

# AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO PRESENTE NA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE BANDEIRA DE MELO – BAHIA/BRASIL

## Quality Evaluation of Rocky Substratum distributed in Foundation of Bandeira de Melo Dam – Bahia/Brazil

Ronaldo Lima Gomes\*

**RESUMO** – Este trabalho apresenta o resultado dos estudos de mapeamento e caracterização geológico-geotécnica realizados no maciço rochoso presente nas fundações da Barragem de Bandeira de Melo, localizada no rio Paraguaçu a cerca de 24km a jusante da cidade de Itaeté-BA, Brasil. Possui o objetivo de reconhecer em escala de detalhe as diferentes litologias, estruturas e classes de qualidade do maciço das fundações do barramento, bem como fornecer subsídios geológico-geotécnicos que serão úteis no momento de escolha das soluções a serem empregadas em seu tratamento.

**SYNOPSIS** – This work presents the results of the studies of geological-geotechnical mapping made in rocky substratum distributed in foundations of the Bandeira de Melo Dam, located in the Paraguaçu river, city of Itaeté, Bahia State, Brazil. It has the objective of recognizing, in terms of detail scale the different lithologies, structures and geomechanical classification of massive foundations, as well as provide subsidies that will be useful at the moment of choice of solutions to be used in their treatment.

**PALAVRAS CHAVE** – Maciços Rochosos, Barragens, Fundações.

### 1 – INTRODUÇÃO

O barramento em estudo localiza-se sobre o Rio Paraguaçu, a aproximadamente 24km a jusante da sede municipal de Itaeté, que dista 380km de Salvador, capital do Estado da Bahia. Possui eixo com extensão de 820m, sendo cerca de 460m em maciço tipo CCR, que engloba a ombreira direita, canal da tomada d'água e vertedouro, e aproximadamente 320m em maciço de terra, abrangendo a ombreira esquerda e espaldares (Fig. 1).

A geometria do barramento reflete uma área mapeada de aproximadamente 30.000m<sup>2</sup>, que foi setorizada em função de diferentes litologias, graus de alteração, coerência e presença de descontinuidades, refletindo-se em diferentes classes de qualidade do maciço. Estas informações foram utilizadas como subsídio para a definição dos tratamentos a serem empregados, quando do aparecimento de zonas e/ou estruturas comprometedoras da qualidade da fundação do barramento, principalmente, com relação a sua estanqueidade e capacidade de suporte.

Ressalta-se que para avaliação da qualidade do maciço rochoso utilizou-se as consagradas classificações geomecânicas de Barton *et al.*, (1974), “Sistema Q”, e o “RMR-Rock Mass Rating” de Bieniawski (1973), que apesar de próprias para avaliação de maciços rochosos com a finalidade de escavações subterrâneas, mostraram-se bastante úteis quando utilizadas para o zoneamento geo-

---

\* Professor Adjunto, Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Estadual de Santa Cruz.  
E-mail: rlgomes@uesc.br

lógico-geotécnico e para avaliação da qualidade do maciço rochoso presente nas fundações da barragem de Bandeira de Melo.

## 2 – MÉTODO ADOTADO

O procedimento adotado para o presente estudo englobou trabalhos de campo e de escritório. Os trabalhos de campo consistiram no levantamento sistemático e contínuo de dados litológicos, estruturais, geotécnicos e geomecânicos do maciço. Já o trabalho em gabinete abrangeu o tratamento dos dados colhidos em campo, através da utilização de softwares de projeção estereográfica. Este tratamento possibilitou o reconhecimento das diversas famílias de fraturas existentes e, consequentemente, a análise de sua compartimentação, contemplando a atitude (direção e mergulho), o seu espaçamento, a sua persistência no maciço, abertura, e caso ocorra, o seu preenchimento. A rugosidade das juntas também foi considerada a partir da definição do índice JRC definido por Barton *et al.* (1974). Neste trabalho, utilizou-se para avaliação do grau de fraturamento do maciço rochoso o índice  $J_v$  (ISRM, 1978). Este índice é definido como a soma do número de juntas por metro para cada família de juntas presentes. Este índice foi utilizado, também, para a previsão dos valores de RQD (Deere, 1963) dos diferentes setores estudados, através da correlação  $RQD = 115 - 3,3 J_v$  (Barton *et al.*, 1974). Neste contexto, em favor da segurança, adotou-se para os cálculos do RQD os maiores valores de  $J_v$  encontrados nos diferentes setores.

