	A1	C1	57,29	35,00	35,00	22,50	8,87	8,91
4.0137.07	SR-215	17,45 – 17,75	2	A1	C1	57,27	34,00	34,00	23,50	9,48	9,46
4.0137.07	SR-215	17,45 – 17,75	3	A1	C1	57,26	34,00	34,00	24,00	9,74	9,72
4.0137.07	SR-215	17,45 – 17,75	4	A1	C1	57,26	31,00	31,00	16,50	7,38	7,21
Média										8,87	8,83
4.0138.07	SR-215	20,75 – 21,12	1	A1	C1	44,30	33,00	33,00	4,50	2,47	2,31
4.0138.07	SR-215	20,75 – 21,12	2	A1	C1	44,30	34,00	34,00	7,00	3,72	3,50
4.0138.07	SR-215	20,75 – 21,12	3	A1	C1	44,32	34,00	34,00	11,50	6,08	5,73
4.0138.07*	SR-215	20,75 – 21,12	4	A1	C1	44,33	35,00	35,00	inválido		
4.0138.07*	SR-215	20,75 – 21,12	5	A1	C1	44,31	35,00	35,00	inválido		
4.0138.07	SR-215	20,75 – 21,12	6	A1	C1	44,32	31,00	31,00	18,50	10,67	9,85
4.0138.07	SR-215	20,75 – 21,12	7	A1	C1	44,34	34,00	34,00	19,00	9,98	9,41
4.0138.07	SR-215	20,75 – 21,12	8	A1	C1	44,33	36,00	36,00	24,50	12,13	11,57
Média										7,51	7,06
4.0139.07	SR-215	24,00 – 24,28	1	A1	C1	44,45	35,00	35,00	12,00	6,14	5,83
4.0139.07	SR-215	24,00 – 24,28	2	A1	C1	44,44	35,00	35,00	17,00	8,58	8,15
Média										7,36	6,99
4.0140.07	SR-205	6,47 – 6,77	1	A1	C1	44,39	35,00	35,00	30,00	15,23	14,45
4.0140.07	SR-205	6,47 – 6,77	2	A1	C1	44,38	35,00	35,00	16,00	8,18	7,76
4.0140.07	SR-205	6,47 – 6,77	3	A1	C1	44,38	34,00	34,00	23,50	12,31	11,60
4.0140.07	SR-205	6,47 – 6,77	4	A1	C1	44,37	32,00	32,00	7,00	3,94	3,67

Tabela A.1.2.1. Resultados dos ensaios de resistência puntiformes de amostras selecionadas de furos de sondagem para avaliação da rocha intacta. (cont.).

Média										9,91	9,37
4.0141.07	SR-203	10,80 – 11,24	1	A1	C1	57,52	33,00	33,00	26,50	11,02	10,94
4.0141.07	SR-203	10,80 – 11,24	2	A1	C1	57,48	31,00	31,00	29,00	12,78	12,51
4.0141.07	SR-203	10,80 – 11,24	3	A1	C1	57,44	30,00	30,00	28,50	13,05	12,67
4.0141.07	SR-203	10,80 – 11,24	4	A1	C1	57,45	34,00	34,00	32,00	12,91	12,90
4.0141.07	SR-203	10,80 – 11,24	5	A1	C1	57,42	36,00	36,00	31,50	12,01	12,15
Média										12,36	12,23
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	1	A1	C1	44,35	32,00	32,00	26,50	14,74	13,70
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	2	A1	C1	44,34	32,00	32,00	26,50	14,74	13,70
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	3	A1	C1	44,34	31,00	31,00	19,00	10,95	10,11
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	4	A1	C1	44,32	33,00	33,00	26,00	14,03	13,13
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	5	A1	C1	44,32	31,00	31,00	27,50	15,72	14,51
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	6	A1	C1	44,32	33,00	33,00	25,00	13,50	12,63
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	7	A1	C1	44,35	32,00	32,00	24,00	13,36	12,42
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	8	A1	C1	44,33	31,00	31,00	23,00	13,23	12,21
4.0142.07	SR-204	7,39 – 8,08	9	A1	C1	44,34	30,00	30,00	21,50	12,79	11,71
Média										13,67	12,68
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	1	A1	C1	44,88	33,00	33,00	24,00	12,80	12,02
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	2	A1	C1	44,95	35,00	35,00	24,50	12,23	11,64
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	3	A1	C1	44,85	33,00	33,00	25,50	13,60	12,77
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	4	A1	C1	44,69	30,00	30,00	22,00	12,98	11,91
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	5	A1	C1	44,72	32,00	32,00	25,00	13,80	12,85
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	6	A1	C1	44,89	34,00	34,00	16,50	8,58	8,10
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	7	A1	C1	44,80	33,00	33,00	24,00	12,83	12,03
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	8	A1	C1	44,90	31,00	31,00	15,00	8,56	7,92
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	9	A1	C1	44,78	35,00	35,00	19,00	9,60	9,13
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	10	A1	C1	44,70	33,00	33,00	27,00	14,45	13,55
Média										11,94	11,19
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	11	A1	C1	44,73	33,00	33,00	23,50	12,58	11,80
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	12	A1	C1	44,68	33,00	33,00	25,00	13,39	12,56
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	13	A1	C1	44,99	33,00	33,00	24,00	12,77	11,99
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	14	A1	C1	45,05	34,00	34,00	25,00	12,89	12,19
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	15	A1	C1	45,04	32,00	32,00	24,00	13,08	12,20
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	16	A1	C1	44,60	32,00	32,00	23,00	12,74	11,86
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	17	A1	C1	44,59	34,00	34,00	24,00	12,51	11,80
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	18	A1	C1	44,79	33,00	33,00	22,00	11,77	11,04
4.0143.07	SR-205	3,12 – 4,20	19	A1	C1	44,84	32,00	32,00	24,00	13,22	12,31
Média										12,77	11,97
4.0144.07	SR-320	40,88 – 41,34	1	A1	C1	57,34	32,00	32,00	24,00	10,33	10,18
4.0144.07	SR-320	40,88 – 41,34	2	A1	C1	57,39	33,00	33,00	22,50	9,33	9,25
4.0144.07	SR-320	40,88 – 41,34	3	A1	C1	57,41	32,00	32,00	31,00	13,30	13,11
4.0144.07	SR-320	40,88 – 41,34	4	A1	C1	57,44	33,00	33,00	28,00	11,65	11,56
4.0144.07	SR-320	40,88 – 41,34	5	A1	C1	57,42	30,00	30,00	25,50	11,69	11,35
Média										11,26	11,09
4.0145.07	SR-320	20,00 – 20,72	1	A1	C1	57,06	32,00	32,00	17,50	7,60	7,48
4.0145.07	SR-320	20,00 – 20,72	2	A1	C1	57,02	34,00	34,00	11,50	4,72	4,71
4.0145.07	SR-320	20,00 – 20,72	3	A1	C1	57,09	34,00	34,00	27,50	11,18	11,15
4.0145.07	SR-320	20,00 – 20,72	4	A1	C1	57,08	33,00	33,00	27,50	11,52	11,41
4.0145.07	SR-320	20,00 – 20,72	5	A1	C1	57,04	32,00	32,00	24,50	10,54	10,37

Tabela A.1.2.1. Resultados dos ensaios de resistência puntiformes de amostras selecionadas de furos de sondagem para avaliação da rocha intacta. (cont.).

Média										9,11	9,02
4.0146.07	SR-320	37,38 – 38,13	1	A1	C1	57,45	34,00	34,00	27,00	10,91	10,90
4.0146.07	SR-320	37,38 – 38,13	2	A1	C1	57,45	33,00	33,00	27,00	11,18	11,10
4.0146.07	SR-320	37,38 – 38,13	3	A1	C1	57,47	35,00	35,00	11,50	4,55	4,58
4.0146.07	SR-320	37,38 – 38,13	4	A1	C1	57,45	35,00	35,00	29,50	11,57	11,63
4.0146.07	SR-320	37,38 – 38,13	5	A1	C1	57,46	31,00	31,00	26,50	11,74	11,49
Média										9,99	9,94
4.0147.07	SR-202	14,16 – 14,50	1	A1	C1	57,10	34,00	34,00	20,00	8,16	8,14
4.0147.07	SR-202	14,16 – 14,50	2	A1	C1	57,43	35,00	35,00	22,00	8,66	8,70
4.0147.07	SR-202	14,16 – 14,50	3	A1	C1	57,43	31,00	31,00	20,00	8,89	8,70
Média										8,57	8,51
4.0148.07	SR-296	20,47 – 20,70	1	A2	C1	53,94	33,00	33,00	4,50	2,03	1,98
Média										2,03	1,98
4.0149.07	SR-296	58,87 – 59,00	1	A3	C2	44,38	30,00	30,00	15,00	8,95	8,20
4.0149.07	SR-296	58,87 – 59,00	2	A3	C2	44,37	35,00	35,00	17,00	8,68	8,24
Média										8,82	8,22
4.0150.07	SR-296	66,10 – 66,45	1	A3	C2	41,97	30,00	30,00	16,00	10,09	9,13
4.0150.07	SR-296	66,10 – 66,45	2	A3	C2	41,77	35,00	35,00	15,00	8,06	7,54
4.0150.07	SR-296	66,10 – 66,45	3	A3	C2	41,96	32,00	32,00	13,50	7,99	7,34
4.0150.07	SR-296	66,10 – 66,45	4	A3	C2	41,97	33,00	33,00	15,50	8,89	8,21
4.0150.07	SR-296	66,10 – 66,45	5	A3	C2	41,96	34,00	34,00	17,00	9,45	8,80
4.0150.07	SR-296	66,10 – 66,45	6	A3	C2	41,96	33,00	33,00	23,00	13,13	12,14
Média										9,60	8,86
4.0151.07	SR-296	64,75 – 65,09	1	A3	C2	41,93	32,00	32,00	19,00	11,22	10,30
4.0151.07	SR-296	64,75 – 65,09	2	A3	C2	41,92	34,00	34,00	19,50	10,83	10,08
4.0151.07	SR-296	64,75 – 65,09	3	A3	C2	41,93	34,00	34,00	16,00	8,91	8,29
4.0151.07	SR-296	64,75 – 65,09	4	A3	C2	41,92	33,00	33,00	15,00	8,61	7,96
Média										9,89	9,16
4.0152.07	SR-296	67,47 – 67,71	1	A3	C2	41,97	34,00	34,00	9,50	5,31	4,94
4.0152.07	SR-296	67,47 – 67,71	2	A3	C2	41,99	32,00	32,00	7,50	4,38	4,03
4.0152.07	SR-296	67,47 – 67,71	3	A3	C2	41,98	33,00	33,00	12,50	7,18	6,64
Média										5,63	5,20
4.0153.07	SR-296	68,66 – 69,04	1	A3	C2	41,92	32,00	32,00	7,50	4,47	4,10
4.0153.07	SR-296	68,66 – 69,04	2	A3	C2	41,92	34,00	34,00	19,50	10,83	10,08
4.0153.07	SR-296	68,66 – 69,04	3	A3	C2	41,92	32,00	32,00	4,50	2,69	2,47
4.0153.07	SR-296	68,66 – 69,04	4	A3	C2	41,93	34,00	34,00	14,50	8,08	7,52
Média										6,52	6,04

A.1.3. Ensaios de plano inclinado (Tilt Test)

As amostras selecionadas para a determinação do ângulo do plano inclinado (Tilt Test) foram algumas amostras já testadas no ensaio de compressão uniaxial. O critério para escolha foi a verificação das superfícies laterais das amostras. Os corpos de prova que não apresentaram danos visíveis foram então submetidos ao teste.

A.1.3.1. Apresentação dos resultados

A Tabela A.1.3.1.1 consta os valores do ângulo de inclinação quando do deslizamento (ângulo de atrito básico), determinados nos ensaios de plano inclinado, a partir da média aritmética de três determinações.

