

BARRAGEM DE PORCOS, BREJO SANTO CE, TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO: INSTABILIDADE GERADA NAS FUNDAÇÕES POR CAMADAS DE SILTITO - FALHAS GEOLÓGICAS ABERTAS EM ARENITOS NO EIXO E JUNTO AO ENCONTRO DA OMBREIRA ESQUERDA

PORCOS DAM, BREJO SANTO CE, BRAZIL, TRANSPASS OF THE SAN FRANCISCO RIVER: INSTABILITY GENERATED IN FOUNDATIONS BY SILTITE LAYERS - GEOLOGICAL FAULTS OPENED IN ARENITOS IN THE AXIS AND NEXT TO THE LEFT SHOULDER

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

Cruz, Paulo, Prof. Ph D. Eng. Civil. Consultor de Barragens, São Paulo SP, Brasil, e mail: ptcruz@terra.com.br

Fontenelle, Alexandre. Prof. D.Sc, Eng. Civil. Prof. Ministério da Integração Nacional, Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – PISF, Brejo Santo CE, Brasil, email: alexandre.fontenelle.mi@gmail.com

Brum, Fernando, Eng. Civil. Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, Magna Engenharia Ltda, Brejo Santo CE, Brasil, e mail: fernando.brum@magnaeng.com.br

RESUMO

A barragem de Porcos é uma das obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, possui 1,38 km de extensão e altura de 35 m da fundação até a crista do vertedouro. Apresenta dois problemas geológico-geotécnicos distintos, primeiramente a presença de camadas de siltito intercalada com arenitos que constituem as rochas de fundação. A presença de siltito como preocupação geológica em fundação de barragens ocorre em outras barragens brasileiras, motivo pelo qual os autores trazem como exemplo as fundações da barragem de Porcos. O trabalho de engenharia geológica está fundamentado em mapeamento geológico-geotécnico com especial atenção à geologia estrutural associada a classificação geomecânica do maciço de fundação. Este trabalho foi fundamental para o estudo de estabilidade dos blocos de concreto do vertedouro. O mapeamento geológico estrutural possibilitou identificar e representar as diversas famílias de fraturas e falhas interpretadas e reconhecidas pelos autores como de natureza erosiva do tipo fluvial. No trecho da barragem de terra os principais problemas de fundações foram a presença de cascalhos inconsolidados abaixo da camada de sedimento aluvionar fino (paleocanais) e falhamentos geológicos ortogonais ao eixo da barragem. Estas falhas foram mencionadas pela primeira vez em fundações de barragem pelos autores e sua gênese interpretada como falhamentos provocados por circulação de fluxo fluvial em alta velocidade. Outro problema são as intercalações de siltito nos arenitos contendo argilominerais que quando saturados formam superfícies lubrificadas suscetíveis a escorregamentos e que apontam para possíveis rupturas do maciço rochoso a jusante da barragem.

ABSTRACT

The Porcos Dam is one of the constructions of the Integration Project of the São Francisco River with the Northern Northeast Basins. It is 1.38 Km long and 35 m high from the foundation to the crest of the spillway. There are two distinct geological-geotechnical problems, first the presence of siltite interbedded with sandstones in the foundation rocks. The presence of siltite as a geological concern in the foundation of dams occurs in other dams, and the Porcos dam is a good example. The search geological engineering developed was based on geological-geotechnical mapping with special attention to the structural geology associated to the geomechanical classification. The foundation followed by a additional study of the stability of the concrete blocks of the spillway. The structural geological mapping made it possible to identify and represent the various families of fractures and faults interpreted and recognized by the authors as of an erosive nature and fluvial origin. In the earth dam the main problems of foundations were the presence of gravels below fine alluvial sediment (paleo channels) and geological faults orthogonal to the axis of the dam. These failures were mentioned for the first time in dam foundations by

the authors and their genesis interpreted as failures by fluvial origin. The intervention in the project with greater cost was due to the presence of siltite interbedded with sandstone containing clay minerals that when saturated form slides surfaces susceptible to possible ruptures of the rock foundation downstream of the dam.

