

MACIÇOS ROCHOSOS EM PROJETOS HIDRELÉTRICOS: PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA*

Rock masses in hydroelectric projects: a proposal of geomechanical classification

João Batista de Mesquita**

José Alexandre J. Perinotto***

André Pacheco de Assis****

RESUMO – Desenvolveu-se uma proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos em barramentos hidrelétricos a céu aberto (CGM), tendo como base estrutural o Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, para aplicação nas fases de viabilidade e projeto básico antes da construção, e projeto executivo durante o preparo das fundações. Os parâmetros, simples e consagrados, são obtidos com pesquisas e procedimentos comumente empregados, tendo como casos, os aproveitamentos hidrelétricos do Jirau, no rio Madeira, Porto Velho (RO) e Serra do Facão, no rio São Marcos, Catalão (GO), ambos no Brasil. Foram introduzidos ajustes devidos aos tratamentos de fundação aplicados para contemplar as melhorias devido a estes na qualidade do maciço rochoso da fundação da barragem. Demonstrou-se a obtenção de parâmetros geomecânicos, testou-se e avaliou-se nos casos citados e, finalmente, correlacionou-se a CGM com os sistemas RMR e GSI (Geological Strength Index), visando à obtenção de parâmetros com lógica matemática. Ressalta-se a importância das classificações geomecânicas e os reflexos nas prospecções de projetos hidrelétricos.

ABSTRACT – A proposal has been developed of rock mass geomechanical classification (CGM) for surface use in hydroelectric design and construction, based on the Rock Mass Rating (RMR) by Bieniawski, for application in the design phases before bidding, and in the executive design during the preparation of the dam foundations. The parameters, simple and traditional, are obtained by well-known procedures and employed in two case studies: the hydroelectric projects of Jirau, in Madeira river, Porto Velho-RO and Serra do Facão, in São Marcos river, Catalão-GO, both in Brazil. Adjustments due to the applied foundation treatments were introduced to incorporate their improvements in the surface rock mass of the dam foundation. The obtention of geomechanical parameters was demonstrated. The CGM was tested and evaluated in both mentioned cases and, finally, correlated to the RMR system and Geological Strength Index (GSI), aiming to obtain geomechanical parameters. The importance of geomechanical classifications and their application to hydroelectric projects are pointed out.

PALAVRAS CHAVE – Classificação geomecânica, maciço rochoso, hidrelétrica.

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

* Síntese da Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, pela Universidade Estadual Paulista UNESP- Campus de Rio Claro-SP.

** Geólogo, Doutorando, Profissional liberal PCE Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda. Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: jbatmesquita@yahoo.com.br

*** Geólogo, Ph.D., Professor UNESP- Rio Claro – SP. Brasil. E-mail: perinoto@rc.unesp.br

**** Eng. Civil, Ph.D., Professor UnB- Brasília - DF. Brasil. E-mail: aassis@unb.br

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. Também é de grande importância o conhecimento 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 conseqüências 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.

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.

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.

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 a 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 análises das especificações técnicas aplicadas nos serviços de preparo e liberação de fundações de empreendimentos hidrelétricos empregadas nas últimas três décadas no Brasil, a exemplo de Tucuruí (1978-1982), Balbina (1982-1984), Samuel (1984-1987), Manso (1999-2001), Peixe-Angical (2004-2005) e 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 megafaturas 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.

O objetivo principal do trabalho foi formular proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos aplicada a projetos hidrelétricos, de obras a céu aberto, tendo como estudo de casos o Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau e a Usina Hidrelétrica (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.

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, enquanto 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.

Para subsidiar a proposta de classificação, desenvolveu-se intensa revisão bibliográfica sobre classificações e caracterização geomecânica de parâmetros de maciços rochosos. Em seguida, os estudos foram desenvolvidos em uma sequência de atividades subdivididas em três etapas: coleta, tratamento e sistematização dos dados.

O desenvolvimento do trabalho foi iniciado 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. 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.

Já o desenvolvimento da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos para a fase de projeto executivo (obra) se concentrou na UHE Serra do Facão. 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.

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 foi 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 *et al.*, 2007).

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 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) incluiu a 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 à avaliação da aplicabilidade da classificação geomecânica proposta, tendo sido selecionadas áreas diversificadas de fundações de estruturas de concreto e de barragens de terra e enrocamento. Finalmente, considerando o cumprimento do objetivo principal do trabalho, desenvolveram-se as conclusões. No entanto, vale observar que esta proposta de classificação deve ser objeto de maior calibração e ajuste, em função de aplicações em outros empreendimentos.

2 – CONHECIMENTO DO MEIO FÍSICO

As áreas de estudos de casos (Figura 1), para desenvolvimento da proposta de classificação geomecânica de maciços rochosos, de projetos hidrelétricos a céu aberto (CGM), compreendem:

- o Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) Jirau, situado na Cachoeira do Jirau, no médio rio Madeira, a 130 km de Porto Velho, RO, para as fases dos estudos de viabilidade e projeto básico;
- a Usina Hidrelétrica (UHE) Serra do Facão, em execução no rio São Marcos, um dos principais tributários do rio Paranaíba, localizada na divisa dos municípios de Catalão e

Davinópolis, GO, a 54 km e 22 km da sede dos respectivos municípios, para a fase de projeto executivo (obra).

Quanto ao AHE Jirau, conforme os estudos de viabilidade (Furnas *et al.*, 2004), este 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-estrutura de energia e de transportes entre Brasil e Bolívia.