Tabela A.1.3.1.1. Resultados dos ensaios de plano inclinado (Tilt Test)

Registro	Nº da Sondagem	Profundidade (m)	Amostra	Ângulo de deslizamento (ϕ_b)
4.0120.07	SR - 203	2,64 – 3,35	A	20,4°
4.0120.07			B	17,8°
4.0121.07	SR – 210	19,56 – 20,18	**	18,9°
Média				19,0°
4.0123.07	SR - 211	2,53 – 2,69	**	20,1°
4.0126.07		15,31 – 15,50	**	18,0°
4.0130.07	SR – 215	17,23 – 17,49	**	18,5°
Média				18,9°
4.0146.07	SR – 320	37,38 – 38,13	**	24,1°
4.0147.07	SR – 202	14,16 a 14,50	**	20,0°
4.0148.07	SR – 239	20,47 – 20,70	**	24,2°
Média				22,8°

A.1.4. Ensaios de Cisalhamento Direto

A-1.1.1. Metodologia de Execução

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras de rocha com fraturas abertas para se determinar o ângulo de atrito de base. Os ensaios foram executados de acordo com procedimento interno Furnas 4.07.15, baseado no método ISRM - *Suggested Methods for Determining Shear Strength*, utilizando-se uma prensa de carga controlada, com capacidade de aplicação de 100kN de cargas axial e normal.

O carregamento normal foi aplicado através de peso-morto e o cisalhante através de um conjunto macaco-manômetro, registrado através de célula de carga. Os deslocamentos verticais e horizontais foram medidos através de 06 LVDTs (quatro verticais e dois horizontais).

Os corpos-de-prova foram preparados de forma que a fratura se encontrasse na horizontal, paralela ao plano de cisalhamento. As tensões normais aplicadas foram, em um mesmo corpo-de-prova, de 1,0, 2,0 e 4,0 MPa.

A-1.1.2. Apresentação dos Resultados

A Tabela A.1.4.1.1 inclui os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela A.1.4.1.1. Relação de amostras e os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Registro	Furo	Comprimento (m)	Ângulo de atrito (ϕ_b)	R ²
4.0120.07	SR – 203	2,64 – 3,35	24,3	0,6389
4.0121.07	SR – 210	19,56 – 20,18	33,3	0,9666
4.0127.07	SR – 215	1,62 – 2,04	23,8	0,9931
4.0129.07	SR – 215	3,86-4,00	19,3	0,9752
4.0134.07	SR - 276	25,00 – 25,45	16,7	0,9948
4.0140.07	SR – 205	6,47 – 6,77	20,4	0,5365
4.0141.07	SR – 203	10,80 – 11,24	16,5	0,9732
4.0144.07	SR – 230	40,88 – 41,34	31,4	0,8907
4.0145.07	SR – 230	20,00 – 20,72	17,4	0,5838
4.0146.07	SR – 230	37,38 – 38,13	18,5	0,4500
4.0150.07	SR – 296	66,10 – 66,45	12,5	0,9958
4.0151.07	SR – 296	64,75 – 65,09	17,1	0,6632
4.0153.07	SR – 296	68,66 – 69,04	17,7	0,9870

Para a determinação do ângulo de atrito de base foram plotados em gráfico os resultados de tensão residual cisalhante e a respectiva tensão normal aplicada. Como as fraturas ensaiadas estavam abertas não se considerou a coesão, fazendo-se a reta linear das tendências interceptar os eixos em 0, conforme ilustrado na Figura A.1.211. mostram os resultado tensão normal x tensão cisalhante de atrito e o respectivos ângulo de atrito para cada fratura.

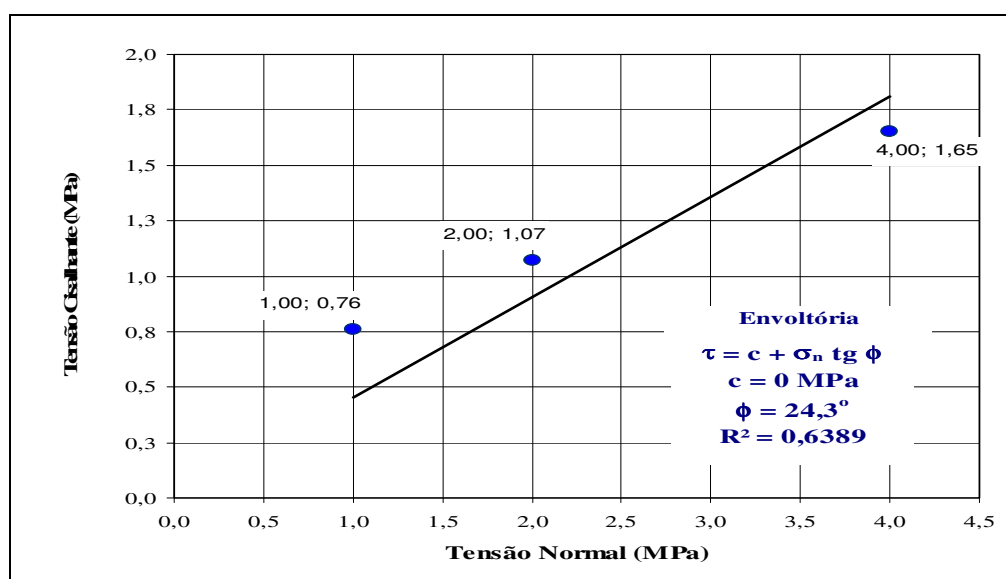


Figura A.1.4.1.1. Envoltória - Tensão normal x tensão cisalhante – Registro 4.0120.07

A.1.5. Análises Petrográficas Microscópicas

Análises Petrográficas Microscópicas realizadas nas sondagens SR-200, 296, 299 e 300, retirados a profundidades variando predominantemente entre 10 e 45m, indicaram a presença, no local do aproveitamento, de rocha ígnea, classificada microscopicamente como riolito pórfiro.

A rocha apresenta textura geral porfirítica, caracterizada por uma matriz microcristalina felsítica, englobando fenocristais de dimensões variadas (0,08 a 3,5mm). A matriz consiste essencialmente de quartzo e feldspato, que se apresentam em pequeninos cristais em íntima associação, impossível de serem individualizados dos minerais acessórios, os opacos (mais abundantes), ocorrendo em concentrações pontuais ou ao longo de fraturas.

Pelo exame macroscópico, em síntese a rocha apresenta coloração avermelhada e estrutura maciça. Microscopicamente a rocha apresenta composição mineralógica estimada entre 55 e 65% de fenocristais, 30 a 40% de feldspato, 10 a 15% de quartzo, menos de 10% de anfibólio/piroxênio e opacos. A matriz é formada de quartzo, feldspato e opacos (Figura A.1.5.1).

Os resultados estão apresentados separados por amostra, com sua respectiva descrição petrográfica (microscopia de luz transmitida). O resultado do exame macroscópico de todas as amostras possibilitou a classificação da rocha como Riolito Pórfiro de natureza ígnea. Apresenta coloração marrom avermelhado e estrutura maciça. É composta por uma massa fundamental de granulação muito fina, envolvendo fenocristais de feldspatos e quartzo, e não foram observados indícios de desagregação nas amostras-de-mão estudadas.

A análise em lâmina delgada confirma que a rocha é de natureza ígnea, classificada microscopicamente como Riolito Pórfiro. Microscopicamente a rocha apresenta composição mineralógica estimada de: 60-65% de Fenocristais; 45-50% de feldspatos; 10% de quartzo; 5-10% de piroxênio/anfibólio/clorita/opacos e; 1-3% de zircão/coríndon/apatita; 40-45% de Matriz: (feldspato+quartzo+opacos).

Rocha semelhante à 4.0133.2004, diferindo apenas nos seguintes aspectos: maior proporção de piroxênio parcialmente substituído por anfibólio e opacos; quartzo poligonizado em tamanho um pouco maior que o restante da mesma; menor quantidade de fenocristais de quartzo; menor quantidade de clorita na matriz; em alguns fenocristais de feldspatos ocorrem pequenos cristais esverdeados, que não foi possível a sua identificação; e não foi evidenciada a presença de material vítreo, porém a análise é muito pontual, podendo em outras regiões ocorrer o mesmo.

Rocha de textura geral porfirítica, caracterizada pela presença de uma matriz microcristalina felsítica, englobando fenocristais de dimensões variadas (0,08 a 3,5mm).

A matriz consiste essencialmente de quartzo e feldspato, que se apresentam em pequenos cristais em íntima associação, impossível de serem individualizados dos minerais acessórios. Os opacos (mais abundantes) ocorrem em concentrações pontuais ou ao longo de fraturas; também são observados nos planos de clivagem dos fenocristais de feldspatos, alguns estão alterados para hidróxido/óxido de ferro. Em alguns pontos na matriz, nota-se que os cristais estão recrystalizados, indicados pelos quartzos poligonizados e com junções tríplexes.

Os fenocristais de feldspato (K-feldspato e plagioclásio) apresentam-se em cristais subidiomórficos a idiomórficos, geralmente isolados, com geminações características (nos plagioclásios) e parcialmente substituídos por argilominerais, que promovem um aspecto turvo aos cristais; o K-feldspato mostra freqüentes intercrescimentos peritéticos.

Os fenocristais de quartzo são idiomórficos a subidiomórficos, às vezes estão corroídos pela matriz e apresentam inclusões de porções da matriz. Alguns desses quartzos apresentam extinção ondulante de alto grau, maior que 25°. O piroxênio (clinopiroxênio) ocorre em microfenocristais, parcialmente substituídos por anfibólio, clorita e opacos.

A coloração avermelhada da rocha pode ser devida à ampla distribuição dos opacos, tanto em pequenos cristais, quanto sob a forma de uma poeira muito fina (avermelhada em luz natural do microscópio) (Figura A.1.5.2).



Figura A.1.5.1. SR 296 – Profundidade: 19,95 a 20,10m .Vista Geral da Amostra 4.0134.2004 - Amostra Maciça, com Fenocristais de Feldspatos e Quartzo (Pontos Brancos), sem Desagregação e Fissuração.

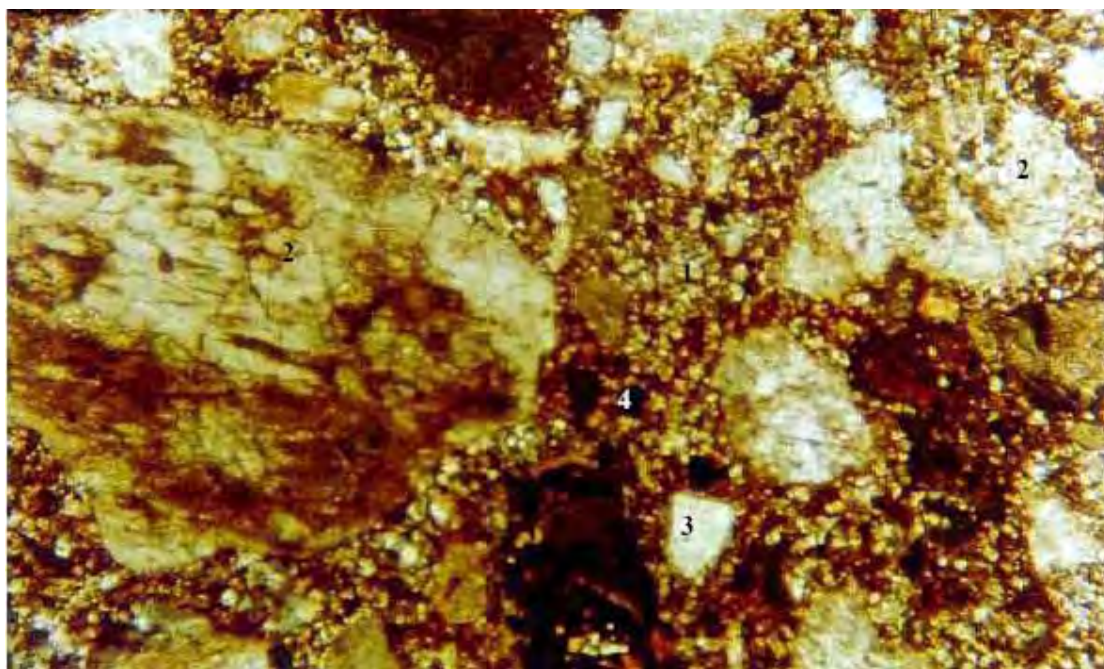


Figura A.1.5.2. Fotomicrografia - Vista Geral da Lâmina. Matriz (1); Feldspato (2); Quartzo (3); e Opaco (4). Imagem ao Microscópio Ótico com Nicóis Cruzados. Aumento de 25x.

Apêndice B

B.1. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau – Barragem de concreto.

Tabela B.1.1. Sondagens rotativas utilizadas nos estudos.

