

RELATO SOBRE ANOMALIA NO COMPORTAMENTO DE UMA GRANDE BARRAGEM MISTA DE TERRA E CONCRETO COMPACTADO COM ROLOS EM OPERAÇÃO – O CASO DA BARRAGEM CASTANHÃO

Report on anomaly in the behavior of a large roller compacted earth-concrete dam in operation - The case of Castanhão dam

Sandra Keila de Oliveira Baima*

RESUMO – Este artigo relata, em detalhe, a ocorrência de uma anomalia no comportamento de uma grande barragem de terra-concreto, em operação há onze anos na região Nordeste do Brasil. Em meados de 2014, com o rebaixamento do nível do reservatório devido à estiagem, foi observada uma trinca vertical no concreto do muro de abraço do bloco 13 do vertedouro. A demora na tomada de ações para a correção da anomalia fez com que o fato chegasse ao conhecimento da população, através da imprensa, ocasionando grande temor da população residente a jusante no vale do rio Jaguaribe. O órgão proprietário da barragem, DNOCS, contratou empresa de consultoria técnica especializada para elaboração do diagnóstico e proposição de medidas para a correção da anomalia. Ao final, são apresentados os resultados dos estudos realizados pela empresa e as medidas corretivas propostas.

SYNOPSIS – This paper describes, in detail, the occurrence of an anomaly in the behavior of a large earth-concrete dam, which has been in operation for eleven years in the Northeast region of Brazil. In mid-2014, with the drought-related lowering of the reservoir level, a vertical crack was observed in the concrete of the junction core wall of block number 13 in the spillway. The delay in taking actions to fix the anomaly has allowed the information about the issue to be known by the general public, through press reports, causing great fear to the population of Jaguaribe river valley downstream areas. The institution that owned the dam, DNOCS, hired a specialized technical consulting firm to prepare a diagnostic report and to propose measures to remedy the anomaly. The results of the studies conducted by this consulting firm and the proposed corrective measures are presented in the final section.

Palavras Chave – Barragem, terra-concreto, trinca.

Keywords – Dam, earth-concrete, crack.

1 – INTRODUÇÃO

Este artigo descreve em detalhe a anomalia detectada na Barragem do Castanhão, do tipo mista (terra-concreto) de propriedade do Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS).

A barragem possui o maior reservatório para usos múltiplos da América Latina, com capacidade de acumulação de 6,7 milhões de m³. Suas águas são vocacionadas para o abastecimento humano, agricultura irrigada, piscicultura, pesca e lazer náutico. Não há uso atual como fonte hidroelétrica desta barragem.

* Engenheira Civil do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).
E-mail: sandra.baima@dnocs.gov.br

Em setembro de 2014, devido ao rebaixamento do reservatório (cota 91,6m correspondente a 33% do volume) em virtude da escassez de chuvas na região, técnicos do DNOCS detectaram visualmente uma trinca vertical, a montante, no muro de abraço do vertedouro.

A falta de ações corretivas, a curto prazo, fez com que, em janeiro de 2016, a informação da existência da trinca chegasse à imprensa e fosse noticiada por Barbosa (2016), Mota (2016) e Fontenele (2016), nas principais rádios e jornais do Estado do Ceará, levando pânico à população residente a jusante no vale do rio Jaguaribe, população essa que, em 1960 já havia sofrido com a ruptura histórica, por galgamento (“overtopping”), da barragem de Orós que inundara todo o vale do médio e baixo Jaguaribe afetando mais de 100 mil pessoas (Valêncio & Gonçalves, 2006).

2 – PRINCIPAIS DADOS TÉCNICOS

A barragem Castanhão, situada no Estado do Ceará nas coordenadas 5°27' S e 38°28' W, barra o Rio Jaguaribe, na localidade denominada de Boqueirão do Cunha, possibilita a criação de um reservatório com capacidade máxima de 6,7 bilhões m³ (na cota máxima de 106,00 m) e um volume útil de 4,2 bilhões m³ (na cota normal de operação de 100,00 m).

A cidade de Jaguaribara ocupava o local onde atualmente é o reservatório da barragem. Esta cidade foi integralmente desapropriada pelo governo do Estado, que construiu uma nova cidade, Nova Jaguaribara, em substituição àquela submersa e reassentou compulsoriamente a população.

O projeto executivo da barragem Castanhão, inicialmente, previa uma barragem de terra homogênea, com trecho em enrocamento na região da tomada d'água, com altura máxima de 60 m acima da fundação e comprimento total de 7,8 km, incluindo os 9 diques fusíveis. O maciço principal teria comprimento de 3,45 km na cota 111,00 m; a tomada d'água seria do tipo torre-galeria, esta última envelopada em concreto constituída de duas tubulações de aço; e o vertedouro em concreto, terminado em salto de esquí, com extensão de 153 m e contendo 12 comportas de segmento acionadas através de cilindros hidráulicos.

No final de 1995 foram iniciados os trabalhos de construção das obras, com a instalação do canteiro, estrada de acesso, desmatamento e escavação da fundação dos diques, barragem e vertedouro.

O projeto executivo foi sendo paulatinamente implantado até que, durante a construção, em



Fig. 1 – Situação ao final do período dos serviços de reescavação, executados na região do “Páleo Canal”, entre as estacas 112+0,00 e 116+0,00, fonte: DNOCS (2004).

meados de 1996, verificou-se que no leito do rio, no trecho entre as estacas 113 e 117, o substrato rochoso apresentava uma depressão abrupta cuja profundidade atingiu até 33 m, paralela ao leito do rio, com dimensões e características bastante peculiares sob o aspecto geotécnico, não previstas. Esta depressão foi denominada de “Páleo Canal” ou “Páleo Cachoeira” (Figura 1).

