

Escavações do Canal de Restituição e Túnel Adutor da Barragem de Jati no Estado do Ceará: Introdução do Critério de Estruturas Geológicas Complexas à Classificação Geomecânica

Kray Sadi de Mello

Geól. Prof. M.Sc, Roma-Estudos, Projetos e Supervisão Ltda (Consultor), Porto Alegre RS, Brasil, e mail: kray@romaprojetos.com.br

Alexandre de Sousa Fontenelle

Eng. Civil. Prof. D.Sc, Ministério da Integração Nacional, Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – PISF, Brejo Santo CE, Brasil, (88) 3531-1071, e mail: alexandre.fontenelle.mi@gmail.com

Fernando Sperotto Brum

Eng. Civil. Gestor de Contratos de Supervisão das Obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, Trecho II, Lote V. Magna Engenharia Ltda, Brejo Santo CE, Brasil, e mail: fernando.brum@magnaeng.com.br

Othilio Moura Filho

Eng. Civil. Coordenador de ATO, Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, Trecho II, Lote V. Magna Engenharia Ltda, Brejo Santo CE, Brasil, e mail: othilio.filho@magnaeng.com.br

Claudio Nehme Larivoir

Eng. Civil. Ministério da Integração Nacional, Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – PISF, Brejo Santo CE, Brasil, (88) 3531-1071, e mail: clarivoir@gmail.com

Fernando Carlos Albuquerque dos Santos

Eng. Civil. Ministério da Integração Nacional, Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – PISF, Brejo Santo CE, Brasil, (88) 3531-1071, e mail: fernando.carlos.mi@gmail.com

RESUMO: A barragem de Jati faz parte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional e apresenta duas escavações distintas com características geológicas e geomecânicas semelhantes, a do canal de restituição do vertedouro e as do emboque do túnel adutor projetado ligando a casa de força. O canal de restituição com 500 m de comprimento apresenta taludes na lateral direita e esquerda com alturas entre 10 e 27 m, em rochas metamórficas e foi alvo de detalhamento neste trabalho. A escavação do emboque do túnel também contém rochas metamórficas. Estudos geológico estrutural, petrográficos e geomecânicos incluindo ensaios de ruptura uniaxial, permitiram identificar zonas de alteração intempérica contendo saprólitos e diversos sistemas de fraturamento. Neste contexto estrutural estão presentes, falhas de cisalhamento preenchidas por cataclasitos alterados e dobras que quando escavadas, geram rupturas de flanco, muitas vezes isolando blocos de rocha instáveis nos taludes escavados. Adotando o conceito de planos de *slickensides* principais (PSP), foi possível a diferenciação necessária para identificação de

planos de *slickensides* que geram instabilidade e quedas dos blocos rochosos nos taludes do canal, conceito este aplicado apenas no trabalho que deu origem a este. Este trabalho associa métodos de classificação geomecânica, com geologia e conceitos de engenharia de rocha e mostra pelo seu conteúdo a importância do monitoramento visual nos processos de instabilidade causada por estruturas geológicas. Assim, oportuno se faz a introdução de outro conceito, o de estruturas geológicas complexas (EGC), que sem dúvida complementar os métodos de classificação geomecânica para taludes rochosos e emboque de túneis. Acredita-se com a continuidade deste trabalho que este conceito permitirá mostrar o porquê ocorrem certas adaptações e complementações nos tratamentos de estabilização e suporte dos maciços rochosos diretamente nas obras. Esta proposição está justificada no estudo geológico e geomecânico de detalhe que implicará ainda em redução de custos de tratamentos de taludes sem diminuir a eficiência, a partir da individualização das características do maciço rochoso ao longo das escavações. A aplicação este conceito permitirá registrar em que situações na natureza se justifica a sistematização dos tratamentos de taludes e em quais casos estes procedimentos não são necessários. Os sistemas de classificação geomecânica utilizados neste trabalho foram *RMR* (*rock mass ratio*), *SMR* (*slope mass ratio*), parâmetros do Sistema Q, GSI e *R_{Mi}*.

PALAVRAS-CHAVE: dobras; *slickensides*; geomecânica; *RMR*; *PSP*; *EGC*.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho é resultado do acompanhamento geológico-geotécnico em consultorias de assistência técnica às obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF). Estas resultaram em relatórios de estudos, interpretações e avaliação geológico-geotécnica das escavações da área de escoamento do vertedouro entre as estacas 4 e 25 do canal de restituição da Barragem de Jati, reproduzidos de forma resumida neste artigo.