FURO	Coord. NORTE	Coord. ESTE	Cota BOCA	Cota topo ROCHOSO	Compr. TOTAL (m)	Espes. SOLO (m)	Comp. ROCHA (m)	N.A.	EPA (total)
SR-205	8 968 561,80	310 350,56	77,37	73,01	15,15	4,36	10,79	7,20	1
SR-204	8 968 441,37	310 235,34	84,70	82,20	14,98	2,50	12,48	5,80	1
SR-203	8 968 225,32	310 037,62	83,27	83,17	15,20	0,10	15,10	5,52	4
SR-202	8 968 335,00	310 127,49	78,81	78,21	15,23	0,60	14,63	1,47	3

Tabela B.1.2. Nomenclatura de classificação das descontinuidades.

TIPO	ABERTURA	PREENCHIMENTO	SUPERFÍCIE (Paredes)	ASPEREZA (Paredes)	TIPO PREENCHIMENTO
Diáclase (D)	Aberta	Sem Preenchimento: SP	Plana/Regular: Pr Irregular: Ir Curva: Cv	Rugosa: r Lisa: l Estriada: e	Oxidada: ox Filmes de manganês: mn Alteração: al Outros: xx
Fratura (f)	Aberta	Com Preenchimento: CP	Idem	Idem	Indeterminado: Po Pétreo, granular: P1 Misto: P2 Argiloso: P3
Falha (F)	Fechada	Cimentada: C	Idem	-	CIMENTO: Carbonato: ca Epidoto: ep Ferruginoso: fe Sílica: si Outros: xx
Contato (L)	Fechada	Não cimentada: NC	Idem	-	CONTATO: Rocha x rocha: rr Película de argila: ar
Inclinação com a horizontal: Subhorizontal (0 ⁰ a 20 ⁰): SH; Subvertical (70 ⁰ a 90 ⁰): SV; Inclinação (20 ⁰ a 70 ⁰) I					

B.1.1. Sondagem SR – 202

Coordenada: Norte: 8 968 335,00; Este: 310 127,49. Cota da boca: 78,81 m.
 Inclinação: Vertical. Diâmetro: HX (0,00 a 1,55 m); Diâmetro: NX (1,55 a 15,23 m).
 Comprimento do furo: 15,23 m

- **Descrição do furo:**

- 0,00 a 0,60 m: Colúvio/Aluvionar - Areia fina, amarelada.
(Amostra lavada)
- 0,60 a 0,90 m: Riolito - Riolito pouco alterado, coerente, extremamente fraturado (em fragmentos centimétricos), avermelhado com pintas claras e escuras. (A2, C1, F5).

Fraturas (f):

1) 0,60 a 0,90m – Extremamente fraturado (fratura sub-vertical com várias fraturas inclinadas)

- 0,90 a 2,30 m: Riolito - Riolito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

2) 0,90 a 1,055m – Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SV, Ir, NC, r, rr, ox**

3) 1,68m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

4) 2,30m - Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

- 2,30 a 3,05 m: Riolito - Riolito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

5) 2,76m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

6) 2,84m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox**

7) 3,05m - Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox**

- 3,05 a 15,23 m: Riolito - Riolito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

8) 4,31m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox**

9) 5,83m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox**

10) 6,68m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox**

11) 8,10m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

12) 8,59m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

13) 11,09m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

14) 11,33m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

15) 11,41 – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**

- Observação geral:

Fraturas mecânicas predominantemente sub-horizontais.

- Ensaio de Infiltração: Não realizado

Tabela B.1.1.1. Ensaio de perda d'água

Nº	Prof do Ensaio (m)	Pressão Máx. (Kg/cm ²)	Vazão Média (L/Min)	N. A. (m)	Altura do Manômetro (m)	Coef. de Permeabilidade
01	3,00 a 6,00	1,125	0,00	1,47	0,50	-
02	6,00 a 11,00	2,125	0,00	1,42	0,50	-
03	11,00 a 15,00	3,250	0,00	0,84	0,50	-

Tabela B.1.1.2. SR-202 - RQD

MANOBRAS		Comp. Manobra (m)	Recup. Obtido	MEDIDAS (m)					Soma das Medidas	Soma Medidas C. Manobra	RQD(%)
DE	A										
0,10	1,00	0,90	0,90	0,20	0,30	0,12	0,28		0,90	1,00	100
1,00	2,38	1,38	1,38	0,50	0,30	0,32	0,26		1,38	1,00	100
2,38	3,71	1,33	1,33	0,17	0,30	0,40	0,21	0,25	1,33	1,00	100
3,71	4,70	0,99	0,99	0,33	0,38	0,28			0,99	1,00	100

Tabela B.1.1.2. SR-202 – RQD (cont.)

MANOBRAS		Comp. Manobra (m)	Recup. Obtido	MEDIDAS (m)					Soma das Medidas	Soma Medidas C. Manobra	RQD(%)
DE	A										
4,70	5,59	0,89	0,89	0,38	0,19	0,32			0,89	1,00	100
5,59	6,65	1,06	1,06	0,30	0,17	0,38	0,21		1,06	1,00	100
6,65	7,71	1,06	1,06	0,22	0,25	0,41	0,18		1,06	1,00	100
7,71	8,23	0,52	0,52	0,34	0,18				0,52	1,00	100
8,23	8,93	0,70	0,70	0,34	0,36				0,70	1,00	100
8,93	9,83	0,90	0,90	0,25	0,30	0,17	0,18		0,90	1,00	100
9,83	10,58	0,75	0,75	0,22	0,31	0,22			0,75	1,00	100
10,58	11,18	0,60	0,60	0,33	0,27				0,60	1,00	100
11,18	12,34	1,16	1,16	0,23	0,31	0,18	0,29	0,15	1,16	1,00	100
12,34	12,79	0,45	0,45	0,27	0,18				0,45	1,00	100
12,79	13,72	0,93	0,93	0,29	0,31	0,33			0,93	1,00	100
13,72	15,20	1,48	1,48	0,29	0,36	0,28	0,26	0,29	1,48	1,00	100
		15,10							15,10		

B.1.2. Sondagem SR –203

Coordenada: Norte: 8 968 225,324; Este: 310 037,623. Cota da boca: 83,27m.
 Inclinação: Vertical. Diâmetro: HX (0,00 a 1,00 m); Diâmetro: NX (1,00 a 15,20 m).
 Comprimento do furo: 15,20 m.

- Descrição do furo:**

- 0,00 a 0,10 m: Colúvio-aluvionar - Areia fina, amarelada.

(Amostra lavada)

- 0,10 a 15,20 m: Riolito - Riolito pórfiro são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

1) 0,26m – Sub-horizontal, Irregular, rugosa, aberta sem preenchimento, superfície oxidada –
 (f): **SH, Ir, r SP, ox.**

2) 1,09m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

3) 1,88 a 2,10m – Sub-vertical, Irregular, fechada cimentada, cimento de carbonato – (f): **SV, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**

4) 5,56m - Sub-horizontal, Irregular, fechada cimentada, cimento de carbonato – (f): **SH, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**

5) 5,59m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox**

6) 6,57m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 7) 10,25m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 8) 10,36m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 9) 10,95m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 10) 11,18m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 11) 11,73m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 12) 14,48m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 13) 14,77m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- Observação geral: Fraturas mecânicas predominantemente sub-horizontais.

Tabela B.1.2.1. Caixas de testemunho

Caixa	Profundidade (m)	Caixa	Profundidade (m)
01/05	0,00 a 2,88	02/05	2,88 a 6,24
03/05	6,24 a 9,73	04/05	9,73 a 12,79
05/05	12,79 a 15,20		

- **Ensaio de Infiltração:** Não realizado

Tabela B.1.2.2. Ensaio de perda d'água

Nº	Profundidade do Ensaio (m)	Pressão Máx. (Kgf/cm ²)	Vazão Média (L/Min)	N. A. (m)	Altura do Manômetro (m)	Coef. de Permeabilidade
01	1,70 a 4,70	0,80	0,00	seco	0,60	-
02	4,70 a 7,70	1,55	0,00	2,52	0,60	-
03	7,70 a 10,58	2,28	0,00	5,52	0,60	-
04	10,58 a 15,20	3,22	0,00	5,52	0,60	-

Tabela B.1.2.3. SR-203 – RQD

MANOBRAS		Comp. Manobra (m)	Recup. Obtido	MEDIDAS (m)						Soma Das Medidas	Soma Medidas C. Manobra	RQD (%)
DE	A											
0,60	0,90	0,30	0,25	0,12						0,12	0,40	40
0,90	1,20	0,30	0,30	0,25						0,25	0,83	83
1,20	1,55	0,35	0,35	0,32						0,32	0,91	91
1,55	3,05	1,50	1,47	0,15	0,39	0,16	0,46	0,12	0,10	1,38	0,92	92
3,05	4,55	1,50	1,45	1,20	0,17					1,37	0,91	91
4,55	6,00	1,45	1,45	1,25	0,14					1,39	0,96	96
6,00	7,20	1,20	1,20	0,60	0,50					1,10	0,92	92
7,20	8,00	0,80	0,75	0,75						0,75	0,94	94
8,00	8,50	0,50	0,48	0,30						0,30	0,60	60
8,50	9,75	1,25	1,20	0,12	0,36	0,56				1,04	0,83	83
9,75	10,25	0,50	0,50	0,50						0,50	1,00	100
10,25	11,00	0,75	0,75	0,75						0,75	1,00	100
11,00	11,72	0,72	0,72	0,23	0,10	0,18				0,51	0,71	71
11,72	12,67	0,95	0,95	0,40	0,49					0,89	0,94	94
12,67	12,97	0,30	0,30	0,30						0,30	1,00	100
12,97	14,27	1,30	1,20	1,20						1,20	0,92	92
14,27	15,23	0,96	0,96	0,96						0,96	1,00	100
		14,63								13,13		

B.1.3. Sondagem SR – 204

Coordenada: Norte: 8 968 441,370; Este: 310 235,349. Cota da boca: 84,70 m.

Inclinação: Vertical. Diâmetro: BX (0,00 a 14,98 m). Comprimento do furo: 14,98 m

- **Descrição do furo:**

- 0,00 a 1,20 m: Colúvio - Areia fina, marrom, com fragmentos miúdos de riolito (grãos com textura de areia média a grossa). (Amostra lavada)
- 1,20 a 1,61 m: Bloco de Riolito - Bloco de riolito, pouco alterado, coerente, avermelhado. (A1, C1)
- 1,61 a 1,81 m: Bloco de Riolito - Bloco de riolito, muito alterado, pouco coerente, avermelhado. (A4, C3)
- 1,81 a 2,50 m: Provável Bloco de Riolito Provável bloco de riolito, muito alterado, incoerente.

Obs: Perda total da água de circulação neste trecho. (A5, C4)

- 2,50 a 2,93m: Riolito - Riolito pórfiro, pouco alterado, coerente, extremamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A2, C1, F5)

Fraturas (f):

1) 2,58 a 2,88m – Extremamente fraturado (fratura sub-vertical com várias fraturas inclinadas)

- 2,93 a 3,18m: Riólito - Riólito pórfiro, muito alterado, pouco coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A2, C1, F2)

Fraturas (f):

2) 3,03 a 3,18m – Sub-vertical, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SV, Ir, SP, r, al.**

3) 3,18m – Inclinada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

- 3,18 a 3,83m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

4) 3,45m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox**

5) 3,71m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox**

6) 3,83 a 4,75m – Extremamente fraturado (baixa recuperação)

- 3,83 a 4,75m: Riólito - Riólito pórfiro, muito alterado, pouco coerente, extremamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A4, C3, F5)

Fraturas (f):

7) 4,75m - Inclinada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

- 4,75 a 5,67m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F3)

Fraturas (f):

8) 4,84m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

9) 4,84 a 4,96m – Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SV, Ir, NC, r, rr, ox.**

10) 5,00m - Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

11) 5,02m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**

12) 5,06m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

13) 5,10m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

14) 5,16m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

15) 5,67 - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 5,67 a 10,04m: Riolito - Riolito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

16) 5,86m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

17) 6,00m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

18) 6,04m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

19) 6,46m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

20) 6,54m – Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SH, Ir, SP, r, al.**

21) 6,56m - Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SH, Ir, SP, r, al.**

22) 6,88m - Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SH, Ir, SP, r, al.**

23) 6,98m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

24) 7,04m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

25) 7,20m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

26) 7,28m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

27) 7,55m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

28) 7,72m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

29) 7,86m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

30) 7,89m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**

31) 8,04m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

32) 8,32m - Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SH, Ir, SP, r, al.**

33) 8,54m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

34) 8,66m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

35) 8,99m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**

36) 9,53m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

37) 9,74m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**

38) 10,04m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 10,04 a 12,34m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

39) 10,29m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

40) 11,67m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

41) 12,34m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 12,34 a 14,98m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F3)

Fraturas (f):

- 42) 12,41m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 43) 12,81m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 44) 13,04 a 13,29m - Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SV, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 45) 13,15m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 46) 13,34m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 47) 13,44m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 48) 13,60m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 49) 13,96m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 50) 14,14m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 51) 14,36m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 52) 14,67m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- Observação geral:

Fraturas mecânicas predominantemente sub-horizontais.