O projeto executivo foi sendo paulatinamente implantado até que, durante a construção, em meados de 1996, verificou-se que no leito do rio, no trecho entre as estacas 113 e 117, o substrato rochoso apresentava uma depressão abrupta cuja profundidade atingiu até 33 m, paralela ao leito do rio, com dimensões e características bastante peculiares sob o aspecto geotécnico, não previstas. Esta depressão foi denominada de “Páleo Canal” ou “Páleo Cachoeira” (Figura 1).

Nos taludes laterais desta depressão foram observados níveis horizontais de fraturas, alguns com até 1 metro de espessura, preenchidos com areia natural do rio e outros completamente abertos e com espessuras centimétricas.

Da mesma forma, foi evidenciada outra depressão do topo rochoso, entre as estacas 114C+0,00 e 116C+0,00 (eixo do Concreto Compactado com Rolos - CCR) que se denominou de “Paleo Canal Júnior” (Figura 2). O comportamento desta depressão segue as mesmas características do primeiro, mas com dimensões menores.

A litologia encontrada, em ambos os casos, foi um gnaisse-migmatítico bastante fraturado, rico em biotita, de coloração cinza-médio a cinza-escuro. As fraturas obedecem às orientações preferenciais de fraturamento regional, embora as horizontais apresentassem características bastante peculiares.

Em virtude do surgimento destes canais, o projeto executivo original sofreu algumas modificações, passando a constar essencialmente de um trecho central em CCR e ombreiras (esquerda e direita) em barragens de terra homogênea, com maciço de material cascalho-argiloso, um vertedouro com 12 comportas, uma tomada d’água na margem direita, um dique fusível na margem esquerda e 9 diques auxiliares na margem direita, conforme a Figura 3.

Complementarmente, fez-se necessário à otimização da fundação da trincheira de vedação à nova realidade do topo rochoso, deslocando a zona de vedação para montante, onde foi construído um muro de concreto, e o deslocamento da tomada d’água da estaca 122+2,39 para a estaca 124.

Tendo em vista que a interferência do Páleo Canal com os critérios do projeto existente acarretaram fatos e situações extremamente complexas, foram realizados estudos geotecnológicos complementares, através de sondagens rotativas e de percussão, cone elétrico (Universidade Federal do Ceará) e sísmica de refração (Instituto de Pesquisas Tecnológico de São Paulo – IPT).



Fig. 2 – Serviço de bombeamento dentro do "Páleo Jr.", fonte: DNOCS (2004).

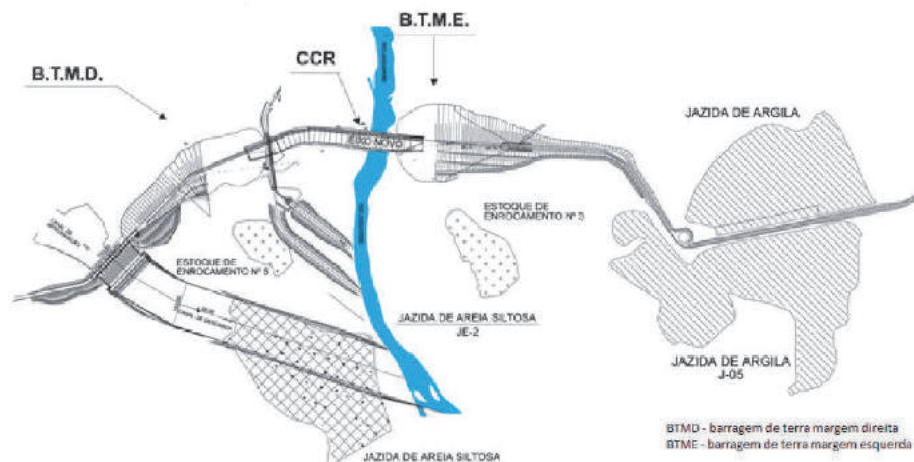


Fig. 3 – Arranjo geral da barragem Castanhão, fonte: Araújo (2003).

Os taludes negativos destas depressões, e aqueles que apresentavam fraturas horizontais, foram retaludados com concreto convencional. As surgências d'água foram injetadas com calda de cimento e outras controladas por meio de tubos de PVC até atingirem uma cota de estabilidade e depois obturadas.

A demora na solução dos problemas técnicos surgidos, com as indefinições nos critérios de tratamento das fundações e nas adequações do maciço da barragem, causaram atrasos no andamento dos serviços, especificamente no trecho do leito do rio.

As obras foram concluídas em outubro de 2003, sendo que o reservatório atingiu a cota normal de operação (cota 100,00 m) em março de 2004, com aproximadamente 4,45 bilhões de metros cúbicos, já no primeiro período invernos de 2004.

Atualmente, existem estudos a respeito da sismicidade induzida pelo reservatório da barragem, entre eles, Ferreira et al. (2008) que monitoraram a área do reservatório através de três estações analógicas nos períodos compreendidos entre 1991 – 1994 e 1998 – 2006, além destas, no período 2003 – 2004 foi adicionada uma estação digital e atualmente conta com rede de 7 estações digitais e uma analógica.

Ferreira et al. (2008) apontam que, no período 1991 – 1994, os resultados do monitoramento não detectaram nenhum sismo em um raio de 60 km, a partir do eixo principal da barragem. Os primeiros sismos, provavelmente induzidos, foram detectados a partir de 2003, quando o nível da água atingiu 20 m. Em 2004, um período chuvoso encheu o reservatório rapidamente, após isso, ocorreu um aumento da atividade sísmica e foram registrados vários micro-terremotos.

Ainda em Ferreira et al. (2008), a análise espaço-temporal das estações analógicas, instaladas na área, revelou que a maioria dos eventos apresenta magnitude inferior a 1 M_b e a maior magnitude observada foi da ordem de 2,3 M_b , na data de 10/07/2007.