KEY WORDS: foundations, dam, siltite, geological faults, clay minerals

1 - INTRODUÇÃO

Os estudos na barragem de Porcos são resultados de trabalhos de consultoria, supervisão e fiscalização em construção de barragens, desenvolvidos pela equipe de fiscalização do PISF, supervisão de obras e consultoria. Entre os trabalhos desenvolvidos estão a identificação das principais estruturas geológicas e problemas geotécnicos associados às lentes de siltite entre camadas de arenito fluvial. Estas duas situações representam planos de fraqueza na fundação da barragem indesejáveis para o assentamento de estruturas de concreto e maciços de terra.

A barragem recebe este nome devido ao riacho dos Porcos o qual será represado pelo barramento. Com uma extensão de 1.379 m entre a ombreira direita e esquerda apresenta ainda um trecho de 400 m referente ao dique de Porcos (ponto de fuga após a estaca 20 do eixo de barramento). Está localizada a 18,2 km do município de Brejo Santo no estado do Ceará e faz parte do Lote V, Trecho II do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, figura 1.



Figura 1. Localização da Barragem de Porcos no Estado do Ceará.

2 - CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DE PORCOS

A barragem de Porcos apresenta um volume de aterro compactado da ordem de $1.309.425 \text{ m}^3$ e área do reservatório com $8,2 \text{ km}^2$, com uma seção homogênea e bermas de equilíbrio a montante e jusante. O vertedouro é livre com 334 m, que permitirá o vertimento para período de retorno de 1.000 anos igual a $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$, em uma bacia de dissipação e uma tomada de água para aduzir a vazão de $7,3 \text{ m}^3/\text{s}$, em duas válvulas dispersoras de 0,70 m de diâmetro. Também tem uma estrutura de controle que permitirá aduzir a vazão de $85,13 \text{ m}^3/\text{s}$ para o reservatório de Cana Brava. Esta estrutura consta de três comportas tipo segmento, vão de 3,10 m, altura 4,67 m e 5,80 m de raio. Os níveis de água operacionais do reservatório são: NA normal 401,46 m; NA mínimo 399,25 m e NA *Max Maximorum* 404,46 m, figura 2.

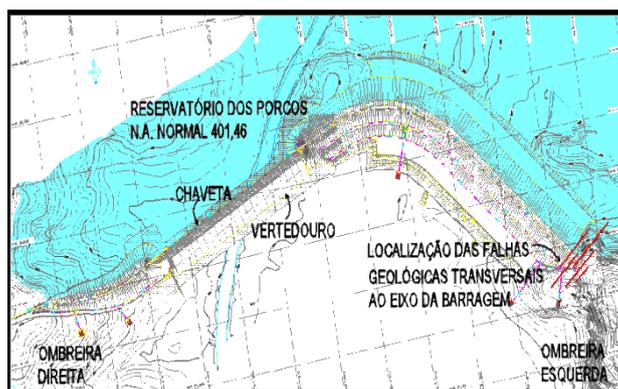


Figura 2. Planta de Arranjo Geral do Projeto da Barragem de Porcos. Modificado de Consórcio Hidroconsult-MWH do Brasil (2012). Planta1220-DES-1113-20-15-001. R04.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

As rochas de fundação na área da construção do vertedouro da barragem de Porcos geologicamente são pertencentes à Formação Mauriti, base da coluna sedimentar da Bacia do Araripe.

Nesta formação estão presentes arenitos finos a médios, siltitos e arenitos conglomeráticos. As principais estruturas geológicas presentes na fundação tanto nos arenitos como nos siltitos foram mapeadas em blocos individualizados, sempre observando os planos de fraqueza da rocha que demonstrassem riscos à fundação. Em uma segunda etapa dos trabalhos foram executados ensaios de compressão uniaxial em amostras de rocha das fundações do vertedouro da barragem, as quais foram coletadas a partir de blocos de rocha representativas dos arenitos e do siltito. Estes ensaios têm por objetivo manter o critério aplicado pelos autores em que parâmetros utilizados a partir de ensaios geotécnicos, representam melhor a situação da rocha *in loco*, trazendo uma maior segurança ao mapeamento e a classificação geomecânica para escavações de fundações. É importante lembrar que estudos de estabilidade dos blocos do vertedouro levam em conta estes parâmetros.