- Ensaio de Infiltração: Não realizado

Tabela B.1.3.1. Ensaio de perda d'água

Nº	Prof do Ensaio (m)	Pressão Máx. (Kg/cm ²)	Vazão Média (L/Min)	N. A. (m)	Altura do Manômetro (m)	Coef. de Permeabili- dade
01	9,98 a 14,98	3,25	0,4	5,80	0,45	2,56x10 ⁻⁰⁶

Tabela B.1.3.2. SR-204 – RQD

Manobras – trechos da sondagem (m)				Comprimento amostras						Soma Am.>10cm	RQD
De	a	Comprimento	Recuperação	maior que 10cm							(%)
2,50	3,18	0,68	0,68	0,68						0,68	100
3,18	4,75	1,57	0,85	0,15	0,12	0,26	0,11	0,11	0,72	1,47	94
4,75	5,24	0,49	0,49							0,00	0
5,24	6,04	0,80	0,80	0,43	0,18	0,15				0,76	95
6,04	7,28	1,24	1,24	0,20	0,11	0,11	0,82			1,24	100
7,28	8,08	0,80	0,80	0,17	0,16	0,14	0,19			0,66	83
8,08	8,99	0,91	0,91	0,23	0,20	0,11	0,34			0,88	97
8,99	10,29	1,30	1,30	0,24	0,33	0,17	0,29	0,11	0,14	1,28	98
10,29	11,59	1,30	1,30	0,38	0,26	0,48	0,18			1,30	100
11,59	12,65	1,06	1,06	0,12	0,54	0,33				0,99	93
12,65	13,60	0,95	0,95	0,17	0,33	0,11	0,14			0,75	79
13,60	14,98	1,38	1,38	0,38	0,17	0,28	0,16	0,11		1,10	80
		12,48								11,11	

B.1.4. Sondagem SR –205

Coordenada: Norte: 8 968 561,80; Este: 310 350,56. Cota da boca: 77,37 m.
Inclinação: Vertical. Diâmetro: BX (0,00 a 15,15 m). Comprimento do furo: 15,15 m

- **Descrição do furo:**

- 0,00 a 1,50 m: Colúvio - Blocos e fragmentos de riolito muito alterado e pouco coerente.
- 1,50 a 1,78 m: Bloco de Riolito - Bloco de riolito, pouco alterado, coerente, (A2, C1), avermelhado, com as superfícies inferior e superior do testemunho alteradas e oxidadas.
- 1,78 a 2,46 m: Blocos de Riolito com cascalhos - Blocos e fragmentos de riolito muito alterado, pouco coerente, (A4, C3), e cascalhos arredondados com diâmetro até 2,50 cm.
- 2,46 a 3,10 m: Blocos de Riolito - Blocos e fragmentos de riolito muito alterado, pouco coerente, (A4, C3), avermelhados e oxidados.
- 3,10 a 3,25m: Bloco de Riolito - Bloco de riolito, pouco alterado, coerente, (A2, C1), avermelhado, com as superfícies inferior e superior do testemunho alteradas e oxidadas.
- 3,25 a 4,36m: Provável topo rochoso aos 4,36m - (Amostra não recuperada).
- 4,36 a 4,62m: Riolito - Riolito porfiro, pouco alterado, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A2, C1, F2)

Fraturas (f):

- 1) 4,36m – Inclinação, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **I, Ir, SP, r, al.**
- 2) 4,62m – Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SH, Ir, SP, r, al.**

- 4,62 a 5,14m: Riólito - Riólito pórfiro, medianamente alterado, medianamente coerente, extremamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A3, C2, F5)

Fraturas (f):

3) 4,62 a 5,14m – Extremamente fraturado (generalizado)

- 5,14 a 5,50m: Riólito - Riólito pórfiro, pouco alterado, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A2, C1, F3)

Fraturas (f):

4) 5,14m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f):

I, Ir, SP, r, al.

5) 5,28m – Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f):

I, Ir, SP, r, al.

6) 5,38m – Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 5,50 a 5,95m: Riólito - Riólito pórfiro, medianamente alterado, medianamente coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A3, C2, F2)

Fraturas (f):

7) 5,38 a 5,60m – Sub-vertical, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada e oxidada – (f): **SV, Ir, SP, r, al e ox.**

8) 5,60m – Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

9) 5,73m – Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f): **SH, Ir, SP, r, al.**

- 5,95 a 7,40m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

10) 5,95m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada – (f):

I, Ir, SP, r, al.

11) 6,25m – Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

12) 6,58m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

13) 6,97m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

14) 7,20m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**

15) 7,33 - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

16) 7,40m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

- 7,40 a 9,98m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

17) 9,88m - Inclínada, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície alterada e oxidada – (f): **I, Ir, SP, r, al e ox**.

18) 9,98m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

- 9,98 a 10,68m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

19) 10,03m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

20) 10,63m – Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

21) 10,68m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

- 10,68 a 15,15m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

22) 11,22m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox**.

23) 11,85 a 12,14m – Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SV, Ir, NC, r, rr, ox**.

24) 12,67m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox**.

25) 13,10m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox**.

26) 13,55m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): I, Ir, NC, r, rr, ox.

27) 13,91m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): I, Ir, NC, r, rr, ox.

28) 14,54m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): I, Ir, NC, r, rr, ox.

29) 14,90m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): I, Ir, NC, r, rr, ox.

- Observação geral:

Fraturas mecânicas predominantemente sub-horizontais.

Tabela B.1.4.1. Caixas de testemunho.

Caixa	Profundidade (m)	Caixa	Profundidade (m)
01/04	0,00 a 6,77	02/04	6,77 a 10,36
03/04	10,36 a 13,91	04/04	13,91 a 15,15

- **Ensaio de Infiltração:** Não realizado

Tabela B.1.4.2. Ensaio de perda d'água.

Nº	Prof do Ensaio (m)	Pressão Máx. (Kg/cm ²)	Vazão Média (L/Min)	N. A. (m)	Altura do Manômetro (m)	Coef. de Permeabilidade
01	10,15 a 15,15	3,20	2,30	7,20	0,50	1,44x10 ⁻⁰⁵

Tabela B.1.4.2. SR-205 – RQD

Manobras – trechos da sondagem (m)				Comprimento amostras maior que 10cm					Soma Am.>10cm	RQD (%)
De	a	Comprimento	Recuperação							
4,36	5,50	1,14	1,14	0,23	0,11	0,13	0,11		0,58	51
5,50	6,47	0,97	0,97	0,11	0,32	0,14			0,57	59
6,47	7,57	1,10	1,10	0,12	0,37	0,15	0,18	0,15	0,97	88
7,57	8,45	0,88	0,88	0,88					0,88	100
8,45	9,52	1,07	1,07	1,07					1,07	100
9,52	10,36	0,84	0,84	0,36	0,27				0,63	75
10,36	10,71	0,35	0,35	0,28					0,28	80
10,71	11,85	1,14	1,14	0,37	0,65				1,02	89
11,85	13,10	1,25	1,25	0,12	0,67	0,44			1,23	98
13,10	13,91	0,81	0,81	0,22	0,55				0,77	95
13,91	14,40	0,49	0,49	0,49					0,49	100
14,40	15,15	0,75	0,75	0,19	0,11	0,11	0,11		0,52	69
		10,79							9,01	

B.2. Aproveitamento Hidrelétrico Jirau - Tomada d'água/casa de força

B.2.1. Sondagem SR - 276

Coordenada: Norte: 8 968 166,94; Este: 310 805,03; Cota da boca: 93,01 m.
Diâmetro: NX (0,00 a 58,28 m). Comprimento do furo: 58,28 m

• Descrição do furo:

- 0,00 a 2,43 m: Blocos de Riolito - Fragmentos centimétricos a decimétricos (comprimento máximo de 20,0 cm) de blocos de riolito (A2, C1) com as superfícies pouco alteradas e oxidadas.
- 2,43 a 49,67m: Riolito - Riolito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

- 1) 3,02m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 2) 4,90m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 3) 5,17m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 4) 5,19 a 5,57m - Sub-vertical, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **SV, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 5) 9,76m – Inclinada, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 6) 12,15m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 7) 16,39m - Inclinada, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 8) 17,87m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 9) 20,64m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 10) 20,70m - Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 11) 20,81m – Inclinada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 12) 21,44m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 13) 22,35m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 14) 22,63m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 15) 22,87 - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 16) 23,22m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 17) 23,50m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 18) 25,97m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 19) 26,14m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 20) 29,18m – Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 21) 29,51m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 22) 30,43m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 23) 30,87m - Inclinação, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície oxidada e alterada – (f): **I, Ir, SP, r, ox e al.**
- 24) 32,03m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 25) 32,32m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 26) 34,52 a 34,82m – Sub-vertical, Irregular, Cimentada, cimento de carbonato – (f): **SV, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**
- 27) 34,82m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**
- 28) 34,96m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**

29) 35,54m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**

30) 35,91m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**

31) 36,05m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**

32) 36,28m - Sub Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox.**

- 49,67 a 58,28 m: Riolo - Riolo pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

33) 51,49m - Inclinação, Irregular, Cimentada com cimento de carbonato – (f): **I, Ir, C, ca (aberta mecanicamente)**

34) 58,00m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- Observação geral:

Fraturas mecânicas predominantemente sub-horizontais.

- Ensaio de Infiltração: Não realizado

Tabela B.2.1.1. Ensaio de perda d'água

Nº	Prof do Ensaio (m)	Pressão Máx. (Kgf/cm ²)	Vazão Média (L/Min)	N. A. (m)	Altura do Manômetro (m)	Coef. de Permeabilidade
01	3,00 a 6,00	0,98	1,8	seco	0,50	6,08 X10 ⁻⁰⁵
02	6,00 a 11,00	1,85	0,00	1,43	0,50	-
03	11,00 a 16,00	2,93	0,00	2,90	0,70	-
04	16,00 a 21,00	4,00	0,00	3,00	0,50	-
05	21,00 a 26,00	5,08	0,00	4,80	0,60	-
06	26,00 a 30,91	6,16	0,00	4,40	0,50	-
07	30,91 a 35,91	7,23	0,00	4,35	0,50	-
08	35,91 a 40,86	8,31	0,00	4,65	0,50	-
09	40,86 a 45,79	9,38	0,00	4,65	0,50	-
10	45,79 a 50,69	10,44	0,00	4,50	0,50	-
11	50,69 a 55,65	11,51	0,00	4,50	0,50	-
12	55,65 a 58,28	12,33	0,00	4,50	0,50	-

Tabela B.2.1.2. Ensaio de perda d'água – Classes e permeabilidade equivalente

Classe	Perda d'água L/min m kg/atm	Permeabilidade equivalente (cm/s)	Designação
P1	< 0,1	< 10^{-5}	Muito Baixa
P2	0,1 a 1,0	10^{-5} a 10^{-4}	Baixa
P3	1,0 a 5,0	10^{-4} a 5×10^{-4}	Média
P4	5,0 a 10,0	5×10^{-4} a 10^{-3}	Alta
P5	> 10,0	> 10^{-3}	Muito Alta