2.1 – Barragem principal

A seguir, é apresentado um resumo das principais características técnicas de cada uma das estruturas.

2.1.1 – Trechos em solo compactado

Trechos de terra homogênea, totalizando um comprimento de 2.804,00 m, com maciço compactado composto por material cascalho-argiloso, filtro vertical de 1m de largura, em areia

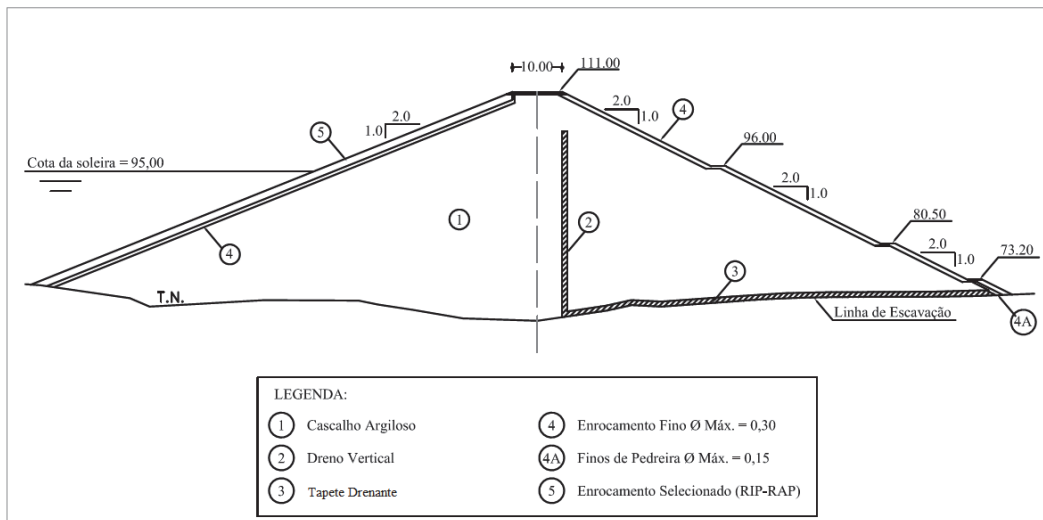


Fig. 4 – Barragem de terra - seção transversal tipo, fonte: Araújo (2003).

compactada e um tapete drenante horizontal, também com 1m de espessura, assente no contato de jusante com sua fundação, tal como mostrado na Figura 4.

O preparo da fundação, nos trechos em solo, constou de escavação até atingir o topo rochoso, após sua exposição foi limpo, e os locais com depressões e taludes negativos sofreram tratamento superficial através da aplicação de concreto dental.

2.1.2 – Trecho em CCR

O trecho central, em concreto compactado a rolo (CCR), tem uma extensão de 646 m, entre as estacas 4+10,00 e 36+10,00, seções tipo conforme a Figura 5, é composto essencialmente por uma seção em concreto convencional a montante com resistência de 12 MPa, e espessura de 0,50 m; e por dois tipos de CCR, um com uma resistência de 10 MPa aos 90 dias e consumo de 90 kg de cimento, que abrange toda a área da barragem até a cota 57,00 m e daí continuando até a cota 95,00 m numa faixa de 8,0 metros, medidos a partir do paramento de montante no sentido de jusante, e o outro, com uma resistência de 7 MPa aos 90 dias e consumo de 70 kg de cimento, que abrangerá o restante da barragem em CCR.

Além disso, foi projetada uma galeria de drenagem a ser construída entre as estacas 4+15,00 e 36+0,00, com largura de 2,50 m e altura de 3,50 m, com a face mais a montante distando 5,0 m para o paramento de montante da barragem.

Ao longo da fundação do maciço em CCR, foram instalados drenos a cada 4,0 m, com profundidade média de 30,00 m na rocha de fundação, criando uma cortina de drenagem a jusante da cortina de injeção.

Em cada junta de contração do maciço de CCR e no vertedouro foram implantados drenos formados a jusante da junta *fungerband*, para condução da eventual vazão de infiltração até o interior da respectiva galeria de inspeção. Em cada bloco formado entre juntas de contração do CCR foram perfurados drenos para captação de eventuais percolações no interior do maciço, desde a crista até a galeria de inspeção e drenagem.

Nos trechos sob o maciço de CCR, o tratamento das fundações foi mais rigoroso, pois além da limpeza era retirada toda rocha alterada e verificado o “choco” de toda a superfície, retirado todos os blocos instáveis, para posterior aplicação de concretos dental, de regularização e de correção dos taludes negativos.

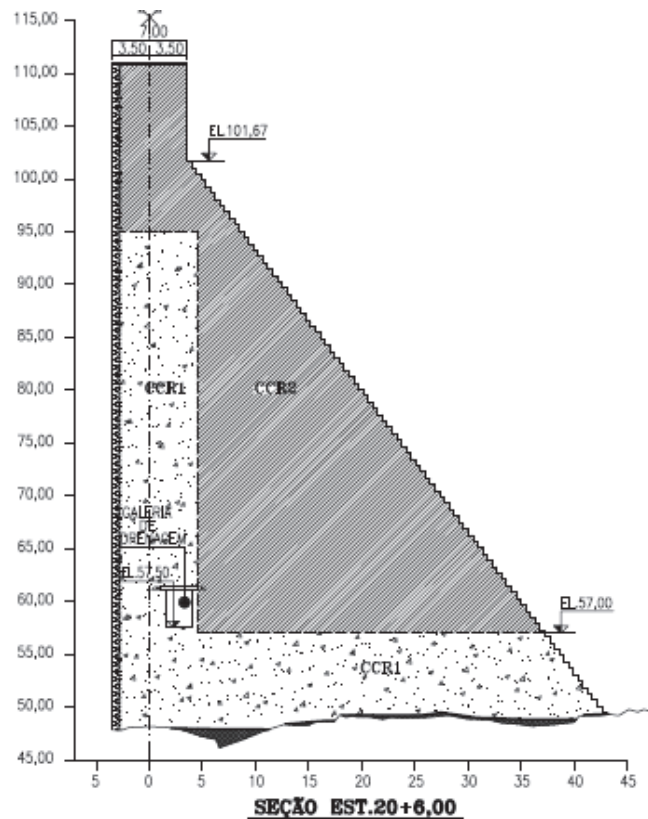


Fig. 5 – Seção tipo da barragem de CCR, fonte: DNOCS (2004).