Os acompanhamentos desta obra específica iniciaram em novembro de 2013 com previsão de término para dezembro deste ano. A Barragem de Jati está localizada a cerca de 1,6 quilômetros da cidade homônima no estado do Ceará com acesso pela rodovia CE 153 em direção a São José do Belmonte PE, figura 1. Esta importante obra é parte integrante do Trecho II no Eixo Norte, formado por um total de 5 trechos de obras. O Eixo Norte tem início com a captação no Rio São Francisco, após a Barragem de Sobradinho, no reservatório de Itaparica, nas proximidades da Ilha Assunção, próximo a Cabrobó PE. O Trecho II com 105,6 km de extensão inicia-se na barragem do reservatório de Jati, passando pelo açude já

existente de Atalho, atravessando outros 4 reservatórios, 3 aquedutos, um conjunto de diques, vinte pontes e 11 passarelas, passando por fim pela Serra do Cuncas pelos túneis Cuncas I e Cuncas II chegando no Estado da Paraíba.



Figura 1. Localização da Barragem de Jati no Estado do Ceará. Trecho II – Eixo Norte – Lote V-PISF

2 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DE JATI

Segundo dados de projeto, Consórcio *Hidroconsult-MWH* Brasil (2012), a barragem de Jati tem uma altura superior a 69,4 m de altura com cota de coroamento 488,80,

comprimento longitudinal 1.885 m e um reservatório com capacidade de armazenamento de 27,84 hm³ que recebe as águas de integração do Trecho I a uma vazão da ordem de 92,95 m³/s. O vertedouro tem 160 m de comprimento e cota da soleira a 487,15 com NA *Max* *Maximorum* 487,79, sendo estimada uma lâmina d'água de cerca de 0,64 m e, 1,73 m com 172 m³/s para vazões de 10.000 anos. O escoamento excedente da barragem ocorrerá por um canal de restituição ou canal de descarga, com cerca de 500 m de comprimento, localizado em planta por 25 estacas, com espaçamento de 20 metros. As escavações têm início no eixo da barragem na cota 481, estaca 0 do canal de restituição, até a cota 416 na estaca 25, figura 2. A conformação definida para o canal rápido é em desníveis sucessivos com média de 7 metros de altura entre eles em corte vertical, proporcionando uma velocidade de água de impacto em cada desnível da ordem de 11,7 m/s, Gomes (2014).

Figura 2. Planta de Situação do Projeto da Barragem de Jati. Modificado de Consórcio Hidroconsult-MWH do Brasil (2012). Planta1220-DES-1111-20-15-002.

As rochas presentes na fundação da barragem, nas escavações do canal de restituição e na casa de força, fazem parte do Grupo Cachoeirinha e encontram-se no domínio tectônico da Zona de Cisalhamento do Caboclo entre os lineamentos Patos e Pernambuco. Este conjunto estratigráfico e tectônico são parte integrante da Província Borborema, Schobbenhaus & Campos *in* CPRM (2008).

3.1 Mapeamento Geológico Estrutural

A partir do mapeamento geológico-estrutural das principais discontinuidades presentes nos maciços rochosos identificados, foram obtidas as atitudes (orientação e mergulho do plano) onde verificou-se que o *trend* principal das falhas de cisalhamento são NE/SW enquanto os sistemas de fraturas F1 são NW/SE. A determinação do cone de atrito, Hoek & Bray (1981) (*Friction Cone*) foi definida a partir dos planos das discontinuidades como mostra a figura 4a e 4b.