Os resultados obtidos nos ensaios solicitados pelos autores forneceram dados importantes para a classificação geomecânica executada no maciço escavado do vertedouro, além de servirem como parâmetros próximos da condição real das rochas de fundação, para os estudos de estabilidade dos blocos do vertedouro pela projetista.

A análise da fundação a primeira vista indicou que nos estudos realizados nas rochas associadas a estas descontinuidades quando submetidas a tensões resultantes das cargas oferecidas pelo maciço de concreto e do empuxo provocado pelo reservatório da barragem deveriam ser analisadas a partir das atitudes obtidas no mapeamento estrutural. Outro aspecto é com relação ao resultado das direções e mergulhos de estruturas que interceptam os planos principais de acamamento das rochas que poderiam refletir em possíveis rupturas do maciço a jusante da barragem o que colocariam em risco as estruturas de concreto dos blocos hidráulicos.

3.1 Mapeamento geológico estrutural e classificação geomecânica dos blocos 13, 14 e 15

Nos blocos 13, 14 e 15 foram identificadas rochas do tipo arenitos médios maciços com estratificação cruzada e intercalações de siltitos laminares. Na região com predomínio de siltito (parte da área dos blocos do vertedouro), foi recomendada a remoção por escavação por representarem rochas desfavoráveis ao assentamento de estruturas de concreto. A maior preocupação neste caso é quanto a tensões verticais exercidas pelas estruturas de concreto sobre as rochas de fundação. Estas, quando somadas aos empuxos elevados no paramento de montante do vertedouro podem gerar rupturas de blocos de fundação por cisalhamento a jusante, colocando em risco a estabilidade da barragem.

Caso esta situação viesse a se confirmar, os esforços seriam transmitidos a estas rochas no momento do enchimento do reservatório, o que poderia provocar rupturas em planos preferenciais de acamamento e fraturamentos tanto no siltito como no arenito, Mello et al (2016/2017), figura 3.



Figura 3. Rochas de fundação do vertedouro na área dos Blocos 13, 14, 15 e parte do bloco 16. Siltito que foi removido da fundação após o mapeamento geológico-geotécnico.

As descontinuidades nestes blocos apresentam orientação espacial com direção e mergulho desfavorável podendo gerar blocos apoiados sobre planos de *slickensides* que neste caso seriam formados por falhas geradas no contato entre as camadas de siltito e arenito, oferecendo pouca resistência ao cisalhamento. Nestas rochas também estão presentes três famílias principais de fraturamento, denominadas de F1, F2 e F3. Estas apresentam direções horizontal, vertical e inclinada respectivamente. Abaixo seguem as atitudes deste sistema de fraturamento que podem estar presentes também no arenito, lançadas em estereograma na figura 4. F1 - Direção 60° - Mergulho 0° (estão associadas ao fraturamento horizontal); F2 - Direção 335° - Mergulho 75° (estão associadas ao fraturamento vertical); F3 - Direção 292° - Mergulho 24° (estão associadas ao fraturamento inclinado, figura 5).

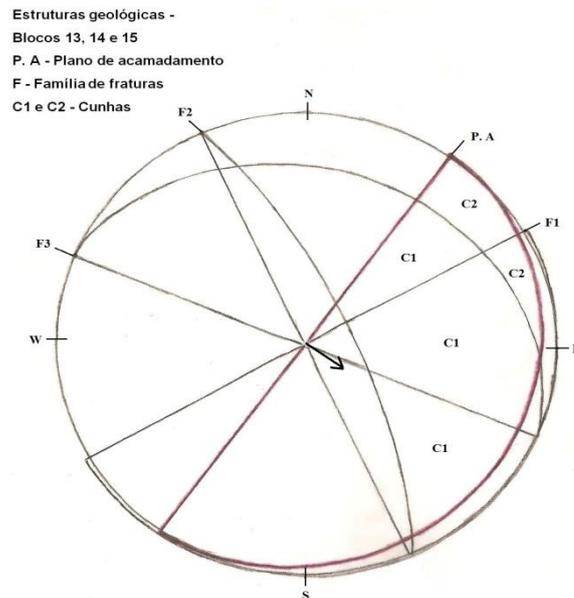


Figura 4. Estruturas geológicas identificadas na fundação do vertedouro nos blocos 13, 14 e 15 lançadas em rede estereográfica de Schimidt.