Para o levantamento geológico-geotécnico adotou-se os procedimentos descritos no “Métodos Para Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos” tradução realizada em 1983 pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE do “Suggested Methods for the Quantitative Description of Rock Masses” publicado por ISRM (1978).

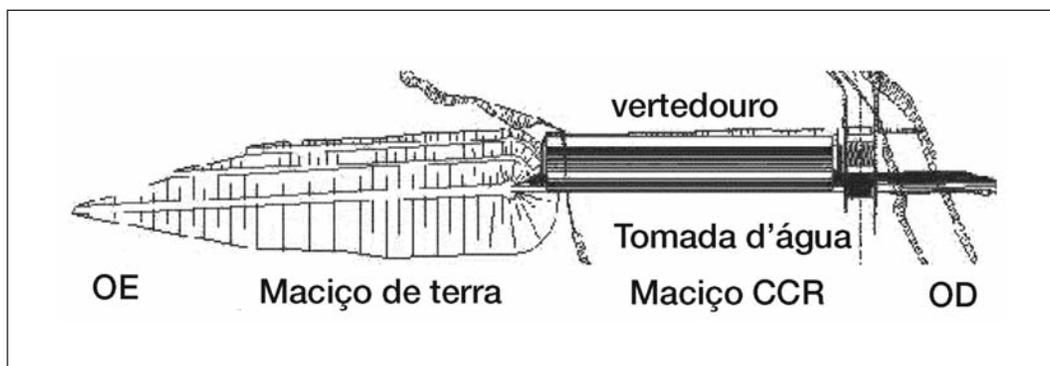


Fig. 1 – Arranjo geral do Barramento.

## 3 – CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO

De forma geral, a área estudada apresenta arcabouço geológico representado por rochas predominantemente gnáissico-migmatíticas do embasamento cristalino, que localmente afloram em morros e serras existentes nas proximidades do sítio do barramento. Devido a sua complexidade litológica, outros tipos rochosos também estão presentes no embasamento, porém menos expressivos, tais como as ocorrências de corpos graníticos e pegmatíticos, bem como lentes de anfíbolitos. Os itens a seguir apresentam os resultados do mapeamento e caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso referente aos trechos do sítio estudado.

### 3.1 – Maciço da Ombreira Direita

Este trecho possui extensão de cerca de 100m e encontra-se inserido na ombreira direita sobre a qual será construído em CCR parte do barramento. As litologias mapeadas são compostas por granito-gnaisses pegmatíticos (Setor I-B) e por gnaisses bandados (Setores I-A e I-C). Apesar da simplicidade litológica a posição geomorfológica fora do leito do rio contribui para a existência e preservação de diferentes graus de alteração do maciço. Neste contexto, a presença de uma lente de gnaisses bandados destaca-se como feição diferenciada, atestada pela coloração vermelho-amarronada e pela notável diminuição de resistência mecânica comprovada pelo aprofundamento da escavação (Fig. 2). Estas duas características provavelmente ocorrem em função da atuação do intemperismo nos gnaisses bandados de forma mais proeminente do que nos granito-gnaisses pegmatíticos, justificadas pelas diferenças mineralógicas entre as duas litologias, visto que os gnaisses bandados possuem maiores teores em minerais ferromagnesianos e, portanto, mais susceptíveis a alteração, quando comparado aos granito-gnaisses.