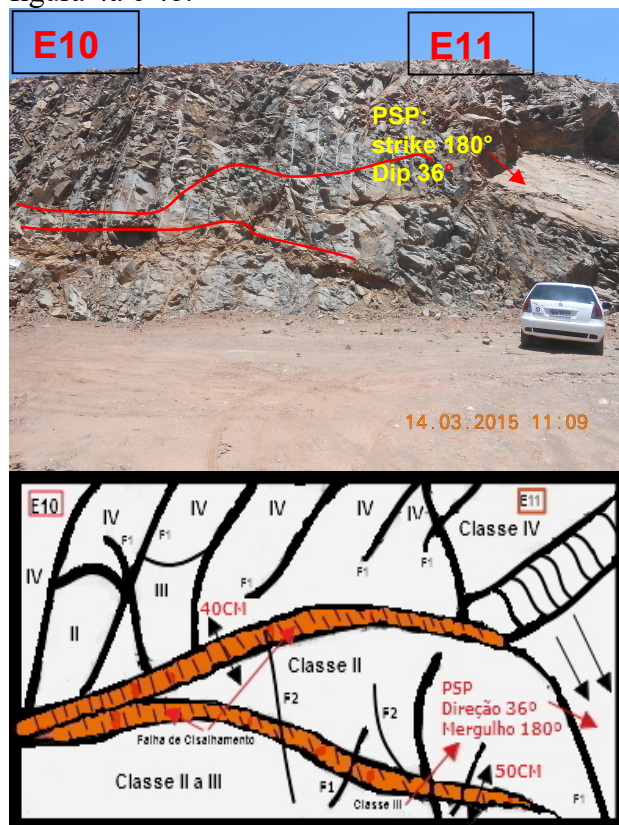


Figura 3a acima e 3b abaixo. Estruturas geológicas mapeadas entre as estacas 10 e 11 do Canal de Restituição. Talude Lado Esquerdo, com Planos de Falha de Cisalhamento denominados de Planos de *Slickensides* Principal (PSP). F1/F2 (planos de faturamento secundários formadores de cunhas de ruptura).

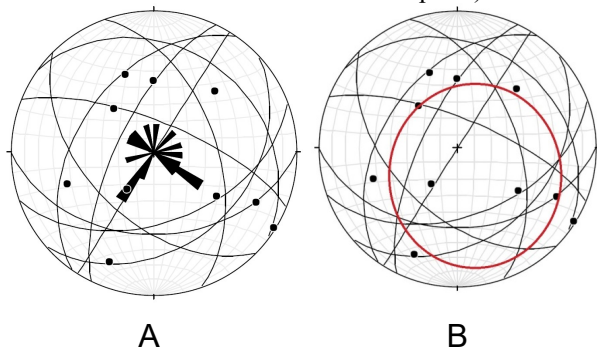


Figura 4a e 4b – Projeção estereográfica de *Schmidt-Lambert* (*Equal-area*). A: falhas e fraturas e Diagrama de Roseta. B: círculo indica o cone de atrito (*Stereonet*).

4 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E GEOMECÂNICA

A caracterização geotécnica e geomecânica foi desenvolvida considerando as variações litológicas a geologia estrutural, petrografia e métodos de classificação como **RMR** (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1978,1989 e 1993), **SMR** (*Slope Mass Rating*), de Romana M., Serón J.B. y Montalar E (2003), alguns dos parâmetros do **Q System**, de Barton et al (1974) e do **RMi** de Palmström (1982) in Hoek (2000). O maciço foi classificado conforme as características do material rochoso a partir do sistema RMR (*Rock Mass Rating System*, Bieniawski, 1989). Assim foram estimados os parâmetros para interpretação das classes geomecânicas das escavações, e segundo as orientações do ISRM (*International Society for Rock Mechanics* - 1983).



Figura 5 - Dobramentos ao Longo do Canal de Restituição. Estacas 6 e 7. Lado Esquerdo Hidráulico.



Figura 6 - Dobramentos ao Longo do Canal de Restituição. Estacas 11 a 12. Lado Esquerdo Hidráulico.

As rochas aflorantes nas fundações da barragem de Jati, escavações do canal de restituição e da área de implantação da casa de força, constituem uma miscelânea de rochas metamórficas típicas de cinturões de dobramentos, como metassiltitos, metarenitos, metavulcânicas, filitos, xistos e gnaisses (figuras 5 e 6). Encontram-se estruturas geológicas com características geotécnicas diversas como zonas de alteração e material saprolítico nas faces escavadas ou no interior das falhas, três ou quatro sistemas de fraturas (famílias), sendo dois identificados como principais: falhas de cisalhamento preenchidas por material cataclasado e dobramentos que quando escavados acabam por gerar grandes rupturas de flanco sob a forma de planos de *slickensides* principais (PSP), Mello *et al* (2015). O resultado deste estudo geológico e geomecânico levanta a questão de que outros dois planos de *slickensides* (critério de nomenclatura usado nos sistemas de classificação geomecânica, e.g. **RMR** e **Q System**) também estão presentes. Quando estes três planos se interceptam geram rupturas de grande porte e estas rupturas após ocorridas tendem a desencadear uma série de outras rupturas sucessivas aumentando os processos de instabilidade ao longo do tempo. A figura 7 e 8 mostra os parâmetros geomecânicos, algumas das estruturas geológicas identificadas em estudos de taludes rochosos e um exemplo de ruptura em cunha ocorrida no lado direito do canal cerca de um mês após o mapeamento de campo.