O AHE Jirau possui um reservatório de pequenas dimensões, com área de 244 km², sendo cerca de 136 km² a inundação natural do rio Madeira, o que corresponde a uma relação área/potência instalada de 0,074 km²/MW. O rio Madeira, com vazão média anual em Jirau de 19 000m³/s, é o afluente mais importante do rio Amazonas. Seu comprimento, até a foz no rio Amazonas, é de 1238 km, com navegação franca a jusante de Porto Velho, estando incluso no projeto a construção de eclusa e canais de navegação. O arranjo (Figura 2) foi concebido nos estudos de viabilidade (Furnas *et al.*, 2004), com a Casa de Força apresentando 44 turbinas tipo bulbo e potência instalada de 3300 MW.

Quanto à geologia local do AHE Jirau, 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, denominada genericamente de riolito. Destacam-se três famílias principais de descontinuidades com ampla exposição no período de estiagem na 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. A direção do plano predominante é de N300W, com mergulho subvertical, 70°-90° NE (ou) SW (Figura 4);
- 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°E e mergulho sub-vertical, (85°-90° NE-SW), inclinado tanto para NW quanto para SE. A jusante da cachoeira do Jirau é responsável pelo alinhamento da calha do rio Madeira. É certamente a família mais importante do maciço, de grande persistência e com características geomecânicas similares às da família NW-SE;

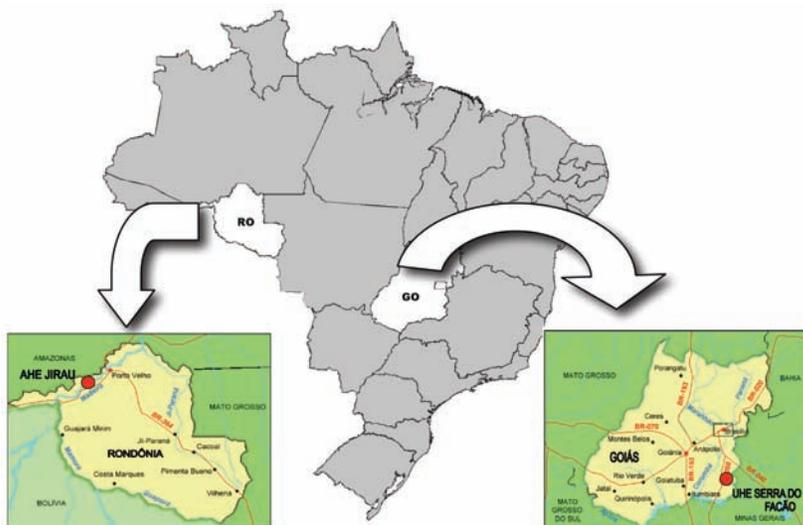


Fig. 1 – Localização das áreas de estudo de casos, AHE Jirau, no rio Madeira, RO e a UHE Serra do Facão no rio São Marcos, GO.

- Família sub-horizontal, sendo a principal responsável pelo contorno superior dos macro-afloramentos (ilhas). As discontinuidades 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 é inferior a 15,0 m, apresentando-se parcialmente abertas nos primeiros metros e fechadas a maior profundidade.

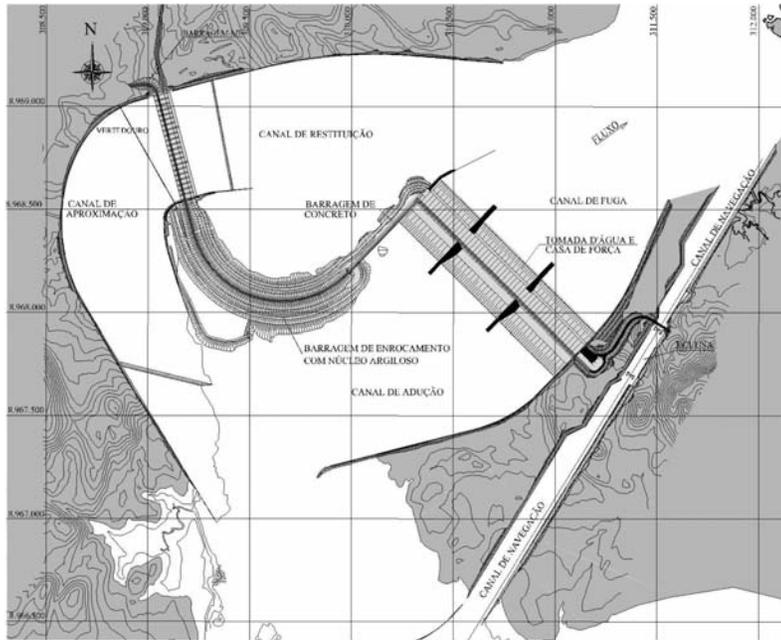


Fig. 2 – Arranjo das obras civis, em planta, do AHE Jirau.

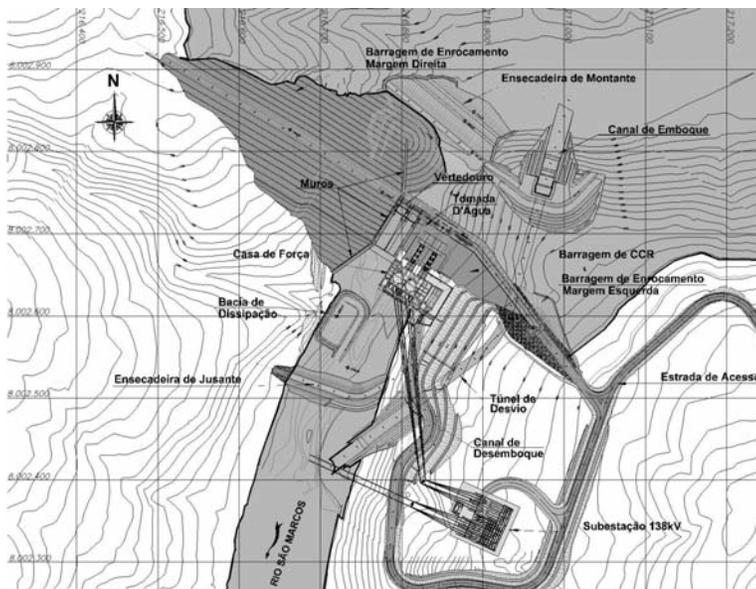


Fig. 3 – Arranjo das obras civis, em planta, da UHE Serra do Facão.