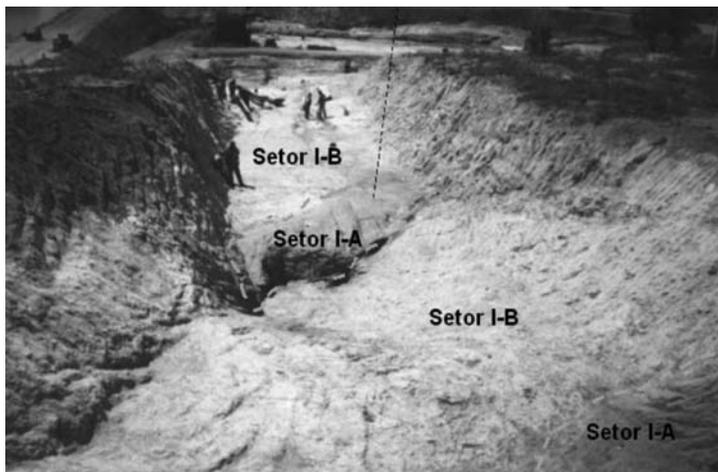


Fig. 2 – Vista panorâmica do “cut-off” da ombreira direita. Notar a diferença de resistência a escavação entre os gnaisses bandados alterados (Setor I-A) e os granito-gnaisses (Setor I-B).

### 3.2 – Maciço do Canal da Tomada D’água

Os gnaisses bandados e granito gnaisses pegmatíticos aflorantes na ombreira direita adentram de forma expressiva no canal da tomada d’água, desta maneira o maciço estudado foi compartimentado em quatro setores distintos (Figuras 3 e 4): O Setor I associa-se a área de ocorrência dos gnaisses bandados na proximidade do eixo do barramento, além dos dois afloramentos presentes no centro do canal; O Setor II representa a zona de cisalhamento ocorrente no gnaisse bandado, tendo como principal característica o reduzido espaçamento entre as suas famílias de fraturas; O Setor III engloba as áreas de ocorrência do granito-gnaisse pegmatítico e o Setor IV corresponde a ZCTD - Zona de Cisalhamento do Canal da Tomada D’água.

### 3.3 – Maciço do Vertedouro

O vertedouro do barramento representa uma estrutura de aproximadamente 250m dividida em dez blocos. As litologias mapeadas nos Blocos B1, B2 e B3 são constituídas por gnaisses bandados (Setores II-A1, II-A-B1, II-A-B2 e II-A-B3), granito-gnaisses pegmatíticos Setores II-D-B1. II-D-

B2 e II-D-B3) e pelos anfibolitos (Setores II-D-B1, II-D-B2 e II-D-B3). De forma geral, a foliação metamórfica nestas rochas possui direção predominante N275° com mergulhos variáveis de 30° a 60° para nordeste, ou seja para montante, incluindo também a atitude da ZCV – Zona de Cisalhamento do Vertedouro (Setor II-C-B1) (Figuras 5 a 7).



**Fig. 3** – Visão panorâmica do canal da tomada d'água. Notar o contato e a diferença de coloração entre os gnaisses bandados e o granito-gnaisse pegmatítico, além dos diferentes setores estudados.



**Fig. 4** – Setor IV, ZCTD - Zona de Cisalhamento presente no canal da tomada d'água. Aspecto da continuidade da zona de cisalhamento de direção N06° mergulhando cerca de 80° para SE (jusante), interceptando tanto o eixo do barramento quanto do canal em um ângulo aproximado de 45°.

Os granito gnaisses do Bloco 3 adentram pelo Bloco 4 e são interceptados, em contato estrutural, por uma faixa de aproximadamente 7 metros de gnaisses bandados de forma tabular (Setor II-A-B4) encaixada nos granito gnaisses (Setor II-D-B4). Esta faixa, de acordo com a sua foliação metamórfica, possui direção aproximada N10° com mergulho de cerca de 30° para sudeste (jusante).