2.1.3 – Vertedouro

O Vertedouro situa-se na margem direita do barramento e foi dimensionado para dar vazão à cheia decamilenar, com pico de 17.350 m³/s, considerando-se o nível do lago na cota 106,00 m.

A estrutura vertente, construída em concreto convencional, é do tipo superfície de encosta com perfil “Creager” e salto de esqui na extremidade, possui 12 vãos com 12 comportas segmento; tem 153,00 m de comprimento e a cota da soleira é 95,00 m. Esta estrutura foi executada em blocos, em função dos lances de concretagem, e suas dimensões comportavam grandes massas de concreto. Para evitar o aparecimento de fissuras, devido à atividade térmica do conglomerado (apesar da cura com água se processar ininterruptamente), foi utilizado concreto resfriado, em grande parte da estrutura.

2.1.4 – Instrumentação

Para o acompanhamento e registros das subpressões no contato com a fundação rochosa foram instalados 16 piezômetros abertos, tipo Casagrande modificado, em seis seções da galeria de drenagem, nas estacas 6, 11, 16, 21, 26 e 31. Em cada seção definida foram instalados dois piezômetros, um a montante e outro a jusante da cortina de drenagem da fundação. Em uma única seção transversal, que coincide com a galeria de acesso nº 2 (estaca 26), foram indicados quatro piezômetros do mesmo tipo. Portanto, o número total de piezômetros projetados é de 16 unidades

Um total de 13 medidores triortogonais de juntas foram instalados nas juntas entre blocos, dentro da galeria de drenagem, nas estacas 13+13,07, 14+13,07, 15+12,07, 16+6,07, 16+19,34, 22+19,34, 23+19,34, 24+13,116, 25+7,836, 26+2,556, 27+0,556, 31+19,985, 33+3,00, e 3 medidores no vertedouro, com a finalidade de medir deslocamentos em três planos diferentes, com o auxílio de um sistema de apoios fixados convenientemente na estrutura, nas regiões com maiores desníveis na fundação.

Marcos de superfície, implantados através de 12 pinos geodésicos incrustados na posição central do revestimento do coroamento, com espaçamento aproximado de 50 m, são responsáveis pelos registros de deslocamentos verticais que porventura ocorram ao longo da barragem de concreto. Como referência, foram instalados dois “bench marks” (marcos topográficos) nas ombreiras. O número total de marcos é de 14 unidades.

3 – DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, apresenta-se o diagnóstico do problema surgido no paramento de montante do muro de abraço do bloco 13 do sistema extravasor da Barragem Castanhão. Nas Figuras 6 e 7 mostra-se a localização dessa trinca, vista do alto, e nas Figuras 8 e 9, o local onde efetivamente ela ocorre.

Trata-se de uma trinca de grande extensão e abertura, que foi notada somente depois da depleção do reservatório, em agosto de 2014, em decorrência da falta de chuvas na região.

A trinca apresenta, em uma grande extensão, uma abertura bastante elevada e o deslocamento de um de seus bordos no sentido de montante. A mesma, está localizada no trecho do muro de abraço do bloco 13 (Figura 9) e próximo da junção desse muro com o vertedouro, tendo o sentido subvertical, que se admite tenha tido o seu início junto à rocha da fundação, prosseguindo até o NA máximo que foi atingido pelas águas desse reservatório.



Fig. 6 – Localização da trinca vista de jusante, fonte: DNOCS (2015).

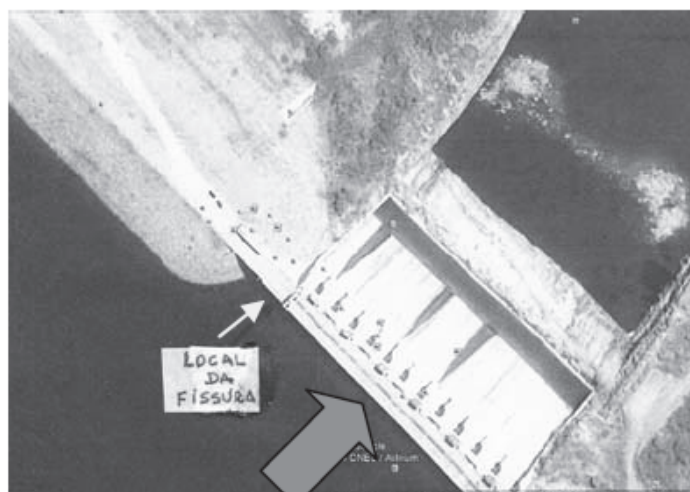


Fig. 7 – Local da trinca, vista do alto e a montante, fonte: DNOCS (2015).