A UHE Serra do Facão, conforme mostrada no arranjo das obras civis (Figura 3), encontra-se em construção (setembro/2008) com cerca de 45% das obras civis executadas, com potência instalada de 213 MW e reservatório com área de 232 km², o que corresponde a uma relação área/potência instalada de 1,09 km²/MW.

Quanto à geologia local, apresenta uma seqüência de rochas metamórficas do Grupo Araxá, predominantemente micaxisto feldspático e/ou quartzo-micaxisto feldspático de granulação fina e mais raramente média e, camadas e lentes de grafita xisto. 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. Destacam-se as discontinuidades sub-horizontais (Figura 5) com características geotécnicas desfavoráveis, 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.



Fig. 4 – AHE Jirau, jusante da barragem do leito do rio: Descontinuidade da família NW SE, atitude N15° W/82° NE.



Fig. 5 – UHE Serra do Facão: Muro de encontro montante (El. 670,0), parede NW - descontinuidade sub-horizantal.

3 – PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

3.1 – Generalidades

Ao classificar o maciço rochoso de um barramento 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. Para alcançar o objetivo do trabalho, 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.

É uma prática dos profissionais da área de barragens adaptarem e utilizarem, com certos critérios, classificações geomecânicas concebidas para projetos de túneis. A adaptação de determinada classificação geomecânica desenvolvida para túneis em obras a céu aberto, embora seja 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. Porto (2005) menciona 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). 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.

O maciço rochoso pode 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.

Os parâmetros e 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. No presente trabalho, a classificação proposta será identificada como CGM.

3.2 – Base estrutural da classificação proposta

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

- Os resultados da avaliação de três estruturas do AHE Jirau foram compatíveis com as características médias do maciço, com valores na faixa esperada, com exceção aos obtidos no sistema Q (Barton *et al.*, 1974), que se apresentaram variados e relativamente baixos;

- As correlações do RMR propostas por alguns autores (Quadro 1), na maioria, foram coerentes, inclusive do sistema Q (Moreno, 1980 e Barton, 2000); a correlação entre os sistemas Q e MR (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, com valor máximo de 100;
- 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.

Quadro 1 – Correlações entre sistemas de classificação geomecânicos.

Autor	Expressão	Resultado	Valor – Análise
Cameron – Clarke e Budavari, 1981	$RMR = 5,4. \ln Q + 60,8$	RMR = 68	67 – Confere
Neves <i>et al.</i> , 1989	$MR = 0,9.RMR + 8$	MR = 68	72 - Na faixa
Barton, 2000	$RMR = 15. \ln Q + 5$	RMR = 60	67- Aceitável
Moreno, 1980	$MR = 5,4. \ln Q + 55,2$	RMR = 63	67- Dentro da classe
Rutledge e Preston, 1978	$RMR = 5,9. \ln Q + 43$	RMR = 52	67 - Baixou uma classe
Bieniawski, 1989	$RMR = 5,4. \ln Q + 44$	RMR = 57	67 - Baixou uma classe
Abad <i>et al.</i> , 1984	$RMR = 5,4. \ln Q + 41,8$	RMR = 49	67 - Muito diferente
Rocha, 1976	$Q = 8,4. \ln MR + 8,4$	Q = 75	4,4 - Muito diferente

3.3 – Parâmetros adotados

São adotados os seguintes parâmetros/índices geotécnicos, com pesos diferenciados na classificação: Resistência da rocha intacta; Fraturamento (ou RQD); Características das descontinuidades; Permeabilidade; e Ajustes das descontinuidades e dos tratamentos de fundação aplicados.

CGM tem a mesma base de cálculo do RMR, com valor máximo de 100.

O parâmetro resistência da rocha intacta (Quadro 2) é obtido, a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão simples e/ou carga puntiforme, inclusive para rochas brandas e ou intemperizadas (Soares, 1991). Na falta de ensaios laboratoriais, a resistência da rocha poderá ser estimada com base em ensaios expeditos de campo, conforme indicado pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981).

O grau de fraturamento para rochas consistentes é obtido em furos de sondagem rotativa, defasado de um grau (Furnas, 2002), visto que o menor grau de fraturamento (F1) considera 0 a 1 fratura por metro; o grau de fraturamento (F0) considera o espaçamento de fraturas naturais maior que um metro.

Quadro 2 – Resistência da rocha intacta consistente e branda e os pontos da CGM.

Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta – consistente (MPa)	> 250	250-100	100-50	50-25	≤ 25
Peso relativo (pontos)	30	25	20	15	10
Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta - branda (MPa)	25	25-10	10-5	5-1	< 1
Peso relativo (pontos)	10	8	5	3	1

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), citada pela ABGE/CBMR (1983). As dimensões dos blocos de rocha resultam da intensidade de fraturamento do maciço e da orientação das descontinuidades, pela densidade de descontinuidades 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 1 e 2 se determina o índice volumétrico J_v (número total de descontinuidades por unidade de comprimento), que interceptam uma unidade de volume do maciço rochoso (1 m³). Na CGM assumem pesos relativos conforme Quadro 3.

$$J_v = \sum n^\circ \text{descontinuidades/comprimento medido} \quad (1)$$

sendo

$$J_v = (n^\circ J_1/L_1) + (n^\circ J_2/L_2) + (n^\circ J_3/L_3) \quad (2)$$

Para maciços de rochas brandas, o RQD obtido, deve ser determinado conforme proposto por Deere (1968) e recomendações da *Internacional Society of Rock Mechanics* (ISRM, 1981), e ser adotado com valores inteiros múltiplos de 5 (Quadro 3).

Quadro 3 – Tamanho dos blocos em função da densidade de descontinuidades por volume para rocha consistente e RQD para rocha branda e os respectivos pesos relativos adotados na CGM.

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
RQD (%)	> 75	75-50	50-25	25-10	<10
Peso relativo	30	25	20	15	5

As características 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 Quadro 4.

As características das descontinuidades são reavaliadas por ocasião do mapeamento geológico-geotécnico da fundação, sendo considerada 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 e expressão 3:

$$\phi_r = \arctan (J_r/J_a) \quad (3)$$

Quadro 4 – Características das descontinuidades e pesos adotados na classificação.

Grupo	Descrição das descontinuidades	Ângulo de atrito (ϕ)	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.	$> 35^\circ$	20
II	Descontinuidades parcialmente abertas, contato rocha a rocha, planos com superfícies irregulares, rugosas, travadas, podendo apresentar pequenas oxidações.	$35^\circ - 30^\circ$	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.	$30^\circ - 25^\circ$	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.	$25^\circ - 20^\circ$	5
V	Descontinuidades com abertura ($>5\text{mm}$), 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.	$< 20^\circ$	0

A permeabilidade do maciço rochoso é determinada a partir de ensaio de perda d'água em sondagem rotativa (ABGE, 1975), ou por similaridade de áreas de mesmas características (padrão de fraturamento), com pesos relativos, conforme Quadro 5.

Quadro 5 – 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

A atitude ou orientação espacial e a persistência da descontinuidade podem condicionar situações desfavoráveis, penalizando o maciço rochoso. Por outro lado o sexto parâmetro da classificação de Bieniawski (1989), ajuste da orientação das descontinuidades, de acordo com os autores, Steffen (1976), Romana (1993) e Hack (2002), citados por Malafaia (2007), penaliza em excesso a nota final do RMR, quando aplicada à fundação e sobretudo a talude. Dessa forma, na fase de projeto, efetua-se a avaliação estrutural e espacial das descontinuidades para dimensionamento dos tratamentos de fundação, a partir das descrições dos testemunhos de sondagens e avaliação de campo da persistência (ISRM, 1981), e procede-se ao ajuste das descontinuidades por meio da análise da condição predominante no maciço, conforme Quadro 6.

A Figura 6 mostra situações de descontinuidades e irregularidades mais comuns encontradas em maciço rochoso de fundação de barragens; os tratamentos superficiais e subsuperficiais normalmente aplicados e os ajustes positivos decorrentes dos tratamentos constam no Quadro 7. 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.

Quadro 6 – Ajuste das discontinuidades 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 interceptados(s) por outra(s) formam blocos e cunhas instáveis na fundação e nos taludes de escavação. Previsão de grandes e ou intensos tratamentos.	(V) Muito desfavorável	- (menos) 12

Quadro 7 – 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 aplicação na fundação	Ajuste (peso relativo)
1. Presença de fraturas aleatórias descontínuas abertas, zonas estilhaçadas decorrentes de fogo, reentrâncias e saliências inclusive pequenos taludes negativos.	Preencher com calda de cimento e concreto dental, conforme tratamentos tipos 1-2 da Figura 6.	+ (mais) 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
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
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
5. Descontinuidades tipo caixa de falha com material incoerente, conforme similar ao tipo 3 da Figura 6.	Tratamentos previstos nas dimensões da caixa, conforme tratamento tipo 3 da Figura 6.	+(mais) 5
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 6.	+ (mais) 3
7. Descontinuidades abertas de baixo mergulho.	Tratamentos previstos, conforme tipo 6 da Figura 6.	+ (mais) 2
Obs: O peso relativo de ajuste é a soma dos pontos obtidos para cada tratamento aplicado.		

ESQUEMAS DOS TIPOS DE TRATAMENTO		
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 H (15 MPa)
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
CAIXAS DE FALHA COM PREENCHIMENTO DE SOLO/BLOCOS	3	A PREFERÊNCIA É A REMOÇÃO TOTAL DA FRATURA. CASO NÃO SEJA POSSÍVEL EXECUTAR A REMOÇÃO MÍNIMA DE 4L DE PROFUNDIDADE; PREENCHIMENTO DA CAVIDADE COM CONCRETO CLASSE H; INJEÇÕES EVENTUAIS
PROBLEMAS	TRATAMENTO	MÉTODOS
ZONAS COM FRATURAS ABERTAS E DEPRESSÕES	4	RETALUDAMENTO A 45°; REGULARIZAÇÃO COM CONCRETO CLASSE H; INJEÇÕES RASAS 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 H (15 MPa)

Fig. 6 – Descontinuidades e irregularidades do maciço rochoso e tratamentos superficiais aplicados (Modificado de CNEC, UHE Serra do Facão, desenho: NE-218-BP-014-DE-0601).

3.4 – Determinação da classe do maciço rochoso da CGM

A proposta classificação geomecânica de maciços rochosos (CGM) é aplicada para fases distintas do projeto hidrelétrico: projeto viabilidade e básico, e projeto executivo (obra).