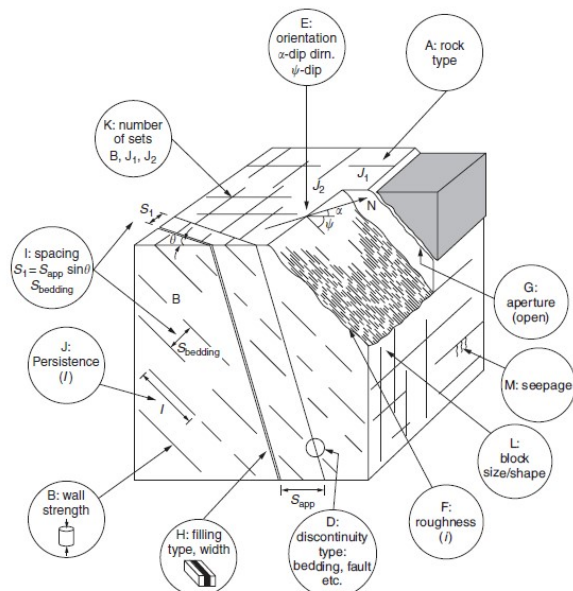


Figura 7 Bloco Diagrama mostrando os parâmetros e estruturas geológicas consideradas em um estudo de engenharia de taludes rochosos Wyllie (1999) in Wyllie & Mah (2005).

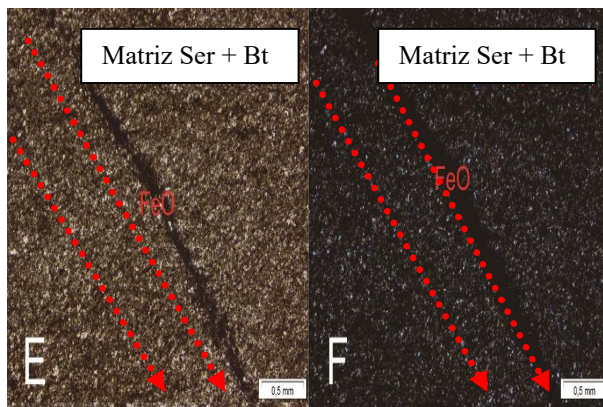


Figura 8 Ruptura em cunha nos taludes do lado Direito prestes a ocorrer. Foto obtida em novembro de 2013, Mello (2014). As rochas fragmentadas acima e o material saprolítico escorregou em dezembro de 2013.

4.1 Estudo Petrográfico e Interpretação das Microestruturas da Rocha

Complementarmente ao estudo geomecânico foi realizada a interpretação geológica estrutural e petrográfica das rochas escavadas o que revelou a escala dos fraturamentos no maciço rochoso em nível microscópico até a escala regional. Na análise microscópica realizada em 3 amostras de rocha, em uma amostra de metassiltito de estrutura maciça, esta apresentou em sua maioria textura de granulação fina a média. O tamanho dos cristais em sua maioria, são de tamanhos de 0,02 a até 0,5 mm com uma leve orientação. Quanto a mineralogia, a rocha é formada pelos seguintes percentuais de minerais identificados na lâmina de sigla TJ03: quartzo (55%); sericita (33 %); biotita (10%) e opacos (2%). As microfraturas e microfalhas no metassiltito ocorrem preenchidas ou não por óxido de ferro, observar a rocha em escala microscópica em luz natural e luz polarizada nas figuras 9E e 9F.

A identificação das microestruturas na rocha permitiu abordar o problema de forma mais ampla, podendo se constatar que por mais complexas que sejam as medidas adotadas para as contenções dos taludes, sempre poderão ocorrer reativações destas microestruturas por alívio de tensão enquanto os taludes estiverem expostos. Este tipo de comportamento vem sendo confirmado a partir de observações de fraturas de alívio que se formaram entre os meses de novembro de 2013 e março de 2015, com ocorrência de várias rupturas neste intervalo de tempo.