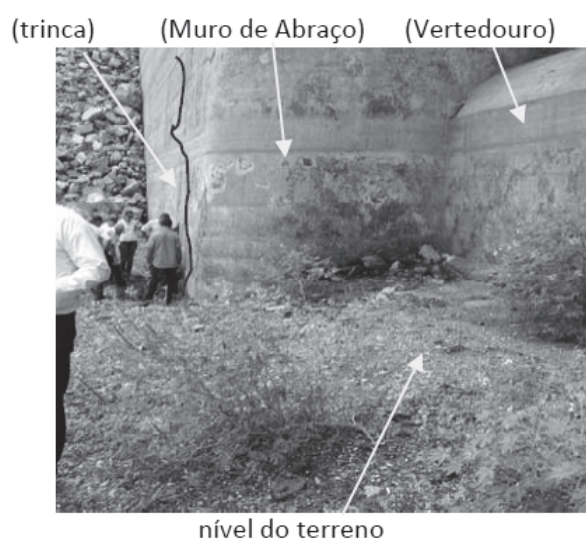


Fig. 8 – Local da trinca visto na direção da esquerda hidráulica, fonte: DNOCS (2015).

(muro de abraço) (junta de contração) (vertedouro)

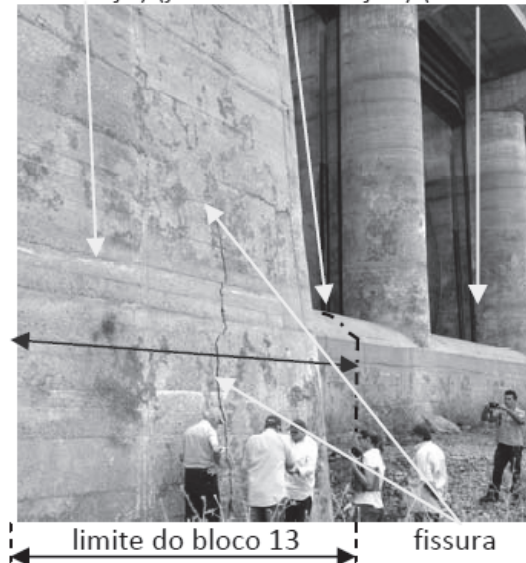


Fig. 9 – Local da trinca visto na direção da direita hidráulica, fonte: DNOCS (2015).

A trinca, no trecho imediatamente acima do terreno, e até aproximadamente 10 m acima dele, apresenta uma grande abertura (± 1 cm) e com um dos bordos projetado para montante (da ordem de 0,5 cm), como pode ser observado nas Figuras 10 e 11.

esborcinamento do bordo da fissura

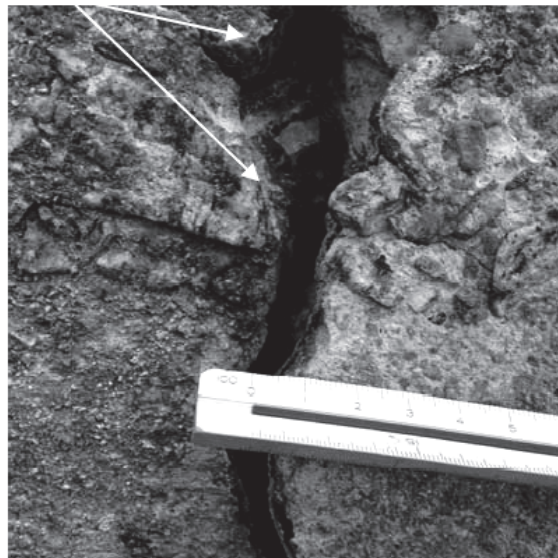


Fig. 10 – Abertura da trinca de ± 1 cm, onde um dos bordos da trinca, está esborcinado, fonte: DNOCS (2015).

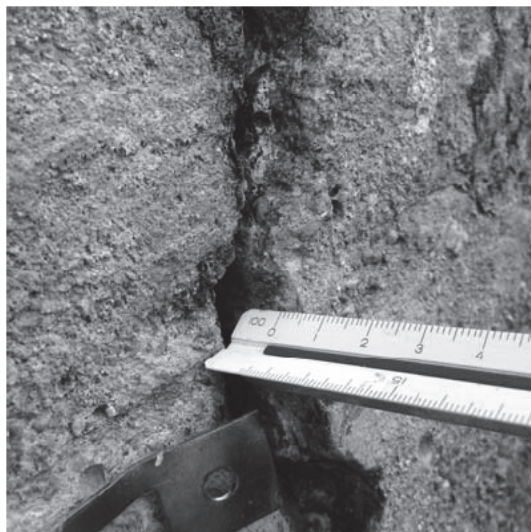


Fig. 11 – Deslocamento para montante da trinca, aproximadamente ± 5 mm, fonte: DNOCS (2015).

Em resumo, a trinca no muro de abraço do bloco 13, tem uma elevada extensão, que vai desde a rocha de fundação (presumível) até próximo da crista, apresentando uma abertura significativa em um trecho do seu comprimento e um deslocamento, de um de seus bordos, para montante.

4 – DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA

Tendo em vista o vulto da obra bem como se tratar de uma barragem de importância estratégica, o DNOCS contratou uma empresa de consultoria técnica especializada para realizar o diagnóstico do problema. Em outubro de 2015, a empresa concluiu o trabalho e apresentou seu relatório técnico.

DNOCS (2015) pressupõe que a trinca deve ter-se iniciado ainda na fase construtiva do muro de abraço, tendo como causa principal para o seu aparecimento, o desnível existente na fundação, como mostrado na Figura 12, e afirma que o problema poderia ter sido evitado, caso fosse colocada uma junta de contração transversal no local do desnível, ou então fossem colocadas chavetas nas juntas do bloco 13 ou finalmente, fosse colocada uma junta de contração transversal entre o vertedouro e o muro de abraço.

Para DNOCS (2015), outras causas, também, contribuíram para a evolução da trinca no sentido vertical, para o aumento da sua abertura e, finalmente, para o deslocamento de um dos seus bordos na direção de montante.