Para obtenção da classe do maciço rochoso:

- i) Determina-se o peso relativo de cada parâmetro/índice da classificação;
- ii) Somam-se os pesos dos quatro parâmetros;
- iii) Identifica-se a condição mais representativa do maciço para ajuste das descontinuidades (Quadro 4) a partir das sondagens realizadas na área e/ou com base nos mapeamentos geológico-geotécnicos;
- iv) Obtém-se a classe do maciço rochoso (CGM) para as fases de viabilidade e básico, descontando da soma dos quatro parâmetros/índices o valor do ajuste das descontinuidades;
- v) Após conclusão dos tratamentos previstos em projeto e por critérios geológico-geotécnicos definidos no campo, 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 (iv), avaliam-se as situações de descontinuidades e irregularidades mais comuns encontradas em maciço rochoso de fundação de barragens e os tratamentos superficiais normalmente aplicados mostrados na Figura 6 e aplica-se a soma dos pontos do ajuste positivo obtidos do Quadro 7, determinando-se finalmente a classe do maciço rochoso para projeto executivo (obra), com base no Quadro 8.

3.5 – Aplicação da proposta de 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 conjunto tomada d'água e casa de força (TA\CF);
- (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.

Para a barragem de concreto e conjunto TA\CF do AHE Jirau, 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, utilizando as sondagens rotativas executadas para projeto e estando os resultados apresentados no Quadro 9.

Quanto à UHE Serra do Facão, foram escolhidas para aplicação da CGM, fase de Projeto Executivo (obra), as fundações da barragem principal, abrangendo três blocos de concreto (bloco 6, bloco 7, onde será implantado o vertedouro e o muro de encontro da barragem do leito do rio). Os valores dos parâmetros/índices classificatórios foram obtidos com base no mapeamento geológico-geotécnico da superfície de fundação e apoio nas sondagens rotativas executadas para projeto. A CGM, fases de viabilidade e projeto básico, foi determinada para cada área de fundação, estando apresentada no Quadro 10.

Para obtenção da CGM do maciço rochoso de fundação, fase de projeto executivo (obra), inicialmente determinaram-se os ajustes decorrentes dos tratamentos de fundação efetivamente aplicados em cada área (Quadro 11) e, sobre os pontos da CGM básica incidiu-se o referido ajuste, determinando as classes da CGM fase de projeto executivo (obra), sintetizado no Quadro 12.

Quadro 8 – Parâmetros/índices classificatórios e pesos relativos para determinação da CGM.

1.1 - Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta – consistente (MPa)		> 250	250-100	100-50	50-25	≤ 25		
Pontos		30	25	20	15	10		
1.2 - Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta - branda (MPa)		25	25-10	10-5	5-1	< 1		
Pontos		10	8	5	3	1		
2.1 - Fraturamento		F0	F1	F2	F3	F4		
2.2 - RQD (%) (Rocha branda)		> 75	75-50	50-25	25-10	< 10		
Pontos		30	25	20	15	5		
3-Características das descontinuidades	Grupo I $\phi > 35^\circ$	Grupo II $\phi > 30^\circ$, e $\phi \leq 35^\circ$	Grupo III $\phi > 25^\circ$, e $\phi \leq 30^\circ$	Grupo IV $\phi > 20^\circ$, e $\phi \leq 25^\circ$	Grupo V Ângulo de atrito (ϕ) ≤ 20°			
					$\phi > 15^\circ$, e $\phi \leq 20^\circ$	$\phi > 10^\circ$, e $\phi \leq 15^\circ$	$\phi \leq 10^\circ$	
Pontos		20	15	10	5	3	2	0
4 - Classe de permeabilidade		P1	P2	P3	P4	P5		
Permeabilidade equivalente (cm/s)		$k < 10^{-5}$	$\geq 10^{-5}$ e $k < 10^{-4}$	$k \geq 10^{-4}$ e $k < 5 \times 10^{-4}$	$k \geq 5 \times 10^{-4}$ e $k < 10^{-3}$	$k \geq 10^{-3}$		
Pontos		20	15	10	5	0		
5 - Ajuste das descontinuidades.		Muito favorável (I)	Favorável (II)	Aceitável (III)	Desfavorável (IV)	Muito desfavorável (V)		
Pontos		0	-2	-5	-10	-12		
Classe da proposta Classificação geomecânica do maciço rochoso (CGM) fase de viabilidade e projeto básico.								
Soma dos pontos		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20		
Classe do maciço rochoso		CGM-1	CGM-2	CGM-3	CGM-4	CGM-5		
6 - Ajustes dos tratamentos de fundação efetivamente aplicados – Soma dos pontos obtidos do Quadro 6								
Classe da proposta Classificação geomecânica do maciço rochoso (CGM) fase de projeto executivo (obra).								
Soma dos pontos		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20		
Classe do maciço rochoso		CGM-1	CGM-2	CGM-3	CGM-4	CGM-5		

Quadro 9 – AHE Jirau - Barragem de concreto e Tomada d'água\Casa de força: Síntese dos resultados da CGM, fase de viabilidade e projeto básico.

a - AHE Jirau - Barragem de concreto							
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	3,05-15,23	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	-	-	-	-
b - AHE Jirau - Tomada d'água\Casa de força							
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

Quadro 10 – UHE Serra do Facão - Barragem principal de concreto: Síntese da CGM (básica).