De forma geral para o Bloco 5 as características geotécnicas apresentam-se similares as ocorrentes no maciço do Bloco 4. O Bloco 6 apresenta o predomínio da litologia dos gnaisses bandados (II-A-B6), que apresentam-se distribuídos por todo o bloco, a exceção, da ocorrência de duas "ilhas" de

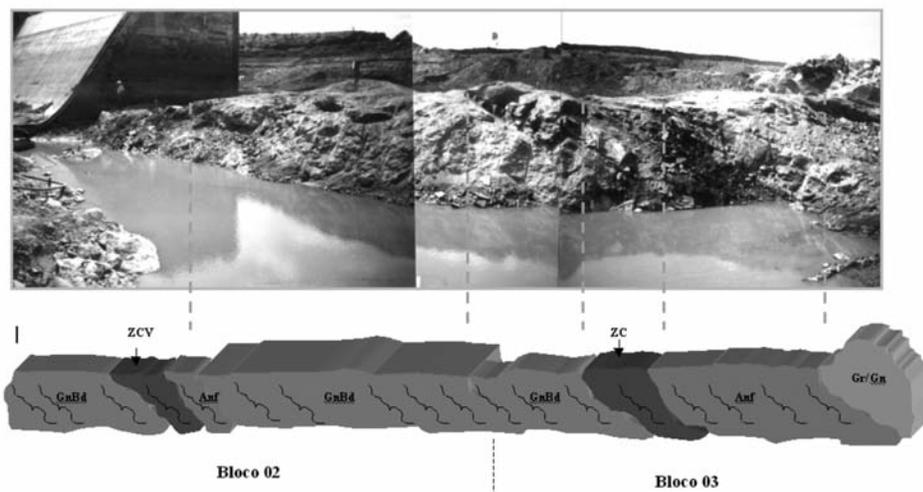
granito-gnaisses (Setor II-D-B6). O Bloco 7 destaca-se pela presença de uma zona de cisalhamento (Setor II-B-B7) de direção N340/65NE, que a partir do eixo, em direção a jusante, se ramifica em duas delimitando blocos de granito gnaisses (Setor II-D-B7) e de gnaisses bandados (Setor II-A-B7). O Bloco 8 apresenta a continuidade dos gnaisses bandados presentes no Bloco 7. De forma geral possuem semelhanças estruturais com os maciços vizinhos. Notou-se em campo a ocorrência de exudação de água em ponto fraturado localizado na base do talude da descida d'água. O Bloco 9 destaca-se pela presença de uma zona de cisalhamento (Setor II-B-B9) de direção predominante N10/15SE (jusante), associada ao contato entre granito gnaisses do setor II-D-B9 com os gnaisses bandados do setor II-A-B9. Esta zona caracteriza-se pela "anfibolitização" dos gnaisses bandados nas proximidades deste contato. Conforme já estudado em outros setores, a ocorrência do cisalhamento nos gnaisses bandados promove a diminuição de sua resistência mecânica contribuindo assim para a queda de qualidade do maciço neste setor. O Bloco 10 apresenta o predomínio dos gnaisses bandados (Setor II-A-B10), além da continuidade da zona de cisalhamento identificada no bloco 09 (setor II-D-B9).



**Fig. 5** – Detalhe do ressalto topográfico existente entre as litologias dos gnaisses bandados (Setor II-A-B1) e os anfibolitos (Setor II-B-B1).



**Fig. 6** – Face do Talude do Vertedouro no Bloco 03. Notar o contato entre os anfibolitos do Setor II-B-B3 e os granito-gnaisses do Setor II-D-B3.