A concretagem do bloco 13 deve ter-se iniciado a partir da elevação mais baixa da fundação (el. 77) e prosseguiu até o nível mais alto do desnível (el. 82), supondo-se que a sua execução tenha sido contínua, sem interrupções prolongadas, conforme mostrado nas Figuras 13 e 14.

Segundo o projeto, o muro de abraço não é armado, mas a armação do vertedouro penetra cerca de 2,0 m nesse muro, como pode ser observado nas Figuras 13 e 14.

A partir da el. 82, concretou-se concomitantemente parte do muro e parte do trecho do vertedouro do bloco 13, até à el. 95 do vertedouro, onde está o topo da ogiva. A partir dessa elevação, a concretagem prosseguiu apenas no muro de abraço, até atingir a crista desse muro.

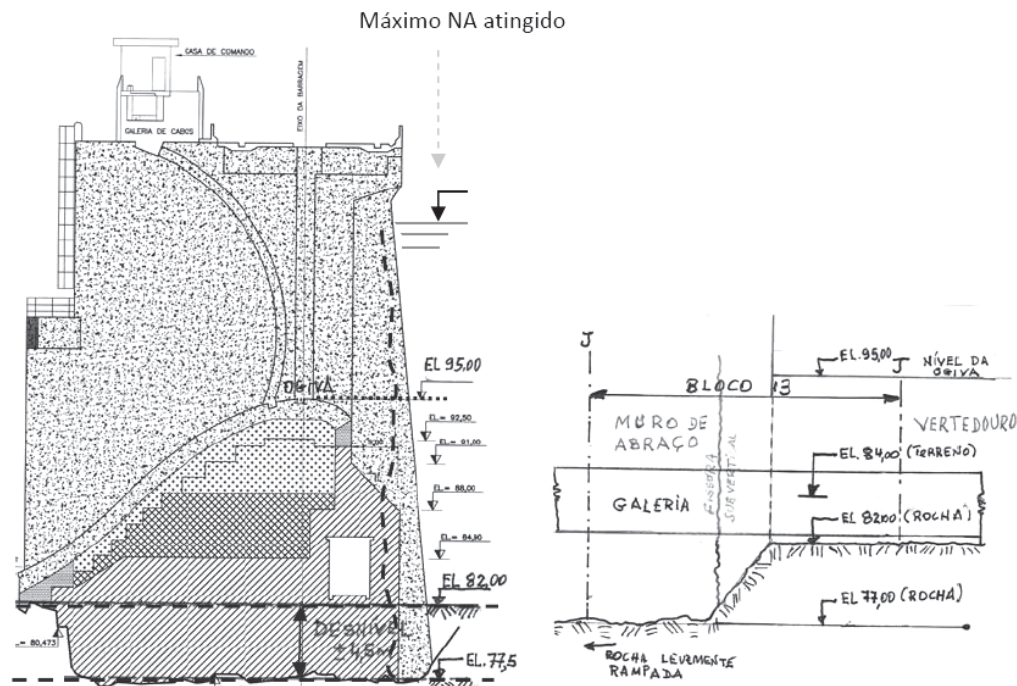


Fig. 12 – (a) Desnível - corte transversal (suposição da penetração máxima da fissura no muro de abraço - entre o paramento de montante e a linha traço interrompido), (b) Desnível - corte longitudinal, fonte: DNOCS (2015).

Com o prosseguimento da concretagem acima da el. 82, o maior peso do concreto do muro, na região mais profunda da fundação provocou tensões de tração na região do desnível dessa fundação, que deu origem a uma fissura nesse local.

O surgimento da fissura mais para dentro da estrutura do muro se deve à influência da armação do vertedouro que, conforme o projeto, penetrou cerca de 2,00 m no muro, o que impediu que a fissura ocorresse entre as duas estruturas.

DNOCS (2015) aponta que a evolução dessa fissura, tanto em direção à fundação como em direção à crista do muro, se deve aos seguintes efeitos:

- aumento progressivo do peso do muro, com o desenvolvimento das concretagens, aumentando as tensões de tração na região já fissurada, que redundou no prosseguimento da fissura;
- evolução da retração do concreto com o tempo (deformação lenta), no sentido do comprimento das estruturas do vertedouro e muros, decorrente do prosseguimento do processo de hidratação do cimento e da perda d'água do concreto;
- tendo em vista que o paramento de montante ficou todo esse tempo submerso, houve a expansão do concreto desse paramento, enquanto o paramento de jusante continuava praticamente estável; como consequência desse gradiente de deformação houve um empenamento do vertedouro no sentido de montante (Figura 15), por ter essa estrutura uma menor seção transversal que a do muro; esse empenamento se refletiu na fissura existente no muro, já transformada em trinca, provocando nela um movimento diferencial entre os seus bordos, que resultou no deslocamento de um dos bordos no sentido de montante.

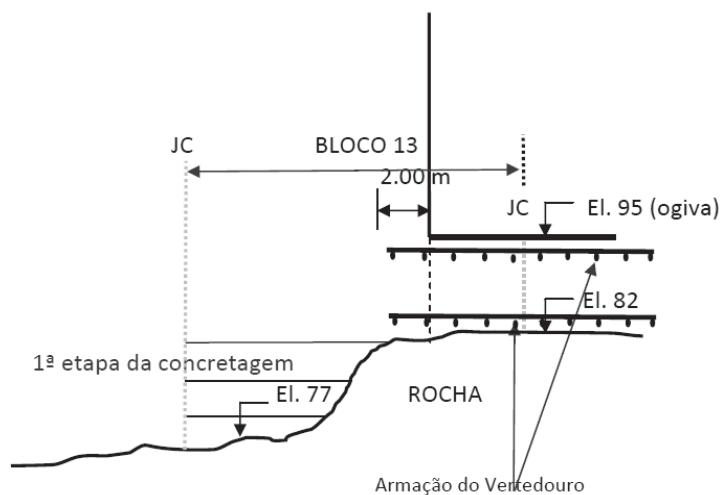


Fig. 13 – Concretagem de 1ª etapa do bloco 13, fonte: DNOCS (2015).