Estruturas de concreto		Resistência da rocha intacta		Fraturamento da rocha		Condição das descont.	Classe permeabilidade	Ajuste descontinuidade	CGM	
Local	Área	Consistente	Branda	Consistente	Branda (RQD)				P ^{tos}	Class.
Blocos 6-7	1	25		25		15	15	-2	78	2
Blocos 6-7	2	25		20		10	15	-2	68	2
Blocos 6-7	3	28		28		10	15	-2	79	2
Muro M.	4	30		23		10	15	0	78	2
Muro C.	5	25		20		5	15	-5	60	3
Muro J.	6	25		25		15	15	0	80	2
Muro C.	7		3		20	10	10	-10	33	4

Muros: M- montante; J- jusante; C- central

Quadro 11 – UHE Serra do Facão - Barragem de concreto: CGM fase de projeto executivo (obra).

Ajustes decorrentes dos tratamentos de fundação									
Barragem de concreto	Área	Identificação do tratamento de acordo com o Quadro 6 e Figura 6							Total pontos
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 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 M.	4	2		3	2				7
Muro C.	5	2		3	2				7
Muro J.	6	2			2				4
Muro C.	7	2		3	2				7

Muros: M- montante; J- jusante; C- central

Quadro 12 – 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
Blocos 6-7	1	78	7	85	CGM -1
Blocos 6-7	2	68	7	75	CGM -2
Blocos 6-7	3	79	7	86	CGM -1
Muro M.	4	78	7	85	CGM -1
Muro C.	5	60	7	67	CGM -2
Muro J.	6	80	4	84	CGM -1
Muro C.	7	33	7	40	CGM -4

3.6 – Determinação do índice GSI (Geological Stress Index), 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 um maior número de casos com o uso da CGM.

A CGM, sendo correlacionada ao GSI para obtenção de parâmetros geomecânicos preliminares, passa a ser expressa conforme expressão 4:

$$GSI = CGM - 5 \quad (4)$$

Dentro dessa mesma concepção e restrições, podem-se utilizar as expressões para estimar valores de módulo de deformabilidade (E_m), como, por exemplo, a expressão 5 de Serafim e Pereira (1983) e a expressão 6 de Bieniawski (1978).

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40}, \text{ para } RMR < 50 \quad (5)$$

$$E_m = 2RMR - 100, \text{ para } RMR > 50 \quad (6)$$

No Quadro 13, constam os valores do GSI e do módulo de deformabilidade estimados para a barragem de concreto do AHE Jirau, seguindo essa proposta, portanto a CGM assume os valores da RMR.

Quadro 13 – AHE Jirau - Barragem de concreto: GSI e Módulo de deformabilidade (E_m) estimados com base na CGM (fase de viabilidade e projeto básico).

Furo Sond.	Trecho (m)	CGM	GSI	E_m (GPa)	Furo Sond.	Trecho (m)	CGM	GSI	E_m (GPa)
SR-205	4,36-5,95	4	59	5,6	SR-270	48,31-51,59	1	85	76
SR-205	5,95-7,40	2	80	50	SR-270	51,59-52,35	2	75	56
SR-205	7,40-15,15	2	82	56	SR-270	52,35-56,11	1	85	76
SR-270	0,00-11,70	2	85	50	SR-276	2,43-10,00	2	85	60
SR-270	11,7-15,67	2	76	50	SR-276	10,0-58,28	1	85	76
SR-270	15,67-45,25	1	85	89	SR-277	4,10-5,84	3	75	20
SR-270	45,25-46,2	1	80	67	SR-277	5,84-11,90	2	80	56
SR-270	46,2-47,40	1	85	89	SR-278	6,10-7,27	4	59	5,6
SR-270	47,4-48,31	2	80	67	SR-278	7,27-11,25	2	80	30

3.7 – Comparações e correlações entre RMR e CGM

Foram comparadas e correlacionadas as classificações CGM e RMR, em três furos típicos do maciço rochoso da UHE Serra do Facão, como mostrado na Figura 7. 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.

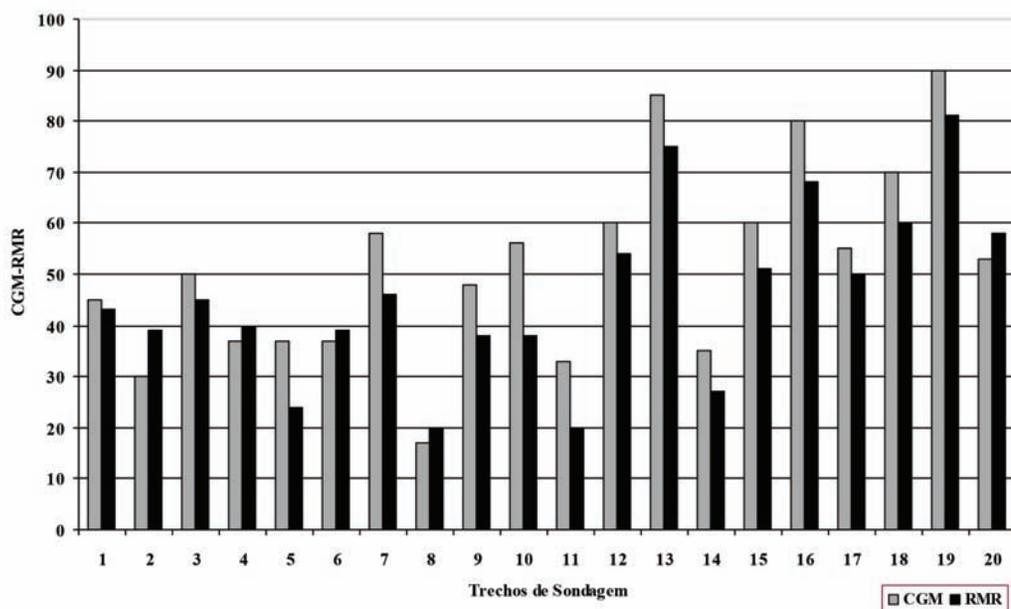


Fig. 7 – Correlação do maciço rochoso da UHE Serra do Facão, sondagens SR102, SRBL-02 e SRBL-04, para CGM - fase de projeto básico e o índice RMR, de Bieniawski (1989).