Tabela B.2.1.3. SR - 276 - RQD

Manobra		Comp. (m)	Compr. Cons. (m)	Recup. (m)	Medidas (m)				Medidas/ Manobra	RQD (%)
de	a				Testemunhos			Total (m)		
0,00	2,32	2,32	2,00		Bloco de Rocha					
2,32	3,02	0,70	0,60		Bloco de Rocha / Rocha					
3,02	3,90	0,88	0,76	0,88	0,88			0,88	1,00	100
3,90	4,90	1,00	0,86	1,00	1,00			1,00	1,00	100
4,90	6,05	1,15	0,99	1,15	1,15			1,15	1,00	100
6,05	6,79	0,74	0,64	0,74	0,74			0,74	1,00	100
6,79	7,31	0,52	0,45	0,52	0,52			0,52	1,00	100
7,31	8,14	0,83	0,71	0,83	0,83			0,83	1,00	100
8,14	9,76	1,62	1,39	1,62	1,62			1,62	1,00	100
9,76	11,05	1,29	1,11	1,29	1,29			1,29	1,00	100
11,05	12,26	1,21	1,04	1,21	1,21			1,21	1,00	100
12,26	12,63	0,37	0,32	0,37	0,37			0,37	1,00	100
12,63	13,74	1,11	0,95	1,11	1,11			1,11	1,00	100
13,74	15,24	1,50	1,29	1,50	1,50			1,50	1,00	100
15,24	16,05	0,81	0,70	0,81	0,81			0,81	1,00	100
16,05	16,70	0,65	0,56	0,65	0,65			0,65	1,00	100
16,70	17,70	1,00	0,86	1,00	1,00			1,00	1,00	100
17,70	18,83	1,13	0,97	1,13	1,13			1,13	1,00	100
18,83	20,07	1,24	1,07	1,24	1,24			1,24	1,00	100
20,07	21,00	0,93	0,80	0,93	0,51	0,19		0,70	0,75	75
21,00	22,07	1,07	0,92	1,07	1,07			1,07	1,00	100
22,07	23,77	1,70	1,46	1,70	1,70			1,70	1,00	100
23,77	24,48	0,71	0,61	0,71	0,71			0,71	1,00	100
24,48	26,00	1,52	1,31	1,52	1,52			1,52	1,00	100
26,00	27,90	1,90	1,63	1,90	1,90			1,90	1,00	100
27,90	29,86	1,96	1,69	1,96	1,96			1,96	1,00	100
29,86	30,91	1,05	0,90	1,05	1,05			1,05	1,00	100
30,91	31,16	0,25	0,22	0,25	0,25			0,25	1,00	100
31,16	31,44	0,28	0,24	0,28	0,28			0,28	1,00	100
31,44	31,66	0,22	0,19	0,22	0,22			0,22	1,00	100
31,66	31,88	0,22	0,19	0,22	0,22			0,22	1,00	100
31,88	32,12	0,24	0,21	0,24	0,24			0,24	1,00	100
32,12	32,42	0,30	0,26	0,30	0,30			0,30	1,00	100
32,42	32,95	0,53	0,46	0,53	0,53			0,53	1,00	100
32,95	34,48	1,53	1,32	1,53	0,80	0,13		0,93	0,61	61
34,48	35,91	1,43	1,23	1,43	0,33	1,05		1,38	0,97	97

Tabela B.2.1.3. SR - 276 - RQD (cont.)

Manobra		Comp.	Compr. Cons.	Recup.	Medidas (m)				Medidas/	RQD
de	a	(m)	(m)	(m)	Testemunhos		Total (m)		Manobra	(%)
35,91	37,45	1,54	1,32	1,54	1,54			1,54	1,00	100
37,45	39,02	1,57	1,35	1,57	1,57			1,57	1,00	100
39,02	40,04	1,02	0,88	1,02	1,02			1,02	1,00	100
40,04	40,86	0,82	0,71	0,82	0,82			0,82	1,00	100
40,86	43,59	2,73	2,35	2,73	2,73			2,73	1,00	100
43,59	45,20	1,61	1,38	1,61	1,61			1,61	1,00	100
45,20	47,59	2,39	2,06	2,39	2,39			2,39	1,00	100
47,59	48,28	0,69	0,59	0,69	0,69			0,69	1,00	100
48,28	48,92	0,64	0,55	0,64	0,64			0,64	1,00	100
48,92	50,69	1,77	1,52	1,77	1,77			1,77	1,00	100
50,69	51,69	1,00	0,86	1,00	1,00			1,00	1,00	100
51,69	54,09	2,40	2,06	2,40	0,56	1,76		2,32	0,97	97
54,09	55,65	1,56	1,34	1,56	1,56			1,56	1,00	100
55,65	58,28	2,63	2,26	2,63	2,53			2,53	0,96	96
49,65	50,69	1,04	1,04		1,04			1,04	1,00	100
50,69	51,69	1,00	0,86	1,00	1,00			1,00	1,00	100
51,69	54,09	2,40	2,06	2,40	0,56	1,76		2,32	0,97	97
54,09	55,65	1,56	1,34	1,56	1,56			1,56	1,00	100
55,65	58,28	2,63	2,26	2,63	2,53			2,53	0,96	96

B.2.2. Sondagem SR –270

Coordenada: Norte: 8 968 406,85; Este: 310 552,68. Cota da boca: 90,15 m.
Diâmetro: NX (0,00 a 56,14 m). Comprimento do furo: 56,14 m.

- Descrição do furo:**

- 0,00 a 11,70 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

- 1) 1,60m – Inclinação, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície oxidada – (f): **I, Ir, SP, r, ox.**
- 2) 3,73m – Inclinação, Irregular, aberta sem preenchimento, rugosa, superfície oxidada – (f): **I, Ir, SP, r, ox.**
- 3) 9,46m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 4) 10,25 a 10,65m – Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SV, Ir, NC, r, rr, ox.**

5) 10,53m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

6) 11,70m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr ox.**

- 11,70 a 12,79 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F3)

Fraturas (f):

7) 11,73m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr ox.**

8) 11,80m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr ox.**

9) 12,00m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr ox.**

10) 12,06m - Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr ox.**

11) 12,10m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

12) 12,26m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

13) 12,34m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**

14) 12,60m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**

15) 12,79 - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**

- 12,79 a 15,67 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

16) 13,51m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**

17) 13,55m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**

18) 13,76m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**

- 19) 13,90m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**
- 20) 14,64m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**
- 21) 14,74m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**
- 22) 14,84m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 23) 14,90m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr ox.**
- 24) 15,04m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 25) 15,10m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 26) 15,67m – Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 15,67 a 45,25 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

- 27) 16,82m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 28) 17,57m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 29) 21,20m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 30) 22,30m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 31) 23,78m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 32) 24,73m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 33) 24,87m - Inclinação, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**

- 34) 26,40m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 35) 28,50m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 36) 28,91m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 37) 29,76m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície não oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, não ox (aberta mecanicamente)**
- 38) 44,27m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 39) 45,25m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 45,25 a 46,20 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

- 40) 45,30m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 41) 45,40m – Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 42) 46,20m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 46,20 a 47,40 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

- 43) 46,28m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 44) 46,34m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 45) 47,40m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 47,40 a 48,31 m: Riólito – Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

46) 47,58m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

47) 47,72m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

48) 48,31m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 48,31 a 51,59 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

49) 51,59m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 51,59 a 52,35 m: Riólito -

Riólito pórfiro, são, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F3)

Fraturas (f):

50) 51,76m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**

51) 51,82m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

52) 51,88m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

53) 51,95m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

54) 52,10m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

55) 52,30m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

56) 52,35m - Inclínada, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, NC, r, rr, ox.**

- 52,35 a 56,14 (56,61)m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, muito pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F1)

Fraturas (f):

57) 52,90m – Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, NC, r, rr, ox.**

58) 54,49m – Sub-horizontal, Irregular, Cimentada, cimento de carbonato – (f):SH, Ir, C, ca.

59) 54,76m - Inclínada, Irregular, Cimentada, cimento de carbonato – (f): I, Ir, C, ca.

60) 56,08m - Inclínada, Irregular, Cimentada, cimento de carbonato – (f): I, Ir, C, ca.

- Observação geral:

Fraturas mecânicas predominantemente sub-horizontais.

- Ensaio de infiltração: não realizado

Tabela B.2.2.1. Ensaio de perda d'água

Nº	Profundidade do Ensaio (m)	Pressão Máxima (Kg/cm ²)	Absoção Média (L/Min)	N. A. (m)	Altura do Manômetro (m)	Coef. de Permeabilidade
01	0,35 a 5,35	0,58	13,30	1,80	0,70	5,58 X 10 ⁻⁴
02	5,35 a 9,52	1,60	0,00	1,80	0,70	-
03	9,52 a 12,46	2,38	0,00	9,40	0,70	-
04	12,46 a 15,50	3,00	0,00	7,20	0,70	-
05	15,50 a 18,46	3,67	0,00	4,60	0,70	-
06	18,46 a 23,08	4,49	0,00	11,35	0,70	-
07	23,08 a 28,08	5,54	0,00	11,45	0,70	-
08	28,08 a 34,25	6,74	0,00	11,45	0,70	-
09	34,25 a 39,52	7,98	0,00	11,45	0,70	-
10	39,25 a 44,25	9,03	0,00	11,45	0,70	-
11	44,25 a 49,25	10,10	0,00	11,45	0,70	-
12	49,25 a 52,26	10,90	0,00	11,45	0,70	-
13	53,90 a 56,14	11,73	0,00	11,55	0,70	-

Tabela B.2.2.2. SR –270 - RQD

Manobra		Comp. Manobra (m)	Recup. Obtido	Medidas (m)						Soma Medidas	Soma Medidas C. Manobra	RQD (%)
de	a											
0,00	0,49	0,49	0,49	0,49						0,49	1,00	100
0,49	1,60	1,11	1,11	1,11						1,11	1,00	100
1,60	2,85	1,25	1,25	1,25						1,25	1,00	100
2,85	5,35	2,50	2,50	2,50						2,50	1,00	100
5,35	6,43	1,08	1,08	1,08						1,08	1,00	100
6,43	8,44	2,01	2,01	2,01						2,01	1,00	100
8,44	9,52	1,08	1,08	1,08						1,08	1,00	100
9,52	10,74	1,22	1,22	1,22						1,22	1,00	100
10,74	12,46	1,72	1,72	1,72						1,72	1,00	100
12,46	13,93	1,47	1,47	1,47						1,47	1,00	100
13,93	15,50	1,57	1,57	1,10	0,35					1,45	0,92	92
15,50	17,67	2,17	2,17	2,17						2,17	1,00	100
17,67	18,46	0,79	0,79	0,79						0,79	1,00	100
18,46	20,30	1,84	1,84	1,84						1,84	1,00	100
20,30	21,58	1,28	1,28	1,28						1,28	1,00	100
21,58	23,08	1,50	1,50	1,50						1,50	1,00	100
23,08	24,45	1,37	1,37	1,37						1,37	1,00	100
24,45	25,85	1,40	1,40	1,40						1,40	1,00	100

Tabela B.2.2.2. SR –270 - RQD (cont.)

Manobra		Comp. Manobra (m)	Recup. Obtido	Medidas (m)						Soma Medidas	Soma Medidas C. Manobra	RQD (%)
de	a											
25,85	28,08	2,23	2,23	2,23						2,23	1,00	100
28,08	29,28	1,20	1,20	1,20						1,20	1,00	100
29,28	31,90	2,62	2,62	2,62						2,62	1,00	100
31,90	34,25	2,35	2,35	2,35						2,35	1,00	100
34,25	36,25	2,00	2,00	2,00						2,00	1,00	100
36,25	38,92	2,67	2,67	2,67						2,67	1,00	100
38,92	39,52	0,60	0,60	0,60						0,60	1,00	100
39,52	41,72	2,20	2,20	2,20						2,20	1,00	100
41,72	43,48	1,76	1,76	1,76						1,76	1,00	100
43,48	44,72	1,24	1,24	0,56	0,12	0,12	0,13	0,11		1,04	0,84	84
44,72	45,50	0,78	0,78	0,20	0,27					0,47	0,60	60
45,50	47,00	1,50	1,50	0,20	0,39	0,32				0,91	0,61	61
47,00	48,05	1,05	1,05	0,83	0,17					1,00	0,95	95
48,05	49,72	1,67	1,67	0,13	0,12	0,44	0,9			1,59	0,95	95
49,72	50,78	1,06	1,06	1,06						1,06	1,00	100
50,78	52,73	1,95	1,95	1,21	0,13					1,34	0,69	69
52,73	54,37	1,64	1,64	0,12	1,30					1,42	0,87	87
54,37	56,61	2,24	2,24	0,41	0,89	0,42	0,34			2,06	0,92	92

B.2.3. Sondagem SR –278

Coordenada: Norte: 8 967 800,143 ; Este: 310 091,434. Cota da boca: 111,686.

Inclinação: Vertical. Diâmetro: NX (0,0 a 11,25m). Comprimento do furo: 11,25m.

• Descrição do furo:

- 0,00 a 2,00m: Colúvio - Argila arenosa (areia fina), plástica, avermelhada.