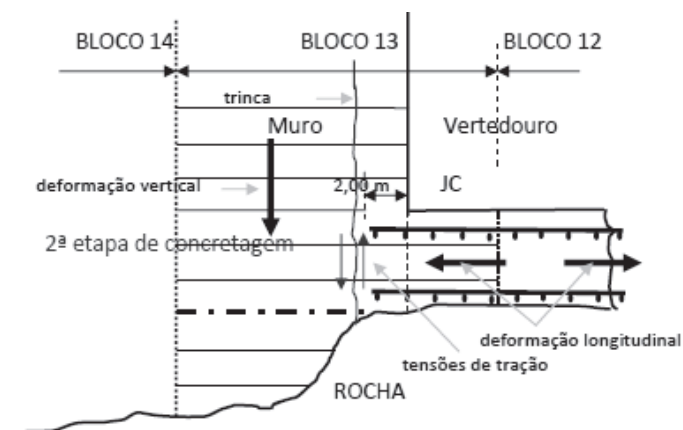


Fig. 14 – Concretagem de 2ª etapa do bloco 13, fonte: DNOCS (2015).

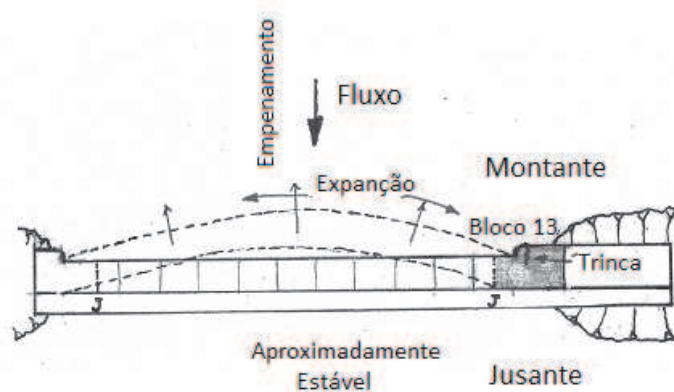


Fig. 15 – Empenamento do vertedouro e do muro de abraço em direção a montante, fonte: DNOCS (2015).

A galeria da barragem possui medidores de juntas triortogonais em algumas juntas do vertedouro, mas nenhum no bloco 13, cujas leituras estão sendo ainda coletadas para análise, mas se admite, em princípio, que esses medidores não acusaram movimentações significativas nessa estrutura.

Apesar da movimentação volumétrica restringida da estrutura, que resultou na formação da trinca, DNOCS (2015) observa que na parede de montante da galeria de drenagem, situada a aproximadamente 3,5 m do paramento de montante, não existe nenhuma fissura e nem sinais de percolação de água, ocorrida atualmente e nem em épocas anteriores, que seriam detectadas pela presença de hidróxido de cálcio ou da carbonatação desse hidróxido, na superfície dessa parede.

Isso leva a crer que a penetração da fissura no muro, não deve ter sido muito profunda, sendo na Figura 12 mostrada uma suposição dessa profundidade de penetração ao longo de toda a extensão da fissura.

Do exposto, DNOCS (2015) conclui que a origem dessa trinca foram as variações volumétricas do concreto e que portanto a mesma não é de origem estrutural, e que sua existência não prejudica a segurança da estrutura, devendo, entretanto ser feito o tratamento, para garantir a durabilidade dessa estrutura.

Finalmente, para a vedação da trinca, DNOCS (2015) recomenda a aplicação de gel de poliuretano.

Em julho de 2016, o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Ceará – CREA/CE publicou parecer técnico sobre a fissura, elaborado por uma comissão multidisciplinar. No parecer, a comissão apresenta outras hipóteses para o aparecimento da fissura.

Segundo o parecer, o desenvolvimento da fissura poderia ter decorrido das deformações do bloco 14 e de parte do bloco 13, que compõem o muro de abraço de ligação com a barragem de terra, quando submetidos ao empuxo da água do reservatório e à subpressão.

Durante o enchimento do reservatório (na 1ª carga), o empuxo pode provocar movimentos de translação transversais na direção horizontal e de rotação em relação à base do bloco, auxiliados também pelos esforços de levantamento oriundos da subpressão (Figura 16). Deste modo, uma parte do bloco 13 teve o seu movimento restrito pela presença do pilar que separa o trecho vertedouro (ogiva) do trecho não vertedouro (muro de abraço) deste bloco. Este pilar, em concreto armado, tem grande rigidez no sentido transversal à barragem e sua armadura penetra cerca de 2,00 m no bloco 13, com sua extremidade próxima ao local onde ocorreu a fissura.

Cabe realçar, que a maior profundidade da fundação da parte não vertedoura (muro de abraço) em relação à parte vertedoura (ogiva) do bloco 13 pode ter contribuído para deformações de translação e rotação mais acentuadas desta primeira parte quando submetida ao empuxo.

Outro fator apreciado no parecer, foram as peças que compõem o trecho do bloco 13 e muro de abraço, estas peças que podem ser classificadas como blocos, desta maneira, pode-se deduzir que durante a concretagem, o desnivelamento de aproximadamente 5,00 metros da base do bloco sobre a rocha de fundação, provocou uma retenção (travamento) do elemento estrutural, fazendo surgir uma fissura de retração hidráulica, nas primeiras 24 horas após a concretagem. Via de regra, estas fissuras são de pequena espessura.