Figura 5. Sistema de fraturas considerado crítico para a barragem, família F3 encontrada nas camadas de siltito com penetração nas camadas de arenito.

3.2 Mapeamento geológico estrutural dos blocos 16, 17 e 18

Nesta região da fundação do vertedouro representativa dos Blocos 16, 17 e 18 estão presentes rochas do tipo arenitos de cor cinza claro, cinza esbranquiçado e cinza levemente amarelado, com granulometria fina, média e grossa. Estas rochas apresentam geometria lenticular com estratificação cruzada de pequeno porte, figura 6. A partir do mapeamento geológico estrutural foi identificado o plano principal de acamadamento do pacote rochoso com direção 28° e Mergulho de 9°, coincidente com o plano de fraturamento F1.



Figura 6. Estratificação cruzada com presença de areia grossa mal selecionada típica de fácies fluvial.

As discontinuidades apresentam orientação espacial com direção e mergulho desfavorável podendo gerar blocos localizados de *slickensides*, de menor risco do que nos blocos 13 a 15 por estarem associados ao arenito com maior resistência ao cisalhamento. Nestas rochas também estão presentes três famílias principais de fraturamento, denominadas de F1, F2 e F3. Estas apresentam direções horizontal, vertical e inclinada respectivamente, figuras 7a e 7b. No Quadro 1 são apresentadas as principais atitudes do sistema de faturamento e na figura 8 é possível observar as estruturas em rede estereográfica de Schimidt com representação espacial destas estruturas: F1 - Direção 28° Mergulho 9° (estão associadas ao fraturamento horizontal e coincidem com o plano de acamadamento - PA); F2 - Direção 242° - Mergulho 79° (estão associadas aos fraturamentos, horizontal e vertical); F3 - Direção 332° - Mergulho 79° (estão associadas ao fraturamento horizontal e vertical).

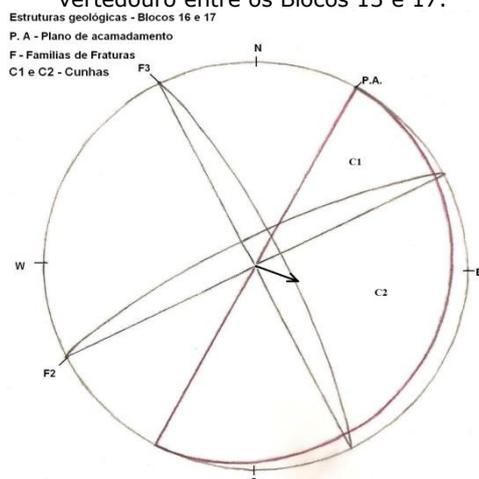
Quadro 1. Atitudes das Estruturas Rochosas

Blocos	Tipo	Direção	Mergulho
13 a 15	F1	60°	0°
13 a 15	F2	335°	75°
13 a 15	F3	292°	24°
16 a 18	F1	28°	9°
16 a 18	F2	242°	79°
18 a 20	F1	28°	9°
18 a 20	F2	249°	78°

18 a 20	F3	254°	90°
24	PA	29°	15°
24	PCS1	358°	90°
24	PCS2	272°	90°
25	PA	32°	21°



Figuras 7a (acima) e 7b (abaixo) – Famílias de Fraturas F2 (a) e F3 (b) identificadas no arenito da fundação do vertedouro entre os Blocos 13 e 17.



7

Figura 8. Estruturas geológicas identificadas na fundação do vertedouro nos blocos 16 e 17. A seta indica a direção do mergulho principal de acamadamento e em C1 e C2 a visualização das cunhas de ruptura.