(Amostra coletada com trado)

- 2,00 a 6,10m: Provável Solo Residual

Argila siltosa pouco arenosa, com fragmentos finos de rocha extremamente alterada, amarelada. (amostra coletada na lavagem)

- 6,10 a 7,27m: Riólito - Riólito pórfiro, pouco alterado e muito alterado nos primeiros 20 cm, medianamente coerente, muito fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A2, C2, F4)

Fraturas (f):

- 1) 6,30 a 6,50m: Sub-vertical, Regular/Plana, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SV, Pr, r, NC, rr, ox.**
- 2) 6,40m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, aberta sem preenchimento, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, r, SP, rr, al, ox.**

- 3) 6,51 a 6,76m: Sub-vertical, Regular/Plana, fechada cimentada, cimento ferruginoso – (f): **SV, Pr, C, fe.**
- 4) 6,77m: Sub-horizontal, Plana/Regular, rugosa, aberta sem preenchimento, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Pr, r, SP, rr, ox.**
- 5) 6,79m: Sub-horizontal, Plana/Regular, rugosa, aberta sem preenchimento, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Pr, r, SP, rr, ox.**
- 6) 6,86m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Pr, r, SP, rr, ox.**
- 7) 7,07m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, aberta sem preenchimento, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, r, SP, rr, ox.**
- 8) 7,07m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, aberta sem preenchimento, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, r, SP, rr, ox.**
- 9) 6,86 a 7,07m: Sub-vertical, Regular/Plana, rugosa, fechada cimentada, cimento ferruginoso – (f): **SV, Pr, C, fe.**
- 10) 6,86 a 7,07m: Sub-vertical, Regular/Plana, rugosa, fechada cimentada, cimento ferruginoso – (f): **SV, Pr, C, fe.**
- 7,27 a 11,25m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F3)

Observação:

1. Fraturas mecânicas predominantes sub-horizontais e sub-verticais

Fraturas (f):

- 11) 7,42m: Sub-horizontal, Plana/Regular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Pr, r, NC, rr, ox.**
- 12) 7,60m: Sub-horizontal, Plana/Regular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Pr, r, NC, rr, ox.**
- 13) 7,59m: Inclínada, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, r, NC, rr, ox.**
- 14) 7,75m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, aberta sem preenchimento, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, r, SP, rr, ox.**
- 15) 8,03m: Inclínada, Irregular, aberta com preenchimento carbonático – (f): **I, Ir, CP, ca.**
- 16) 8,12m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 17) 8,15m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**

- 18) 8,39m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 19) 8,26 a 8,68m: Sub-vertical, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SV, Ir, r, NC, rr, al, ox.**
- 20) 8,74m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 21) 8,50 a 9,04m: Sub-vertical, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SV, Ir, r, NC, rr, al, ox.**
- 22) 9,04m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 23) 9,06m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, r, NC, rr, al, ox.**
- 24) 9,12 a 9,30m: Sub-vertical, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SV, Ir, r, NC, rr, al, ox.**
- 25) 9,84m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 26) 9,99m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 27) 10,05m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 28) 10,13m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 29) 10,30m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 30) 10,12 a 10,30m: Sub-vertical, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **SV, Ir, r, NC, rr, al, ox.**
- 31) 10,36m: Sub-horizontal, Irregular, fechada não cimentada, superfície película de carbonato e oxidada – (f): **SH, Ir, NC, ca, ox.**
- 32) 10,45m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**
- 33) 10,51m: Inclinada, Irregular, aberta com preenchimento misto, superfície alterada e oxidada – (f): **I, Pr, r, SP, P2, al, ox.**
- 34) 10,70m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**

35) 11,03m: Sub-horizontal, Irregular, aberta sem preenchimento, superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Ir, SP, al, ox.**

Obs. Fraturas mecânicas sub-verticais e sub-horizontais

Tabela B.3.3.1. Caixas de testemunho:

Caixa	Profundidade (m)	Caixa	Profundidade (m)
01/02	0,00 a 8,50	02/02	8,50 a 11,25

- Ensaio de Infiltração: Não Executado

Tabela B.3.3.2. Ensaio de perda d' água

Nº	Profundidade do ensaio (m)	Pressão máx. (kgf/cm ²)	Vazão média (l/min)	N. A. (m)	Altura manômetro (m)
01	6,75 a 11,25	2,250	13,0	8,40	0,45

Tabela B.3.3.3. SR –278 - RQD

Manobras		C. Manobra (M)	Recup. Obtido	Medidas (M)					Soma Medidas	Soma Medidas	RQD (%)
DE	A									C. Manobra	
6,10	6,40	0,30	0,30	0,17					0,17	0,57	57
6,40	7,75	1,35	1,35	0,17	0,18	0,19	0,15	0,14	0,83	0,61	61
7,75	8,15	0,40	0,40	0,17					0,17	0,43	43
8,15	8,50	0,35	0,35	0,23					0,23	0,66	66
8,50	9,60	1,10	1,10	0,21	0,13	0,15			0,49	0,45	45
9,60	10,45	0,85	0,85	0,37	0,15	0,11			0,63	0,74	74
10,45	11,25	0,80	0,80	0,16	0,32	0,24			0,72	0,90	90
		5,15							3,24		

B-2.4. Sondagem SR – 277

Coordenada: Norte: 8 967 999,959; Este: 310 899,657; Cota da boca: 111,997; inclinação: Vertical. Diâmetro: NX (0,0 A 4,37m); BX (4,37 A 11,90). Comprimento do furo: 11,90m.

• Descrição do furo:

- 0,00 a 3,00 m: Colúvio - Argila arenosa plástica amarelada.
(Amostra coletada com trado)
- 3,00 a 3,40 m: Colúvio - Areia grossa limpa marrom-amarelada.
(Amostra coletada na lavagem)

- 3,40 a 3,75 m: Riólito - Riólito pórfiro, medianamente alterado, medianamente coerente, extremamente fraturado (em fragmentos), avermelhado com pintas claras e escuras. (A3, C2, F5)

Fraturas (f):

- 1) 3,75 a 4,12m: Sub-vertical, Plana/regular, aberta com preenchimento misto, superfície alterada e oxidada – (f): **SV, Pr, CP, P2, al, ox.**
- 3,75 a 4,10m: Riólito - Riólito pórfiro, medianamente alterado, pouco coerente, muito fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A3, C3, F4)
- 4,10 a 5,08 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, medianamente fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F3)

Fraturas (f):

- 2) 4,37m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 3) 4,50m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 4) 4,67m: Inclínada, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 5) 4,98m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 6) 5,03m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **SH, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 5,08 a 5,84 m: Riólito - Riólito pórfiro, medianamente alterado, medianamente coerente, extremamente fraturado (em fragmentos), avermelhado com pintas claras e escuras.(A3, C2, F5)
- 5,84 a 11,90 m: Riólito - Riólito pórfiro, são, coerente, pouco fraturado, avermelhado com pintas claras e escuras. (A1, C1, F2)

Fraturas (f):

- 7) 6,59m: Sub-horizontal, Regular/Plana, aberta com preenchimento argiloso superfície alterada e oxidada – (f): **SH, Pr, CP, P3, al, ox.**
- 8) 7,13m: Inclínada, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (f): **I, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 9) 8,04m: Inclínada, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície alterada e oxidada – (f): **I, Ir, r, rr, NC, ox.**

- 10) 10,20m: Sub-horizontal, Regular, fechada não cimentada, superfície alterada e oxidada – (**f**): **SH, Pr, NC, al, ox.**
- 11) 10,55m: Inclínada, Regular/Plana, aberta com preenchimento argiloso superfície alterada e oxidada – (**f**): **I, Pr, CP, P3, al, ox.**
- 12) 10,55m: Inclínada, Regular/Plana, aberta com preenchimento argiloso superfície alterada e oxidada – (**f**): **I, Pr, CP, P3, al, ox.**
- 13) 10,56m: Inclínada, Irregular, sem preenchimento, rugosa, superfície alterada, superfície oxidada – (**f**): **SH, Ir, SP, r, al, ox.**
- 14) 10,63m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (**f**): **SH, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 15) 10,68m: Sub-horizontal, Irregular, rugosa, fechada não cimentada, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (**f**): **SH, Ir, r, rr, NC, ox.**
- 16) 11,68m: Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (**f**): **SV, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 17) 11,68m: Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (**f**): **SV, Ir, NC, r, rr, ox.**
- 18) 11,81m: Sub-vertical, Irregular, fechada não cimentada, rugosa, contato rocha a rocha, superfície oxidada – (**f**): **SV, Ir, NC, r, rr, ox.**

- Observação geral:

Fraturas mecânicas, predominantemente sub-horizontais.

- Ensaio de Infiltração: Não executado

Tabela B.2.4.1. Ensaio de perda d'água

Nº	Profundidade do ensaio (m)	Pressão máx. (kgf/cm ²)	Vazão média (l/min)	N. A. (m)	Altura manômetro (m)
01	4,70 a 7,70	1,550	10,9	5,80	0,47
02	7,70 a 11,90	2,450	1,00	6,50	0,55

Tabela B.2.4.1. SR – 277 - RQD

Manobras		C. Manobra (m)	Recup. Obtido	Medidas (m)				Soma Medidas	Soma Medidas	RQD (%)
de	a								C. Manobra	
3,40	3,75	0,35	0,30					0,00	0,00	0
3,75	4,10	0,35	0,32	0,11				0,11	0,31	31
4,10	4,37	0,27	0,27	0,22				0,22	0,81	81
4,37	5,52	1,15	1,08	0,12	0,16	0,31	0,13	0,72	0,63	63
5,52	6,35	0,83	0,80	0,54				0,54	0,65	65
6,35	7,70	1,35	1,35	0,24	1,09			1,33	0,99	99

Tabela B.2.4.1. SR – 277 – RQD (cont.)

Manobras		C. Manobra (m)	Recup. Obtido	Medidas (m)				Soma Medidas	Soma Medidas	RQD (%)
de	a								C. Manobra	
7,70	9,45	1,75	1,75	1,75				1,75	1,00	100
9,45	10,20	0,75	0,75	0,75				0,75	1,00	100
10,20	11,90	1,70	1,70	0,32	1,05	0,12		1,49	0,88	88
		8,50						6,91		

B.3. AHE Jirau - Barragem de concreto – classificação do maciço rochoso (fase de viabilidade e projeto básico).

Tabela B.3.1. AHE Jirau - Barragem de concreto – classificação do maciço rochoso (Fase de viabilidade e projeto básico)

Furo Sondagem	Trecho (m)	Parâmetros Classificatórios (pesos)					Soma dos Pontos	Classe de Maciço CGM
		Alt. - Coerência	Fraturamento	Descontinuidades	Permeabilidade	Ajuste		
SR-205	4,36-5,95	22	12	10	5	-10	40	4
SR-205	5,95-7,40	30	20	15	15	-2	78	2
SR-205	7,40-15,15	30	22	15	16	-2	80	2
SR-204	2,50-3,18	25	17	0	10	-12	40	4
SR-204	3,18-3,83	25	20	15	15	-2	73	2
SR-204	3,83-4,75	10	5	0	10	-10	15	5
SR-204	4,75-10,04	30	17	10	15	-2	70	2
SR-204	10,04-12,34	30	25	15	20	-2	87	1
SR-204	12,34-14,98	30	15	15	20	-2	77	2
SR-203	0,10-15,20	30	25	15	20	-2	88	1
SR-202	0,90-2,30	30	25	15	20	-2	88	1
SR-202	2,30-3,05	30	20	15	20	-2	83	1
SR-202	3,03-15,23	30	30	15	20	-2	93	1

B.4. Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau, tomada d'água/casa de força – classificação do maciço rochoso (Fase de viabilidade e projeto básico) - memória

Tabela B.4.1. Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau - tomada d'água/casa de força – classificação do maciço rochoso (Fase de viabilidade e projeto básico)

Furo Sondagem	Trecho (m)	Parâmetros Classificatórios (pesos)					Soma dos Pontos	Classe de Maciço
		Alteração Coerência	Fraturamento	Descontinuidades	Permeabilidade	Ajuste		
SR-205	4,36-5,95	22	12	10	5	-10	40	CGM-4
SR-205	5,95-7,40	30	20	15	15	-2	78	CGM-2
SR-205	7,40-15,15	30	22	15	16	-2	80	CGM-2
SR-270	0,00-11,70	30	25	15	10	-2	78	CGM-2
SR-270	11,70-15,67	30	16	15	20	-2	78	CGM-2
SR-270	15,67-45,25	30	25	15	20	-2	88	CGM-1
SR-270	45,25-46,20	30	20	15	20	-2	83	CGM-1
SR-270	46,20-47,40	30	25	15	20	-2	88	CGM-1

Tabela B.4.1. Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau - tomada d'água/casa de força – classificação do maciço rochoso (Fase de viabilidade e projeto básico) (cont.)