Na Figura 8a consta a correlação do riolito do AHE Jirau, na Figura 8b, do maciço xistoso da UHE Serra do Facão e na Figura 8c, dos dois maciços dos dois projetos. Os elementos da regressão linear (Quadro 14) 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. 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.

Quadro 14 – 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

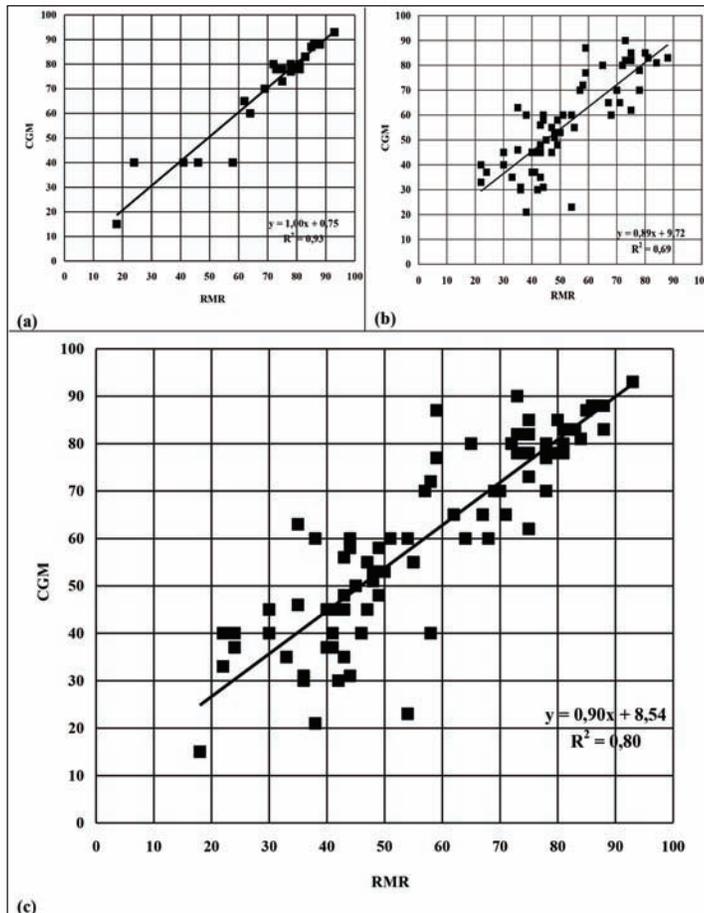


Fig. 8 – Regressão linear entre os sistemas CGM e RMR: (a) Maciço rochoso do AHE Jirau; (b) UHE Serra do Facão; (c) Maciços rochosos dos dois projetos.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

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.

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 a 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, em que o maciço rochoso é afetado por intenso intemperismo, condições diferentes daquelas onde foram formuladas na grande maioria as classificações geomecânicas tradicionais (Vaz, 1996).

O *Rock Quality Designation* (RQD), em sua versão original proposta por Deere (1963, 1968) e determinado conforme recomendações do ISRM (1981) se constitui em uma classificação e não somente em um parâmetro geomecânico. O Sistema RMR inclui como parâmetros classificatórios o espaçamento das descontinuidades e o RQD, ambos obtidos a partir de medições em testemunhos de sondagem ou determinados no campo, por meio de medições com uso de trena dos espaçamentos entre fraturas. Essa duplicidade foi resolvida na presente classificação, ao não adotar o índice RQD na CGM como parâmetro classificatório para rocha consistente. A opção de uso na CGM do espaçamento das descontinuidades ou o RQD, eliminando, portanto um parâmetro classificatório possibilitou redistribuir os pesos, em um total de 100 pontos.

Os aspectos de deformabilidade, resistência e permeabilidade do maciço rochoso, principais atributos que devem caracterizar uma fundação de um barramento hidrelétrico, conforme Costa (1999) 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.

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 da UHE Serra do Facão é apresentada. Na barragem principal, com exceção da área 2, as demais galgaram uma classe na CGM, com con-

siderável aumento nos índices GSI e, conseqüentemente, parâmetros de resistência e módulo de deformabilidade (E_m). Já nas barragens do leito do rio e margem direita, 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 E_m de 20 GPa passou para 46 GPa (130%). A região do núcleo, na margem direita, com presença de grafita-xisto, galgou uma classe, com o E_m 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 e Brown (1980a, b) 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), 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, que poderá ser 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.

Por fim, vale observar que no percurso destes estudos verificou-se a necessidade de sua complementação. Assim, algumas sugestões podem ser repassadas a futuras pesquisas.

Quanto à aplicação a rochas brandas, são encontradas grandes dificuldades na obtenção de seus parâmetros geomecânicos, em decorrência da metodologia empregada nas investigações e determinação dos parâmetros geotécnicos, a partir de sondagens mecânicas. Propõe-se criação de programas de investigação específicos e recomendam-se ensaios geotécnicos e até mesmo a criação e/ou ajuste nos parâmetros ora empregados em descrições de sondagens e mapeamentos geológico-geotécnicos.