Figuras 9E e 9F. Fotomicrografia de metassiltito com presença de microfalhas (setas) preenchidas por óxido de ferro com menos de 0,1 mm de abertura. Foto E luz natural, Foto F luz polarizada. Ser (mineral sericita), Bt (mineral biotita), FeO (óxido de ferro).

4.2 Resistência a Compressão Uniaxial

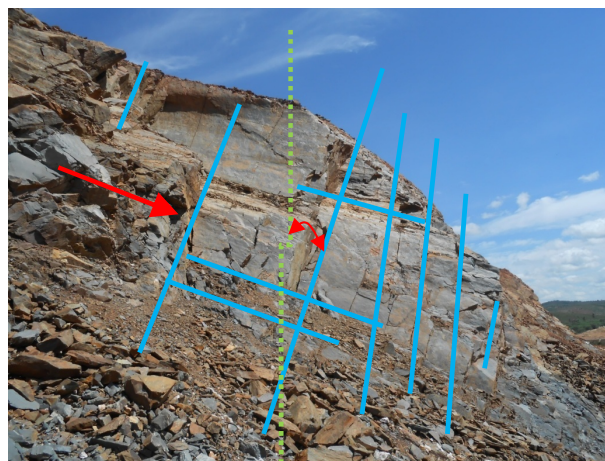
A resistência à compressão uniaxial da rocha (δc) é a máxima tensão que suporta um corpo cilíndrico ou cúbico quando submetido a um carregamento compressivo axial até a ruptura. A relação entre a altura e o diâmetro varia entre 2,5 a 3 vezes para corpos cilíndricos e mesma altura, comprimento e largura para corpos cúbicos.

A resistência a compressão uniaxial é um parâmetro amplamente utilizado nas diferentes teorias e modelos de comportamento de maciços rochosos. A determinação deste parâmetro foi obtida em laboratório a partir de amostras extraídas das escavações, implicando na preparação dos corpos de prova com forma cilíndrica em poucas amostras devido a dificuldade na obtenção de amostras de boa qualidade.

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial possibilitaram determinar o *índice de resistência* de diferentes tipos rochosos, o qual forneceu dados importantes para a classificação geomecânica do maciço. As amostras ensaiadas foram filitos, metassiltitos e metavulcânicos ou arenitos vulcanogênicos (segundo a petrografia), as quais apresentaram baixa resistência a compressão e baixa resistência ao cisalhamento entre blocos (inferência a partir da razão J_r/J_a . Barton, 1974 in Hoek (2000)). As resistências a compressão uniaxial encontradas foram 2,4 MPa, 3,7 MPa e 62,59 MPa características de rocha muito ruim a branda.

4.3 Resultados da Classificação Geomecânica

Os resultados apresentaram a classificação geomecânica destas formações rochosas e o resultado destas formações rochosas utilizando métodos de classificação de maciços rochosos como RMR, SMR, Q System e RMi que permitiram adequações aos elementos de projeto como ancoragens. O RMR foi convertido para SMR, específico para avaliação de taludes e utilizado em conjunto com o RMR, Mello & Dias (2006). O método SMR considera ainda a possibilidade de instabilidade em taludes rochosos, através de processo de deslizamento planar, cunha ou tombamento de blocos (*planar failure*, *wedge failures*, *topping failures*), condicionados por elementos estruturais, tais como: juntas, fraturas, falhas e descontinuidades presentes na massa rochosa, figura 10. A partir da classificação de Bieniawski, o RMR foi adaptado para descrever a classificação em função das condições geométricas dos taludes, sendo calculado a partir da equação $SMR = [RMR - (F1 \times F2 \times F3)] + F4$, conforme Romana *et al* (2003). A partir das transformações foram calculados os valores de SMR relativo as áreas de mapeamento já escavadas do canal de restituição do vertedouro determinando-se os valores de SMR das paredes rochosas dos taludes, tabelas 1 e 2.



Figuras 10 Rupturas do tipo *topping failure*. no Lado Esquerdo do Canal do Vertedouro.