Furo Sondagem	Trecho (m)	Parâmetros Classificatórios (pesos)					Soma dos Pontos	Classe de Maciço
		Alteração Coerência	Fraturamento	Descontinuidades	Permeabilidade	Ajuste		
SR-270	47,40-48,31	30	20	15	20	-2	83	CGM-1
SR-270	48,31-51,59	30	25	15	20	-2	88	CGM-1
SR-270	51,59-52,35	30	15	15	20	-2	78	CGM-2
SR-270	52,35-56,11	30	25	15	20	-2	88	CGM-1
SR-276	2,43-10,00	30	25	15	15	-5	80	CGM-2
SR-276	10,00-58,28	30	25	15	20	-5	88	CGM-1
SR-277	4,10-5,84	30	15	15	5	-5	60	CGM-3
SR-277	5,84-11,90	30	20	15	15	-2	78	CGM-2
SR-278	6,10-7,27	25	5	10	5	-5	40	CGM-4
SR-278	7,27-11,25	30	15	15	10	-5	65	CGM-2

Tabela B.5.1. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica (RMR, BIENIAWSKI, 1989)

Sond. N°	Trecho (m)	Parâmetros (Pontos)						RMR		GSI	Em (GPa)	Em (GPa)
		Res. Rocha Intacta.	RQD	Espaço Desc.	Cond. Desc.	Influen. Água	Ajuste	Valor	Classe			
SR-101	7,28-14,15	4	3	5	10	15	-2	35	IV	32	4,2	
Gx	14,15-17,56	10	3	5	10	15	-7	36	III	38	4,5	
	17,56-20,5	13	5	8	10	15	-2	49	III	46	9,4	
	20,5-22,00	13	5	8	10	10	-2	44	III	46	7,1	
	22,0-25,09	13	5	8	10	4	-2	38	IV	46	5,0	
SR-102	5,20-6,70	7	3	5	20	10	-2	43	III	45	6,7	
	6,70-10,80	4	5	8	20	4	-2	39	IV	47	5,3	
	10,8-17,50	7	5	8	20	7	-2	45	III	50	7,5	
	17,5-25,10	6	3	6	20	7	-2	40	IV	45	5,6	
	25,1-28,38	6	3	5	10	7	-7	24	IV	34	2,2	
	28,38-34,98	8	3	5	20	5	-2	39	IV	46	5,3	
	34,98-45,0	13	3	5	20	7	-2	46	III	51	7,9	
SR-103	10,0-14,50	7	3	5	20	7	-2	40	IV	45	5,6	
	14,50-18,3	7	6	6	20	4	-2	41	III	49	6,0	
	18,30-19,0	7	3	5	20	4	-2	37	IV	45	4,7	
	19,0-23,30	10	3	6	20	7	-2	44	III	49	7,1	
	23,3-25,00	12	3	5	20	7	-2	45	III	50	7,5	
SRBL02	0,0-1,80	7	3	5	10	4	-2	27	IV	35	2,7	
	1,8-3,50	10	8	10	15	10	-2	51	III	53	11	
	3,50-4,70	12	13	15	20	10	-2	68	II	70		36
	4,70-6,70	7	5	10	20	10	-2	50	III	52	10	
	6,7-11,20	12	10	10	20	10	-2	60	III	62		20
	11,2-42,30	15	15	18	20	15	-2	81	II	78		62
	42,3-45,00	12	13	15	10	15	-7	58	III	60	16	16
SRBL03	0,0-1,00	4	3	5	10	7	-7	22	IV	32	2,0	
Escavado	1,0-7,00	7	13	10	20	7	-2	55	III	60	13	
	7,0-11,80	7	13	10	20	7	-2	55	III	60	13	
	11,8-19,50	15	17	15	20	7	-2	72	II	77		44
	19,50-20,0	15	17	15	20	7	-7	67	II	77		34

Tabela B.5.1. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica (RMR, BIENIAWSKI, 1989) (cont.)

Sond.	Trecho	Parâmetros (Pontos)						RMR		GSI	Em (GPa)	Em (GPa)
		Res. Rocha Intac.	RQD	Espaço Desc.	Condição Desc.	Influência Água	Ajuste	Valor	Classe			
SRBL04	0,0-1,00	2	8	8	10	7	-15	20	V	38	1,8	
	1,0-2,20	7	8	8	10	7	-2	38	IV	43	5,0	
	2,20-3,04	7	8	8	10	7	-2	38	IV	43	5,0	
	3,04-4,10	2	8	8	10	7	-15	20	V	38	1,8	
	4,10-5,60	10	13	6	20	7	-2	54	III	59	13	
	5,6-20,00	15	17	15	20	10	-2	75	II	77		50
SRBL05	0,0-1,50	4	3	5	10	7	-7	22	IV	32	2,0	
	1,50-2,85	15	17	20	20	10	-2	80	II	82		60
	2,85-6,28	15	13	15	0	10	-7	46	III	53	7,9	
	6,28-8,98	15	18	17	20	10	-2	78	II	80		56
	8,98-21,00	15	18	17	20	10	-2	78	II	80		56
SRBL06	0,0-3,20	15	17	15	20	10	-2	75	II	77		50
	3,20-11,00	15	20	20	25	10	-2	88	I	90		76
	11,0-15,00	12	13	17	25	10	-2	75	II	77		50
SRMuroM	0,0-2,80	15	8	10	10	7	-15	35	IV	53	4,2	
	2,8-6,60	15	18	20	20	7	-2	78	II	83		56
	6,6-12,20	15	17	15	10	4	-7	54	III	67	13	8,0
	12,2-15,00	15	18	18	25	10	-2	84	I	86		68
SRMuroJ	0,0-1,50	15	13	15	20	10	-2	71	II	73		42
	1,5-5,80	15	20	20	10	10	-15	60	III	75		20
	5,8-6,50	15	20	18	20	10	-2	81	I	83		62
	6,50-15,00	15	20	18	20	10	-2	81	I	83		62
SR-05	2,0-9,50	4	3	5	10	10	-2	30	IV	32	3,2	
	9,50-20,00	12	3	8	20	7	-2	48	III	53	8,9	
	20,0-31,00	13	8	12	20	7	-2	58	III	63		16
SR-06	5,00-15,00	10	3	8	10	7	-2	36	IV	41	4,5	
	15,0-29,90	13	8	8	10	7	-2	44	III	49	7,1	
	29,9-50,14	15	13	17	20	10	-2	73	II	75		46
SR-55	7,3-10,30	7	8	9	20	7	-7	44	III	54	7,1	
	10,3-21,50	12	13	15	20	10	-2	68	II	70		36
	21,5-31,30	15	17	15	20	10	-2	75	II	77		50
SR-57	4,60-11,00	7	3	5	10	7	-2	30	IV	35	3,2	
	11,0-14,00	10	8	5	10	7	-2	38	IV	43	5,0	
	14,0-32,00	13	8	13	20	7	-2	59	III	64		18

Obs.: (*) $E_m = 2RMR - 100$, para $RMR > 50$, Bieniawski (1978). $E_m = 10^{(RMR-10)/40}$, para $RMR < 50$, Serafim & Pereira (1983) (***) RMR, Bieniawski, 1989.

B.5.2. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica proposta para a fase do projeto básico (CGM) de furos não incluídos na Figuras 7.5, 7.7 e 7.8.

Sondagem		Res. Rocha intacta		Espaçamento das descontinuidades		Condição	Classe	Ajuste	CGM (Projeto)				
Nº	Trecho (m)	Rocha Consistente	Rocha Branda	Fratura-mento Rocha Consistente	RQD Rocha Branda	das Desconti-nuidades	de Permeabi-lidade	da Desconti-nuidades	Valor (CGM)	Classe (CGM)	GSI	Em (1) (GPa)	Em (2) (GPa)
SRBL04	0,0-1,00		1		15	3	10	-12	17	5	29	1,5	
	1,0-2,20	25		5		10	10	-2	48	3	50	8,9	
Escavado	2,20-3,04	25		20		3	10	-2	56	3	58		12
Gx	3,04-4,10		3		20	10	10	-10	33	4	43	3,8	
	4,10-5,60	20		20		10	10	0	60	3	60		20
	5,6-20,00	30		25		15	15	0	85	1	80		70
SR-05	2,0-9,50	15		5		10	10	0	40	4	40	5,6	
	9,50-20,00	25		10		15	5	-2	53	3	60	12	
	20,0-31,00	30		12		15	15	0	72	2	67		44
SR-57	4,60-11,00	15		5		10	15	0	45	3	40	7,5	
	11,0-14,00	25		10		15	10	0	60	3	60		20
	14,0-21,50	25		22		15	15	0	77	2	72		54
	21,50-32,00	30		22		15	20	0	87	1	77		74

Obs.: (1) $E_m = 10^{(RMR-10/40)}$, para $RMR < 50$, Serafim & Pereira (1983). (2) $E_m = 2RMR - 100$, para $RMR > 50$, Bieniawski (1978).

B.5.3. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica proposta para a fase do projeto executivo (obra) (CGM)

Sondagem		Res. Rocha intacta		Espaçamento das descontinuidades		Condição	Classe	Ajuste	CGM (Obra)				
Nº	Trecho (m)	Rocha Consistente	Rocha Branda	Fratura-mento Rocha Consistente	RQD Rocha Branda	das Desconti-nuidades	de Permeabi-lidade	da Desconti-nuidades	Ajuste Trata-mento	Valor	Classe CGM	GSI	Em* (GPa)
SR-101	7,28-14,15	18		5		5	20	-2	3	46	9,4		46
	14,15-17,56		12		5	3	20	-10	3	26	3,8		26
	17,56-20,50	20		5		5	20	-2	0	45	8,9		45
	20,05-22,00	30		5		10	15	-2	0	60		16	60
	22,00-25,09	30		5		7	5	-2	0	57	7,5		57
SR-102	5,20-6,70	20		5		10	10	0		50	7,5		50
Escav.	6,70-10,80	10		5		10	5	0		40	3,2		40
	10,8-17,50	20		10		10	10	0	3	58	11,9		58
	17,50-25,10	12		5		10	10	0	3	45	5,6		45
Fim Injeção	25,10-28,38	12		5		10	10	0	3	45	5,6		45
	28,38-34,98	15		5		10	7	0		45	4,7		45
	34,98-45,00	28		5		15	10	0		63		16	63
SR-103	10,0-14,50	20		5		10	10	0	5	55	10		55
	14,50-18,30	25		5		10	5	0	3	58	8,9		58
	18,30-19,0	25		5		10	5	0	3	58	8,9		58
	19,0-23,30	20		5		10	10	0	3	53	8,9		53
	23,3-25,00	26		5		10	10	0	3	59	13		59

B.5.3. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica proposta para a fase do projeto executivo (obra) (CGM)
(cont.)

Sondagem		Res. Rocha intacta		Espaçamento das descontinuidades		Condição das Descontinuidades	Classe de Permeabilidade	Ajuste da Descontinuidades	CGM (Obra)				
Nº	Trecho (m)	Rocha Consistente	Rocha Branda	Fratura-mento Rocha Consistente	RQD Rocha Branda				Ajuste Tratamento	Valor	Classe CGM	GSI	Em* (GPa)
SRBL02	0,0-1,80	15		5		10	5	0	10	55	7,5		55
	1,8-3,50	25		15		10	10	0	5	70		30	70
	3,50-4,70	30		25		15	10	0	5	90		70	90
	4,70-6,70	15		15		15	10	0	3	63		16	63
	6,7-11,20	30		15		15	10	0	3	78		46	78
	11,20-42,30	30		25		20	15	0	3	93		86	93
	42,30-45,00	15		25		3	15	-5		58	12		58
SRBL03	0,0-1,00	10		5		10	15			40	5,6		40
Escav.	1,0-7,00	15		15		10	15			55	13		55
	7,0-11,80	15		15		10	15		4	59	17		59
	11,8-19,50	30		25		10	15			80		60	80
	19,50-20,00		15		30	10	15	-5		55		30	55
SRBL04	0,0-1,00		5		15	3	10	-12		33	1,9		33
	1,0-2,20	25		5		10	10	-2		55	8,9		55
Escav.	2,20-3,04	25		20		3	10	-2		63		12	63
Gx	3,04-4,10		5		20	10	10	-10	7	52	6,3		52
	4,10-5,60	20		20		10	10	0	5	70		30	70
	5,6-20,00	30		25		15	15	0	5	90		80	90
SRBL05	0,0-1,50	10		5		10	10	-2		40	3,8		40
	1,50-2,85	30		25		15	15	0		85		70	85
	2,85-6,28		15	17		3	15	-5		35	7,5		35
Escav.	6,28-8,98	30		23		10	15	0		78		56	78
	8,98-21,00	30		23		10	15	0	7	85		70	85
SRBL06	0,0-3,20	30		17		5	15	-5		67		24	67
	3,20-11,00	30		28		10	15	0		83		66	83
	11,0-15,00	30		22		15	15	0		82		64	82
SRMM	0,0-2,80	30		18		10	10	-5	2	75		30	75
	2,8-6,60	30		25		5	10	0		75		40	75
	6,6-12,20		15			5	5	-2		20	2,1		20
	12,2-15,00	28		23		15	15	0		81		62	81
SRMJ	0,0-1,50	30		20		5	15	-5		70		30	70
	1,5-5,80	30		25		5	15	-5		75		40	75
Escav.	5,8-6,50	30		23		15	15	0		83		66	83
	6,50-15,00	30		23		15	15	0	4	87		74	87
SR-05	2,0-9,50	15		5		10	10	0		45	5,6		45
	9,50-20,00	25		10		15	5	-2		65	12		65
	20,0-31,00	30		12		15	15	0		72		44	72
	15,0-29,90	27		15		10	10	-2		43	3,3		43
	29,9-50,14	30		22		15	15	0		67		20	67
SR-55	7,3-10,30	13		5		10	5	-2	4	82		64	82
	10,3-21,50	27		15		10	10	-2		47	4,2		47
	21,5-31,30	30		22		15	15	0		67		20	67
SR-06	5,00-15,00	13		5		10	5	-2		82		64	82

B.5.3. UHE Serra do Facão – Classificação geomecânica proposta para a fase do projeto executivo (obra) (CGM) (cont.)