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 pode 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 aumento 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 segurança”? São algumas indicações para futuras pesquisas nessa área de interesse.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J.; Caleda, B.; Chacon, E.; Gutierrez, V.; Hidalgo, E. (1984). *Application of Geomechanical Classification to Predict the Convergence of Coal Mine Galleries and to Design their Supports*. 5th Int. Congress Rock Mech., Melbourne, pp. 15-19.
- ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. (1975). *Ensaio de perda d'água sob pressão: Diretrizes*. Boletim nº 2, 16 p. São Paulo – SP.
- ABGE/CBMR - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas. (1983). *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos (tradução 12)*. São Paulo – SP.
- Barton, N. (2000). *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. Balkema, Rotterdam, 172 p.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, Wien, v. 6, pp. 183-236.
- Barton, N.; Choubey, V. (1978). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics 1/2:1-54. Vienna: Springer. Also NGI Publ. 119.
- Bieniawski, Z.T. (1978). *Determining Rock Mass Deformability. Experience from Case Histories*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomech. Abstr., Pergamon, 15, pp. 237-247.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications. A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 251 p.
- Cameron-Clarke, I; Budavari, S. (1981). *Correlation of Rock Mass Classification Parameters Obtained from Borecore and In Situ Observations*. Engineering Geology. Elsevier Science, Vol. 17, pp. 19-53.
- Costa, W.D. (1999). *Um modelo de classificação de maciços rochosos para fundação de barragens*. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 23, 1999, Belo Horizonte. Rio de Janeiro: CBDB, Vol. 2, pp. 219-227.

- Deere, D.U. (1963). *Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes*. In: Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol. 1, No. 1, pp. 16-22.
- Deere, D.U. (1968). *Geological Considerations*. In: Rock Mechanics in Engineering Practice, K.G Stagg, O.C. Zienkiewicz, (Eds.). London, UK: John Wiley & Sons, pp. 1-20.
- Furnas Centrais Elétricas SA. (2002). *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.
- Furnas Centrais Elétricas SA; Construtora Norberto Odebrecht; Projetos e Consultoria de Engenharia Ltda. (2004). *Complexo Hidrelétrico do Madeira - Estudos de Viabilidade do AHE Jirau*. Relatório Final: PJ-0519-V1-00-RI-0001.
- Furnas Centrais Elétricas SA; PCE - Projetos e Consultoria de Engenharia. (2006). UHE Batalha – Projeto Básico: Apêndice A Estudos Geológico-Geotécnicos PJ0606-B-G00-GR-RL-001-0, 54 p.
- Furnas Centrais Elétricas SA; PCE - Projetos e Consultoria de Engenharia. (2007). *UHE Batalha – Projeto Básico: Caracterização de Rochas Ensaios Geomecânicos, Índices Físicos e Caracterização por Difração de Raios-X*. Relatório interno DCT.C.04.003.2007-R0, 45 p.
- Hack, R. (2002). *An evaluation of slope stability classification*. Proc. ISRM Eurock, Funchal, Portugal.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (1980a). *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (1980b). *Empirical strength criterion for rock masses*. J. Geotech. Eng. Div., ASCE 106 (GT9), pp.1013-1035.
- Hoek, E. (1994). *Strength of Rock and Rock Masses*. International Society for Rock Mechanics – News Journal, 2(2): 4-16.
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition*. Toronto: North American Rock Mechanics Society.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, 211 p.
- Malafaia, A.L. (2007). *Sistemas de Classificação Geomecânica Aplicados aos Taludes Rochosos da UHE Batalha*. Tese de Mestrado, COPPE, UFRJ, 270 p.
- Marques Filho, P.L.; Geraldo, A. (1998). *Barragens e Reservatórios*. Geologia de Engenharia, A M. S. Oliveira, S.N.A. Brito (Eds.). São Paulo: ABGE, pp. 397-418.
- Mattos, G.; Sathler, G.; Bull, J.F.; Mesquita, J.B. (1984). *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, Vol. 2, pp.123-132.
- Miranda, T.F.S. (2003). *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.
- Moreno Tallon, E. (1980). *Aplicación de las Clasificaciones Geomecánicas a los Túneles de Pajares*. II Curso de Sostenimientos Activos en Galerías y Túneles. Madrid: Fundación Gomez-Parto.
- Neves, J.F.; Lima, C.A.; Soares, G.S.; Sousa, L.R. (1989). *Túnel da Auto-estrada Porto/Amarante, Caracterização do Maciço, Comportamento da Estrutura, Construção*. Revista Ingenium, Lisboa.

- Porto, M.A.A. (2005). *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.
- Rocha M. (1976). *Alguns problemas relativos à Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência.* Geotecnia. Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Nº 18, pp. 3-27.
- Romana, M. (1993). *A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating.* In Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practice & Projects, Vol. 3, pp. 575-600, Pergamon Press.
- Rutledge, J.; Preston, R. (1978). *Experience with Engineering Classifications of Rock.* Proc. Int. Tunneling Symposium. Tokio, pp. A3.1-A3.7.
- Serafim, J.L.; Pereira, J.P. (1983). *Considerations on the geomechanics classification of Bieniawski.* Proceedings of the International Symposium of Eng. Geol. Underground Construction, Vol. 1, pp. II.33-II.42, LNEC, Lisboa.
- Soares, L. (1991). *Determinação do Grau de Coerência de Rochas Brandas,* Tese de Doutorado, USP – São Paulo. 324 p.
- Steffen, O.K.H. (1976). *Research and development needs in data collection for rock engineering.* Proc. Int. Symp. Exploration for Eng., Vol. 2, pp. 95-104, Balkema, Rotterdam.
- Vaz, L.F. (1996). *Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais.* Rev. Solos e Rochas, Vol. 19, n. 2, ABMS/ABGE, São Paulo, SP, p.117-136.