Tabela 1. Índices obtidos para o RMR (*Rock Mass Rating*)

Estaca Inicial	Estaca Final	RMR Valores	Classes RMR	Qualidade
4LD	6LD	38	IV	Ruim
4LE	6LE	47	III	Regular
6LD	8LD	38	IV	Ruim
6LE	8LE	47	III	Regular
8LE	9LE	42	III	Regular
8LD	9LD	42	III	Regular
9LD	10LD	42	III	Regular
9LE	10LE	42	III	Regular
10LD	13LD	38	IV	Ruim
10LE	11LE	32	IV	Ruim
11LE	13LE	38	IV	Ruim
13LE	14LE	38	IV	Ruim
14LE	15+10LE	18	V	Muito ruim
15LE	17LE	32	IV	Ruim
13LD	18LD	41	III	Regular
18LD	22LD	49	III	Regular
17LE	22LE	49	III	Regular
23LE	25LE	46	III	Regular
22LD	25LD	46	III	Regular

Tabela 2. Transformação do RMR (*Rock Mass Rating*) para SMR (*Slope Mass Rating*).

Estaca Inicial	Estaca Final	SMR Valores	Classes SMR	Qualidade
4LD	6LD	30	IV	Ruim
4LE	6LE	39	IV	Ruim
6LD	8LD	30	IV	Ruim
6LE	8LE	39	IV	Ruim
8LE	9LE	34	IV	Ruim
8LD	9LD	34	IV	Ruim
9LD	10LD	34	IV	Ruim
9LE	10LE	34	IV	Ruim
10LD	13LD	30	IV	Ruim
10LE	11LE	24	IV	Ruim
11LE	13LE	30	IV	Ruim
13LE	14LE	30	IV	Ruim
14LE	15+10LE	10	V	MuitoRuim
15+10LE	17LE	24	IV	Ruim
13LD	18LD	33	IV	Ruim
18LD	22LD	41	III	Regular
17LE	22LE	41	III	Regular
23LE	25LE	38	IV	Ruim
22LD	25LD	38	IV	Ruim

5 EMBOQUE DO TÚNEL ADUTOR DA BARRAGEM DE JATI, GEOLOGICA E GEOMECÂNICA

No emboque do túnel adutor a rocha foi identificada como sendo de grau e textura metamórfica entre o filito e o xisto, com diversas fraturas e com inclinação oblíqua ao túnel, porções de rocha alterada (RMR-Classe

V) em meio a rocha de qualidade um pouco melhor (RMR-Classe IV), falhas preenchidas por cataclasito, zona de cisalhamento e dobramentos nos dois taludes laterais do emboque, figura 11.

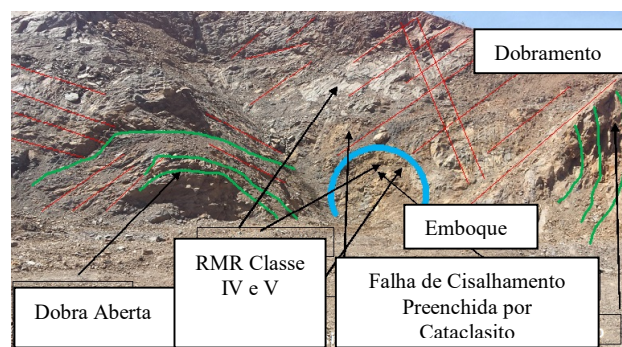


Figura 11 - Diversidade de Estruturas Geológicas identificadas em um mesmo local da obra. Baseado nestas condições geológicas e geomecânicas denominou-se este conjunto de Estruturas geológicas complexas (EGC).

6 CONCLUSÕES

Os dados petrográficos e ensaios de compressão uniaxial nas amostras coletadas mostraram que a complexidade das estruturas iniciam nas microestruturas das rochas.

Quanto aos planos de *slickensides* na área do canal de restituição, foram identificados três planos distintos, sendo um deles denominado como Plano de *Slickenside* Principal (PSP). Em uma abordagem especificamente geológica seria o único plano com características de espelho de falha ao longo do qual ocorrem os escorregamentos e rupturas, de forma que justifica a aplicação do conceito acima e o compromisso profissional investigar de onde virá o problema.

O trabalho apresentado resgata também a importância do mapeamento geológico-geotécnico com destaque para as inspeções visuais dos processos de ruptura e de elementos que potencializam essas rupturas como planos de *slickensides*, juntas, fraturas, falhas, zonas de cisalhamento e alteração e por fim dobramentos.