3.3 Mapeamento geológico estrutural dos blocos 18, 19 e 20

Arenitos de cor cinza claro, cinza esbranquiçado e cinza levemente amarelado, com granulometria fina e média a grossa com estratificação cruzada de pequeno porte e com regiões específicas da fundação indicando possível zona de cisalhamento, figura 9. Também foram encontradas falhas abertas na fundação entre os blocos 18 e 20, com até 40 cm de espaçamento, preenchidas por material aluvionar do tipo seixos e areia grossa.

Os indicadores cinemáticos estruturais encontrados entre os blocos 18 e 20 sugerem movimentação tectônica e feições de metamorfismo foram identificadas através de pares "S" e "C", figura 10.

Estas falhas têm as mesmas características das que foram encontradas na ombreira esquerda da barragem de Porcos, representando erosão fluvial da superfície rochosa em planos de fraqueza (tectônica anterior) que foram preenchidos por material de granulometria mais grosseira (seixos e grânulos) em um período que o clima e a paisagem da região eram diferentes do atual, Mello et al (2016/2017), figura 11.



Figura 9 – Zona de Cisalhamento mapeada na escavação da chaveta. A detecção destas feições metamórficas e estrutural gera blocos com séries diversas de fraturamento, podendo estar acompanhadas por falhas geológicas.



Figura 10 – Formação de Pares "S" e "C" em protomilonito gerado no contato do arenito na Zona de Falha.

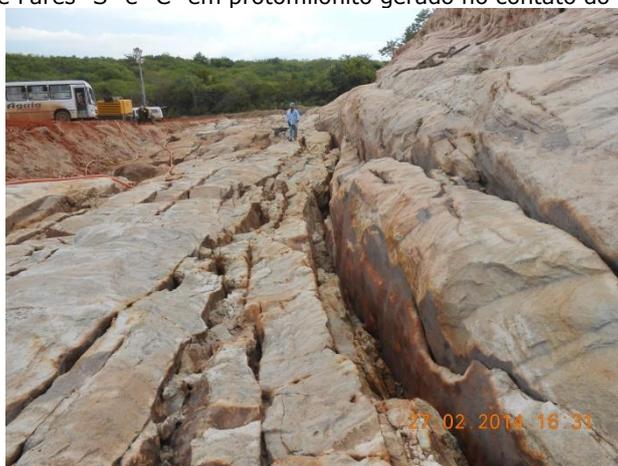


Figura 11 – Falhas geológicas causadas por erosão em planos de fraqueza da rocha, área interpretada pelos autores como associada a antiga cachoeira. Fundação no contato do maciço de terra com a ombreira esquerda, Mello et al 2016.

Nestas rochas também estão presentes três famílias principais de fraturamento, denominadas de F1, F2 e F3. Estas apresentam direções horizontal, vertical e inclinada respectivamente. As principais atitudes do sistema de faturamento são: F1 - Direção: 28° - Mergulho 9° (estão associadas ao fraturamento horizontal e coincidem com o plano de acamadamento - PA); F2 - Direção: 249° - Mergulho 78° (estão associadas à fraturamento, horizontal e vertical). Esta direção coincide também com a direção das falhas encontradas na figura 12; F3 - Direção: 354° - Mergulho 90° (estão associadas à fraturamento horizontal e vertical).



Figura 12 Vista das Falhas geradas por processos erosivos, mapeadas ao longo dos blocos 18, 19 e 20, no sentido longitudinal ao eixo. Superfície da escavação do vertedouro na cota da fundação de projeto.

3.4 Mapeamento geológico estrutural dos blocos 26 e 27

A descrição do levantamento de detalhe entre os blocos 20 e 25 não será possível transcrever neste trabalho devido ao volume de informações. Assim, são descritos os dois últimos blocos referentes à fundação do vertedouro.

A jusante do bloco 24 na área da bacia de dissipação identificou-se novamente os siltitos, mapeados com ênfase na geologia estrutural, figura 13.



Figura 13 – Mapeamento geológico estrutural de rochas do tipo siltito na fundação da barragem na área da bacia de dissipação, jusante do Bloco 24.