**Fig. 7** – Perfil esquemático da compartimentação do maciço rochoso nos blocos 2 e 3.

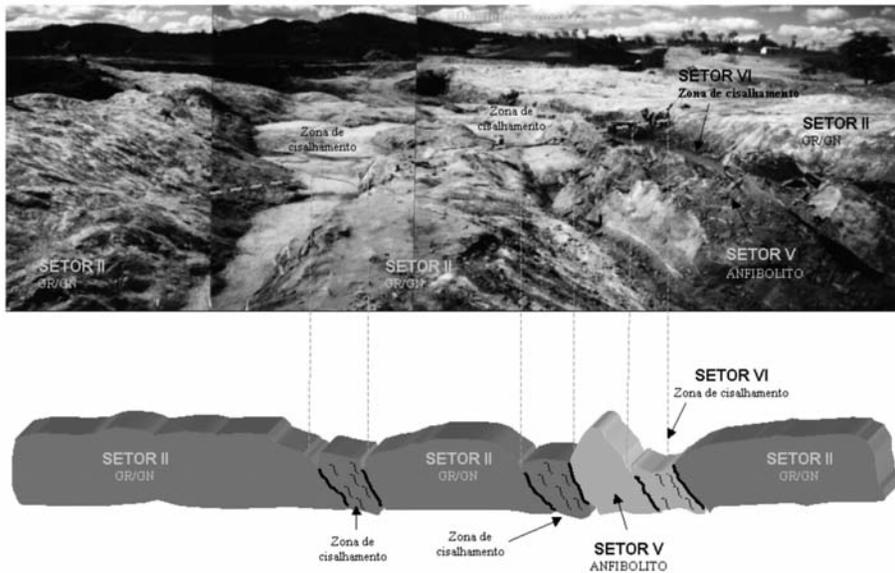
### 3.4 – Maciço da Margem Esquerda

Os cerca de 10.600m<sup>2</sup> de área mapeada do maciço da fundação dos espaldares de montante e jusante, apresentam três diferentes litologias, sendo duas de natureza gnáissica e uma de natureza anfibolítica. Neste contexto, o maciço foi compartimentado em sete setores distintos: o Setor I associa-se a área de ocorrência dos gnaisses bandados presentes entre as estacas E23 e E24+5; o Setor II engloba as áreas de ocorrência do granito-gnaiss pegmatítico; O Setor III representa a primeira zona de cisalhamento ocorrente no granito-gnaiss pegmatítico; O Setor IV representa a ocorrência da segunda zona de cisalhamento no maciço do granito-gnaiss pegmatítico; O Setor V corresponde a ocorrência da rocha anfibolítica; O Setor VI corresponde a Zona de Cisalhamento presente nos anfibolitos e o Setor VII associa-se a área de ocorrência dos gnaisses bandados, a partir da estaca E29 (Figuras 8 e 9).



**Fig. 8** – Maciço da margem esquerda. Notar a continuidade para jusante dos anfibolitos do Setor VI. Observar o expressivo controle estrutural e a ocorrência de água percolando no maciço.

Encaixado entre dois “bolsões” de gnaisses ocorrem rochas anfíbolíticas de coloração cinza escura bastante foliadas de direção N15° com mergulho relativamente raso variável de 40° a 35° para sudeste, ou seja para jusante. Os contatos entre os anfíbolitos e os gnaisses são de natureza estrutural delineando de forma precisa a descontinuidade litológica, tanto para montante quanto jusante do eixo. Cortando estas litologias ocorrem zonas de cisalhamento de direções principais N266° e N15° nos gnaisses, e N015° nos anfíbolitos, esta última caracterizando a expressiva zona de cisalhamento do Setor VI.



**Fig. 9** – Perfil esquemático da compartimentação do maciço da margem esquerda.

#### 4 – CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO NOS DIFERENTES SETORES

Apresenta-se neste item a classificação geomecânica dos diferentes setores estudados de acordo com os critérios das classificações de Bieniawski (1973) (Sistema RMR) e de Barton *et al.*, (1974) (Sistema Q). Ressalta-se que para cada um dos 42 setores (Tabela 1) foram levantados e analisados os dados referentes ao número de famílias de fraturas, sua geometria, espaçamento, persistência, abertura, preenchimento e rugosidade (JRC). Estes dados aliados a valores expeditos de resistência do maciço e grau de alteração, bem como, de valores de RQD retirados do cálculo do índice  $J_v$ , foram utilizados para completar os atributos utilizados nas tabelas das classificações geomecânicas.