Enfatiza-se aqui o papel dos dobramentos, praticamente nulos nos sistemas de

classificação geomecânica e exemplos de diversas causas de rupturas, como no exemplo mencionado das rupturas de flanco de dobras.

A primeira vista, estes conceitos parecem um pouco difícil de associar com o trabalho apresentado. Porém, não se pode negar a série de elementos geológico estruturais e terminologias ausentes hoje nos métodos de classificação geomecânica.

Ao trazer a interpretação dos dados obtidos nas escavações do canal do vertedouro e da casa de força da barragem de Jati para este enfoque, podemos entender como pode ser possível a distribuições das ancoragens de maneira não sistemática e em que casos a sistematização é justificada. Este é o motivo da aplicação do conceito de “Estruturas Geológicas Complexas” (EGC) nas Classificações Geomecânicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Integração Nacional pelo suporte oferecido, acesso aos relatórios e dados de projeto e consultorias e apoio na elaboração e divulgação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Barton et al (1974) in Hoek E. (2000) - *Rock Engineering*. Free on-line book available at the Hoek's Corner.

Bieniawski, Z.T. (1978) - *Determining Rock Mass Deformability - Experience From Case Histories*. International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics. Abs., 15, 237-247.

Bieniawski, Z.T (1989) – *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley, p.251.

Bieniawski, Z.T (1993) – *Classification of rock Masses for Engineering: the RMR System and Future Trends*. In: Comprehensive Rock Engineering, Hudson J.A. (ed.), Pergamon Press, Vol. 3, 553-573.

Consórcio Hidroconsult – MWH Brasil (2012). Relatório 1220-REL-1101-20-04-001. Revisão 11. *Relatório Final do Projeto Executivo das Barragens*, vol. 1, Setembro/2012. Planta 1220-DES-1111-20-15-002. Ministério da Integração Nacional.

Gomes. J. F (2014). *Parecer – Relatório de Avaliação do Projeto da Barragem de Jati WBS-111*. 1534-REL-1100-20-04-002-R00. Abril de 2014. Magna Engenharia Ltda. Ministério da Integração Nacional.

Hoek, E and Bray, J.W (1981) – *Rock Slope Engineering*, 3rd Edition, Spon Press, New York 402 pages.

Hoek E. (2000) - *Rock Engineering*. Free on-line book available at the Hoek's Corner.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (1978). *Tradução nº 12 da ABGE*, 1983.

Medeiros. V. C & Jardim de Sá E. F.- *O Grupo Cachoeirinha (Zona Transversal, NE do Brasil) Redefinição e Proposta de Formalização*. Revista de Geologia da Universidade Federal do Ceará Vol. 22, nº 2, 124-136, 2009.

Mello. K. S. & Dias R. A. 2006. *Mapeamento geológico-geotécnico e caracterização geomecânica das fundações dos pilares do viaduto da Reversão. Projetos de Reforço e Suporte das Fundações dos Pilares P-04 do Viaduto de Descida*. Construtora Gaúcha. Itati RS. Projeto Complementar para Execução do Viaduto da Reversão RS 486, Variante Ambiental. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem DAER.

Mello. K. S; Fontenelle. A. S; Larivoir. C. N; Santos. F. C. A. 2015. *Estudo Geológico-Geotécnico das Escavações do Canal de Restituição da Barragem de Jati CE: Estruturas Geológicas Condicionantes das Rupturas de Talude - Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) – Eixo Norte, Trecho II, Lote V*. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Bento Gonçalves RS, outubro 2015.

Palmström A. (1982) in Hoek E. (2000) - *Rock Engineering*. Free on-line book available at the Hoek's Corner.

Romana M., Serón J.B. y Montalar E (2003). *SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation* ISRM –Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.

Schobbenhaus & Campos (1984) in: *Geologia da Folha Itatira*. SB.24.V-B-V. CPRM (2008). Programa Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos Básicos.

Trompette, R. (1994) *Geology of Western Gondwana, Pan African-Brasiliano aggregation of South America and Africa*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. 350 pages.

Wyllie, D. C. and Mah, C.W. 2005. *Rock Slope Engineering, Civil and Mining* 4TD Edition, Taylor and Francis, London, UK, 431 pp.