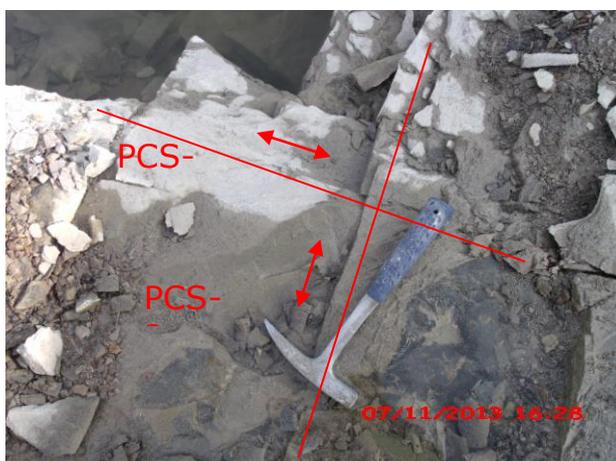


Figura 14 Detalhe da presença de pares conjugados (PCS), nos siltitos a jusante do Bloco 24. Área da Bacia de Dissipação.

As leituras estruturais no siltito a jusante do bloco 24 indicaram (figura 13): Plano de Acamadamento (PA), Direção: 29° - Mergulho 15°, figura 11; PCS₁ – Direção 358° e mergulho

subvertical; PCS₂- Direção 272° e mergulho subvertical, figura 14. O Plano de Acamadamento do siltito a jusante do bloco 25 apresenta Direção: 32° e Mergulho 21°. As áreas dos blocos 26 e 27 no momento da inspeção e mapeamento das fundações já apresentavam as primeiras camadas de concreto para a execução do vertedouro.



Figura 15 Área do Bloco 27, concretada para início da construção.

A jusante do bloco 27 na área da bacia de dissipação encontraram-se siltitos abaixo da camada de arenito, nos quais foram medidas as espessuras, direção e mergulho do plano de acamadamento, que podem condicionar a rupturas de blocos rochosos de fundação a jusante da barragem figuras 15, 16 e 17.



Figura 16 Jusante da Área do Bloco 27, espessura da camada de siltito 0,53 m, acima camada de arenito com 1,10 m de espessura.



Figura 17 Plano de acamadamento do siltito na base do arenito a jusante Bloco 27

5 - ENSAIOS DE RUPTURA UNIAXIAL EM ROCHAS DO VERTEDOURO DA BARRAGEM

Para obtenção de parâmetros fidedignos para a classificação geomecânica, Mello et al (2015) e, para as análises de estabilidade é importante a realização de ensaios de ruptura de das amostras de rocha da fundação em laboratório. Para isto foram selecionadas amostras de arenitos de granulometrias e diversas, incluindo blocos de siltitos intercalados aos arenitos. As amostras selecionadas foram

identificadas pela letra C (corpo de prova) conforme identificação abaixo:

- C1: siltito, não ensaiado devido a fragmentação no momento da extração com a serra copo. Em outro ensaio realizado na obra, o siltito apresentou resistência à compressão uniaxial de 4,33 MPa.

A amostra C4 também representa um arenito de granulometria grosseira e o resultado da resistência à compressão simples foi de 5,88 MPa. Na amostra C3 (arenito maciço), foi possível a realização de três ensaios de ruptura, C3A (5,95 MPa), C3B (4,94 MPa) e C3C (5,51 MPa), corroborando os resultados do ensaio da amostra C4. Na amostra C5 o arenito contém lentes de siltito. A resistência da rocha a partir desta amostra apresentou valores anômalos aos obtidos na maioria dos ensaios, 49,53 MPa, na amostra C5B, devendo ser utilizado com ressalvas. A amostra C6 representando um arenito com granulometria fina, apresentou resistência a ruptura de 6,94 MPa.

6 - SOLUÇÃO DE ENGENHARIA

Avaliada as características das rochas de fundação partiu-se para as análises de estabilidade dos blocos de concreto junto a fundação que resultou em um redimensionamento das estruturas do vertedouro e muro de abraço, inserindo uma chaveta com intuito de garantir a estabilidade da estrutura quanto ao deslizamento, figura 18.