Sondagem		Res. Rocha intacta		Espaçamento das descontinuidades		Condição das Descontinuidades	Classe de Permeabilidade	Ajuste da Descontinuidades	CGM (Obra)				
Nº	Trecho (m)	Rocha Consistente	Rocha Branda	Fratura -mento Rocha Consistente	RQD Rocha Branda				Ajuste Tratamento	Valor	Classe CGM	GSI	Em* (GPa)
SR-57	4,60-11,00	15		5		10	15	0		45	7,5		45
	11,0-14,00	25		10		15	10	0		65		20	65
	14,0-21,50	25		22		15	15	0		77		54	77
	21,50-32,00	30		22		15	20	0		82		74	82
Obs.: (*) $E_m = 2RMR - 100$, para $RMR > 50$, Bieniawski (1978). $E_m = 10^{(RMR-10)/40}$, para $RMR < 50$, Serafim & Pereira (1983)													

Tabela B.5.4. UHE Serra do Facão - Túnel de Desvio – Sistemas de Classificação do maciço rochoso

Data da Classific.	Intervalo do Estaqueamento		Q	Segm.	Extensão	Remessa	RMR	GSI	Em	CGM
	do Segmento Classificado		Barton	Ext.(m)	Acumul.	Data	VALOR	Valor	(Gpa)	
16/08/07	Est.05+19,50	06+11,50	2,953	12,00	12,00m	29/11/07	57	52	14	61
21/08/07	Est.06+11,50	07+03,40	3,008	11,90	23,90m	29/11/07	57	52	14	61
23/08/07	Est.07+03,40	07+06,70	3,063	3,30	27,20m	23/08/07	57	52	15	61
24/08/07	Est.07+06,70	07+10,20	3,791	3,50	30,70m	24/08/07	59	54	17	63
25/08/07	Est.07+10,20	07+13,70	2,133	3,50	34,20m	25/08/07	55	50	10	59
28/08/07	Est.07+13,70	07+17,50	2,050	3,80	38,00m	28/08/07	55	50	9	59
29/08/07	Est.07+17,50	08+01,31	2,009	3,81	41,81m	29/08/07	55	50	9	59
30/08/07	Est.08+01,31	08+04,40	1,981	3,09	44,90m	30/08/07	54	49	9	59
31/08/07	Est.08+04,40	08+08,23	2,160	3,83	48,73m	31/08/07	55	50	10	59
01/09/07	Est.08+08,23	08+12,66	2,201	4,43	53,16m	01/09/07	55	50	10	59
18/10/07	Est.22+01,65	21+12,05	2,466	9,60	09,60m	29/10/07	56	51	12	60
22/10/07	Est.21+12,05	21+07,65	3,288	4,40	14,00m	29/10/07	58	53	16	62
26/10/07	Est.21+07,65	21+02,70	3,068	4,95	18,95m	29/10/07	57	52	15	61
29/10/07	Est.21+02,70	20+15,65	3,358	7,05	26,00m	29/10/07	58	53	16	62
31/10/07	Est.20+15,65	20+08,64	3,071	7,01	33,01m	03/11/07	57	52	15	61
01/11/07	Est.20+08,64	20+02,25	1,936	6,39	39,40m	03/11/07	54	49	9	59
03/11/07	Est.20+02,25	19+15,70	2,712	6,55	45,95m	03/11/07	56	51	13	61
04/11/07	Est.19+15,70	19+08,75	2,987	6,95	52,90m	06/11/07	57	52	14	61
05/11/07	Est.19+08,75	19+01,90	3,066	6,85	59,75m	06/11/07	57	52	15	61
07/11/07	Est.19+01,90	18+14,52	3,330	7,38	67,13m	09/11/07	58	53	16	62
08/11/07	Est.18+14,52	18+07,23	3,672	7,29	74,42m	09/11/07	58	53	17	62
09/11/07	Est.18+07,23	18+00,85	3,746	6,38	80,80m	12/11/07	59	54	17	62
10/11/07	Est.18+00,85	17+13,90	3,774	6,95	87,75m	12/11/07	59	54	17	62
12/11/07	Est.17+13,90	17+07,06	3,837	6,84	94,59m	12/11/07	59	54	18	63
13/11/07	Est.17+07,06	17+00,85	3,927	6,21	100,80m	14/11/07	59	54	18	63
14/11/07	Est.17+00,85	16+13,64	4,094	7,21	108,01m	19/11/07	59	54	18	63
16/11/07	Est.16+13,64	16+06,82	4,194	6,82	114,83m	19/11/07	59	54	19	63
17/11/07	Est.16+06,82	15+19,95	4,128	6,87	121,70m	19/11/07	59	54	18	63
18/11/07	Est.15+19,95	15+12,94	4,104	7,01	128,71m	19/11/07	59	54	18	63
19/11/07	Est.15+12,94	15+06,50	4,002	6,44	135,15m	21/11/07	59	54	18	63

Tabela B.5.4. UHE Serra do Facão - Túnel de Desvio – Sistemas de Classificação do maciço rochoso (cont.)

Data da Classific.	Intervalo do Estaqueamento	Q	Segm.	Extensão Acumul.	Remessa	RMR	GSI	Em	CGM
	do Segmento Classificado	Barton	Ext.(m)		Data	VALOR	Valor	(Gpa)	
21/11/07	Est.15+06,50 14+19,15	4,100	7,35	142,50m	22/11/07	59	54	18	63
22/11/07	Est.14+19,15 14+11,75	3,982	7,40	149,90m	23/11/07	59	54	18	63
23/11/07	Est.14+11,75 14+04,57	3,908	7,18	157,08m	26/11/07	59	54	18	63
25/11/07	Est.14+04,57 13+18,46	3,955	6,11	163,19m	26/11/07	59	54	18	63
27/11/07	Est.13+18,46 13+10,33	3,935	8,13	171,32m	28/11/07	59	54	18	63
28/11/07	Est.13+10,33 13+03,87	3,963	6,46	177,78m	29/11/07	59	54	18	63
01/12/07	Est.13+03,87 12+16,50	4,057	7,37	185,15m	03/12/07	59	54	18	63
03/12/07	Est.12+16,50 12+09,58	4,118	6,92	192,07m	03/12/07	59	54	18	63
03/12/07	Est.12+09,58 12+01,89	4,090	7,69	199,76m	03/12/07	59	54	18	63
04/12/07	Est.12+01,89 11+14,43	4,029	7,46	207,22m	04/12/07	59	54	18	63
06/12/07	Est.11+14,43 11+07,15	2,513	7,28	214,50m	07/12/07	56	51	12	60
07/12/07	Est.11+07,15 10+19,96	1,899	7,19	221,69m	07/12/07	54	49	8	58
11/12/07	Est.10+19,96 10+11,60	2,448	8,36	230,05m	11/12.07	56	51	12	60
14/12/07	Est.10+11,60 10+01,18	3,962	10,42	240,47	14/12/07	59	54	18	63
15/12/07	Est.10+01,18 09+13,24	4,133	7,94	248,41	15/12/07	59	54	18	63
18/12/07	Est.09+13,24 09+06,11	3,899	7,13	255,54	18/12/07	59	54	18	63
19/12/07	Est.09+06,11 08+17,46	3,718	8,65	264,19	19/12/07	59	54	17	62

Apêndice C

[illegible]

INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS			DATAS		COORDENADAS		PERFIL DE SONDAGEM			
			INÍCIO:	09/07/86	NORTE:	8.002.805,00	FURO Nº:	SR 55		
UHE SERRA DO FACÃO			TÉRMINO:	16/07/86	ESTE:	216.747,10	LOCAL			
			PROF. (m):	313,00	COTA BOCA FURO (m)	MARGEM DIREITA				
			DIR/INCL.:	VERTICAL	694,78					
PROFUNDIDADE (m) MÉTODO E DIÂM. PROFUNDIDADE	REVESTIMENTO E SONDAGEM	DESCRIÇÃO DO MATERIAL E INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA	PERFIL GEOLOGICO	DESCONTINUIDADES ESTRUTURAS OBSERVAÇÕES	RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO AMOSTRADOR SPT Nº DE GOLPES/30cm	LAVAGEM POR TEMPO	SOLOS		ENSAIO DE PERMEABILIDADE	
							CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA	AMOSTRAGEM PROFUNDIDADE DO ENSAIO (m)	MÉTODO (l/min.m)	COEFICIENTE K (cm/s)
0,00		COLUVIÃO SILTE ARENOSO, COR VERMELHA ESCURA MICACED	SA		38 %					
3,00		SOLO DE ALTERAÇÃO DE MX FELDSPÁTICO QUARTZO-MX. FELDSPÁTICO AREIA SILTOSA, COR MARROM CLARO, COM PLANOS DE FRATURAS CADUCOS E ALTERADOS.	SA MX	ALTERNÂNCIA DE VÊNICULAS DE QUARTZO	75 % 18 % 50 %					
6,00	669,78									
8,00		MICAXISTO FELDSPÁTICO/QUARTZO- MICAXISTO FELDSPÁTICO GRANULAÇÃO FINA A MÉDIA, COR AMARELA ACINZENTADO.								
10,00	684,78									
15,00	679,78									
19,20	675,28	MICAXISTO FELDSPÁTICO/QUARTZO- MICAXISTO FELDSPÁTICO GRANULAÇÃO FINA A MÉDIA, COM INTER- CALAÇÕES DE VÊNICULAS MILIMÉTRICAS DE QUARTZO, COR CINZA.	Mx	CLASSIFICAÇÃO DOS PLANOS DE FRATURAS						
30,00	679,79									
25,00	669,78									
30,00	664,78									
31,30	663,48									

[illegible]

INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS				DATAS		COORDENADAS		PERFIL DE SONDAGEM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
UHE SERRA DO FACÃO				INÍCIO:	08/02/08	NORTE:	8.002.786,98	FURO Nº:	SR _{BL} 02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
				TÉRMINO:	09/02/08	ESTE:	216.722,54	LOCAL																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
				PROF. (m):	45,00	COTA BOCA FURO (m)		MARGEM DIREITA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
DIR/INCL.:	VERTICAL	696,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
ESCALA: 1:100	DIÂMETRO FURO	PNEUM. FURO	COTAS e N.º	DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL		PERFIL GEOLÓGICO	JUNTAS - CLASSIF. GEOMECÂNICA										S.P.T. (kgf/cm²)	ENSAYOS DE RESISTÊNCIA (MPa)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
							ABERTURA	RUGOS	ORIENTAÇÃO	PREENCHIM.	ESPAC.	CLASSIF. JUNTA	ESCOM- POSSÍVEL D	CONDI- TÊNCIA C	FRATURAMENTO F	RQD (%)		TENSÃO DE RUP. (MPa)	TENSÃO DE COMP. (MPa)	TENSÃO DE DEFORM. (MPa)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				(PRELIMINAR, N.º DE 001 A 1000)	NOME DA ROCHA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														

[illegible]

[illegible]