Desta forma, o maciço da ombreira direita (Setores I-A, I-B e I-C) foi classificado como de qualidade boa a razoável, resultado de sua homogeneidade com relação a pouca ocorrência de descontinuidades persistentes e do espaçamento de seu fraturamento, compensando o estado inicial de alteração do maciço. Quanto ao Maciço do Canal da Tomada D’água, os setores I e III, respectivamente os trechos de ocorrência dos gnaisses bandados e dos granito-gnaisses pegmatíticos, obtiveram a mesma classificação de qualidade geomecânica tanto através do método "RMR" quanto pelo índice "Q", respectivamente, boa qualidade e qualidade regular para o maciço. O Setor II, apesar de estruturalmente fazer parte da ZCTD, apresentou, também, boa qualidade pelo método "RMR" e regular qualidade pelo índice "Q". Já o Setor IV, que representa a Zona de Cisalhamento do Canal da Tomada D’água, foi classificado como de qualidade ruim ou péssima pelos dois métodos. Assim,



**Fig. 10** – Trecho inundado devido a percolação no maciço anfíbolítico (E32 – E32+10; 40J). Notar o enclave do Setor III-B entre o maciço dos granito-gnaisses do Setro III-A.

o maciço rochoso do canal da tomada d'água apresenta boas qualidades geomecânicas. Porém, algumas estruturas nele impressas deverão ser tratadas de forma particular, pois possuem direções subparalelas ao canal e subperpendiculares ao eixo do barramento, que podem atribuir ao maciço direções e/ou caminhos preferenciais de percolação.

Quanto ao Maciço do Vertedouro, os setores associados aos gnaisses bandados e aos granito gnaisses foram classificados como de razoável a boa qualidade. Exceção ocorreu com o maciço anfíbolítico classificado como de qualidade razoável pelo método "RMR", e ruim a muito ruim pelo índice "Q" de Barton. Já os setores associados as zonas de cisalhamento, estes obtiveram a classificação do maciço de ruim a muito ruim pelos dois métodos.

Com relação ao maciço da margem esquerda, a compartimentação em sete trechos facilitou o entendimento e análise quanto a qualidade geomecânica. Os setores I, II, III e IV obtiveram a mesma classificação de qualidade geomecânica tanto através do método "RMR" quanto pelo índice "Q", respectivamente, boa qualidade e qualidade regular para o maciço. O Setor V apresentou qualidade regular pelo método "RMR" e de pobre qualidade pelo índice "Q". Já o Setor VI, que representa a zona de cisalhamento ocorrente nos anfíbolitos, foi classificado como de qualidade pobre pelos dois métodos. O Setor VII, devido principalmente a um aumento no grau de alteração intempérica apresentou qualidade regular pelos dois métodos. Assim, as diferenças litológicas entre os gnaisses e os anfíbolitos, associados a ação cisalhante de pelo menos duas zonas de falhas em seus contatos, promoveram a concepção de um modelo geológico-geotécnico embasado pela existência de um maciço resistente e estanque, representado pelas rochas gnaissicas, e outro de menor resistência mecânica e com ocorrência de exudação de água, representado pelos anfíbolitos. Ressalta-se que a resistência/coesão dos anfíbolitos tendem a aumentar em profundidade devido a diminuição do grau de alteração do maciço.

O Maciço da ombreira esquerda foi subdividido em dois setores o Setor III-A e o Setor III-B. O Setor III-A corresponde as áreas onde ocorrem a litologia dos granito-gnaisses, enquanto que no Setor III-B ocorrem os anfíbolitos. A exemplo de outros trechos mapeados a diferença entre as litologias refletem diferentes qualidades no maciço. O Setor III-A foi classificado como de qualidade razoável por todos os métodos, devido principalmente ao estado de alteração do maciço e a menores valores de RQD encontrados. Já os anfíbolitos repetem neste setor o seu baixo desempenho, agravado aqui pelo maior grau de alteração.