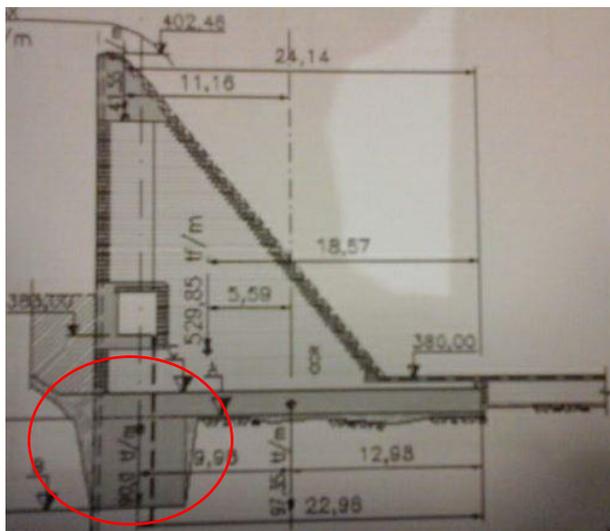


Figura 18 Estudo de Concepção da Chaveta (vermelho) em um dos Blocos do Vertedouro com risco ao deslizamento por feições geológicas identificadas por Mello e Cruz em 2013. Fonte da imagem: Hidroconsult/Ministério da Integração (2014)

7 - CONCLUSÕES

Nos estereogramas elaborados para os blocos de fundação da barragem de Porcos, foram encontradas interseções que representam blocos em forma de cunhas. Em decorrência destes resultados, recomendou-se considerar estas geometrias na análise de estabilidade do vertedouro, observando sempre a direção e o mergulho dos planos informados, trabalho executado posteriormente por outra equipe de projetistas. É importante ainda observar sempre ao realizar os estudos de estabilidade, que os ensaios de ruptura representam a rocha em uma melhor condição e servem para fornecer o máximo de resistência que será encontrada nestas rochas. Após a execução do vertedouro e sempre após o enchimento do reservatório a rocha de fundação estará submetida a condições muito diferentes, devido a saturação permanente do maciço. Isto posto, soma-se a esta situação a presença de argilominerais encontrados entre planos de acamadamento, presença permanente de água e planos de ruptura desfavorável (inclinados à jusante), acrescida da componente cisalhante não considerada nos ensaios de laboratório de obra. Quando ocorrem estes problemas e necessidades de modificações significativas de projeto, o que os autores recomendam é a análise de toda a problemática da obra através de discussões em conjunto com o border de consultores atuantes tanto no campo da engenharia civil quanto da engenharia geológica evitando decisões individualizadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Integração Nacional, à Supervisora Magna Engenharia Ltda e à Consultora Roma - Estudos, Projetos e Supervisão Ltda, no apoio à divulgação e fornecimento das informações necessárias à elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Barton et al (1974) in Hoek E. (2000) - *Rock Engineering*. Free on-line book available at the Hoek's Corner.
- Bieniawski, Z.T (1989) – *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley, p.251.
- Consórcio Hidroconsult – MWH Brasil (2014). Transposição do Rio São Francisco. Barragem de Porcos. Estabilidade do Vertedouro. Ministério da Integração Nacional.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (1978). *Tradução nº 12* da ABGE, 1983.
- 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.
- Mello. K. S; Fontenelle. A. S; Brum F.S. 2016. *Fundações em Arenito e Instabilidade Gerada por Camadas de Siltito: Falhas Geológicas em Arenitos por Erosão Fluvial - Barragem de Porcos, Brejo Santo CE*. Congresso Brasileiro de Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2016).
- Mello. K. S; Cruz. P. T; Fontenelle. A. S; Brum F.S. 2016. *Barragem de Porcos, Brejo Santo CE, Transposição do Rio São Francisco: Instabilidade Gerada nas Fundações por Camadas de Siltito - Falhas Geológicas Abertas em Arenitos no Eixo e Junto ao Encontro da Ombreira Esquerda*. XI Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul - GEOSUL, Bento Gonçalves (RS), julho de 2017.
- 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.