**Tabela 1** – Classificação dos diferentes setores mapeados.

Trecho	Setor	J <sub>v</sub>	RQD	Classe do Maciço	
				RMR	Q
Ombreira Direita	I-A	8	89	Razoável	Razoável
	I-B	7	92	Bom	Razoável
	I-C	12	75	Bom	Razoável
Tomada d'água	I	14	69	Bom	Razoável
	II	15	66	Bom	Razoável
	III	9	85	Bom	Razoável
	IV	100	25	Ruim	Ruim
Bloco 1	II-A1	12	75	Bom	Razoável
	II-A-B1	12	75	Bom	Razoável
	II-B-B1	11	79	Razoável	Ruim
	II-C-B1	20	49	Ruim	Ruim
	II-D-B1	4	100	Bom	Razoável
Bloco 2	II-A-B2	3	100	Bom	Razoável
	II-B-B2	10	82	Razoável	Ruim
	II-C-B2	20	49	Ruim	Ruim
Bloco 3	II-A-B3	3	100	Bom	Razoável
	II-B-B3	12	75	Razoável	Ruim
	II-C-B3	3	100	Bom	Razoável
Bloco 4	II-A-B4	3	100	Bom	Razoável
	II-D-B4	3	100	Bom	Razoável
Bloco 5	II-A-B5	3	100	Bom	Razoável
	II-D-B5	3	100	Bom	Razoável
Bloco 6	II-A-B6	3	100	Bom	Razoável
	II-D-B6	3	100	Bom	Razoável
Bloco 7	II-A-B7	3	100	Bom	Razoável
	II-B-B7	10	82	Razoável	Ruim
	II-D-B7	3	100	Bom	Razoável
Bloco 8	II-A-B8	3	100	Bom	Razoável
	II-D-B8	3	100	Bom	Razoável
Bloco 9	II-A-B9	3	100	Bom	Razoável
	II-B-B9	12	75	Razoável	Ruim
	II-D-B9	3	100	Bom	Razoável

**Tabela 1** – Classificação dos diferentes setores mapeados. (Cont.)

Trecho	Setor	$J_v$	RQD	Classe do Maciço	
				RMR	Q
Bloco 10	II-A-B10	3	100	Bom	Razoável
Margem Esquerda	I	3	100	Bom	Razoável
	II	7	92	Bom	Razoável
	III	12	75	Bom	Razoável
	IV	12	75	Bom	Razoável
	V	17	59	Razoável	Ruim
	VI	20	49	Ruim	Ruim
	VII	14	69	Razoável	Razoável
Ombreira Esquerda	III-A	16	62	Razoável	Razoável
	III-B	20	49	Ruim	Ruim

## 6 – CONCLUSÕES

Nos cerca de 30.000m<sup>2</sup> de área mapeada as três litologias principais, os gnaisses bandados, granito gnaisses e anfibolitos, ocorrem de forma intercalada com suas relações de contato predominantemente controladas por estruturas rúpteis. O maciço, de forma geral, apresenta-se sem alteração, a exceção natural da presença de rocha alterada dura nas ombreiras. Com relação as estruturas presentes, como esperado para maciços cristalinos arqueanos, ocorre uma trama de fraturas de pelo menos três famílias distintas, aliadas a foliação metamórfica bastante proeminente nos gnaisses bandados. Estes, quando entrecortados por zonas de cisalhamento promovem o aparecimento de anfibolitos bastante deformados e foliados que, do ponto de vista geotécnico, apresentam resistência mecânica inferior aos gnaisses. Tal fato é atestado em campo através de diferentes resistências a escavação. Outro fato relevante é a ocorrência de áreas alagadiças e úmidas sobre os anfibolitos atestando o potencial de percolação de fluidos, principalmente na zona de contato com maciços mais competentes a exemplo dos granito-gnaisses e gnaisses pegmatíticos. Quanto ao uso das classificações geomecânicas, estas mostraram-se bastante úteis no sentido de classificar os diferentes setores definidos pelo levantamento geológico geotécnico, bem como facilitar a representação e o entendimento para projetistas e construtores dos diferentes comportamentos do maciço rochoso, frente as solicitações impostas pelas obras de engenharia.

## 7 – AGRADECIMENTOS

O autor registra o seu agradecimento ao Eng. Marcílio Jorge (DM Construtora de Obras), Eng. Paulo Machado (Higesa Engenharia) e ao Geólogo Gilberto Mattos (CERB - Companhia de Engenharia Rural da Bahia) pelo apoio e pelas relevantes contribuições em campo para realização deste trabalho.

## 8 – REFERÊNCIAS

- Barton, N., Lien, R. Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* Vol. 6, n. 4, p.189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *The Civil Engineering South Africa.*, p.335-343.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978). “*Suggested Methods for the Quantitative Description of Rock Masses*” Tradução n.12 da ABGE, 1983.