A evidência que este tipo de fissura tenha ocorrido é fortalecida pelo fato do seu desenvolvimento ser da face externa da estrutura para dentro, tendo sua profundidade, aproximadamente de 60 cm, pois o mecanismo de formação destas fissuras tem ligação ao gradiente de temperatura que se forma pela reação do endurecimento do concreto, e que tende a aumentar à medida que se aproxima da face externa do bloco estrutural.

O parecer acrescenta ainda que, na região da fissura, existe uma transição de tipos de concreto no que se refere à armadura e resistência à compressão (Figura 17). Um observador de frente para a fissura tem a sua direita o vertedouro em concreto armado, com resistência de 30 MPa. Já à esquerda da fissura, o mesmo observador tem a visão do muro de abraço onde se encontra um concreto não armado e de resistência de 20 MPa.

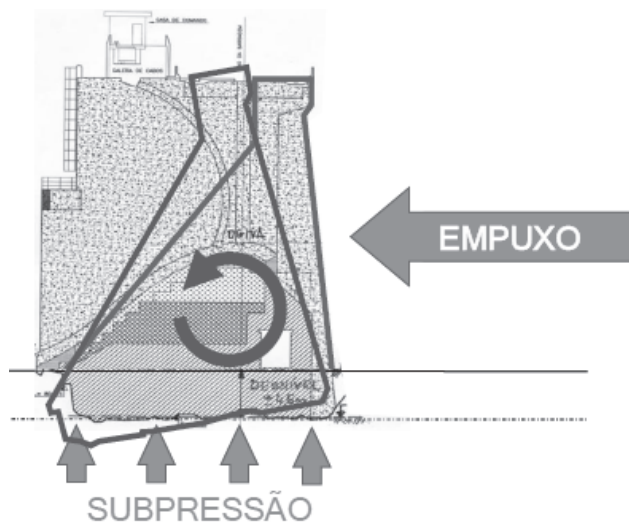


Fig. 16 – Efeitos da subpressão e empuxo sobre a estrutura do vertedouro, fonte: CREA (2016)

Tratam-se claramente de 02 (dois) tipos de materiais distintos que trabalham de forma particularizada quanto as deformações, dilatações térmicas e higroscópicas e reações às cargas impostas pela subpressão, pelo empuxo da água no primeiro enchimento e também do enrocamento lateral no momento construtivo. Os elementos de concreto divergentes aplicados em uma mesma região, expostos a solicitação de cargas homogêneas, reagem de forma heterogênea de acordo com suas características individuais, concorrendo de forma contundente para formação de fissuramentos.

O parecer do CREA descarta a hipótese de que o peso próprio do concreto foi o causador da fissura, visto que se isto tivesse ocorrido, a fissura seria em um plano que cortaria toda a dimensão do bloco.

Descarta ainda, que a fissura tenha ocorrido devido a movimentação da barragem, por ações sísmicas. Fissuras originárias de ações sísmicas têm características diferentes, são mais distribuídas e mais ligadas às regiões da estrutura onde se tem baixa ductilidade e em nós de elementos de placa e de barras;

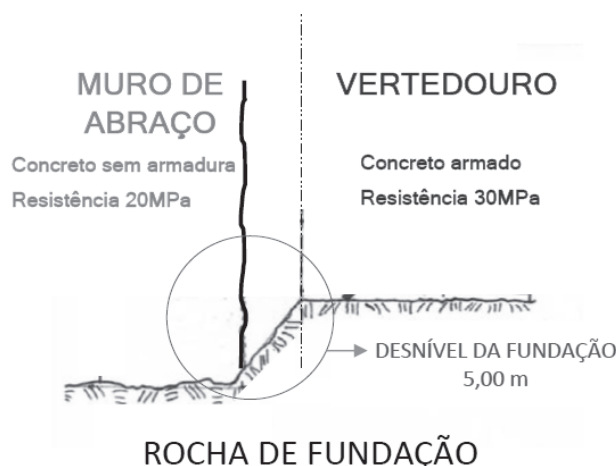


Fig. 17 – Transição dos tipos de concreto na região da fissura, fonte: CREA (2016).

5 – OBRAS DE RECUPERAÇÃO

As obras de recuperação da fissura foram iniciadas em janeiro de 2017, e concluídas em fevereiro de 2017.

No trecho da fissura sob o terreno, foi feita uma escavação, verificando-se que a mesma prosseguia no trecho enterrado do bloco, sendo do tipo esparsa, de pequena abertura e sem sentido definido, mas que não chegava a atingir o nível da rocha de fundação.

Como a fissura se encontrava em uma superfície do concreto que ficará futuramente coberta por aterro, e portanto sem apresentar variações volumétricas, o tratamento consistiu apenas na sua vedação, utilizando para tanto um produto cristalizante.

Neste trecho a recuperação (Figura 18) consistiu nos seguintes passos:

- limpeza da superfície,
- secagem da fissura,
- umedecimento da superfície,
- preparo do produto, na proporção “produto/água” de 5:2 em volume, com aplicação com consumo de produto de 1,6kg/m².
- reaterro da parte tratada,
- na cura foi aplicada uma manta de polietileno sobre a superfície tratada durante 5 dias.



Fig. 18 – Escavação e recuperação do trecho enterrado da fissura e aplicação da manta, fonte: arquivo pessoal da autora.

No trecho da fissura acima do nível do terreno, a vedação foi realizada através da aplicação de gel de poliuretano, da seguinte forma:

- inicialmente foi feito, por meio de uma serra de corte (tipo maquina), um corte com 1,0 cm de profundidade no lado do bordo menos proeminente da trinca e um corte de profundidade variável, no bordo mais proeminente (Figura 19);
- depois de terminado o corte, a cavidade formada foi limpa, utilizando jatos de água e ar, para remover toda a poeira e detritos;
- nos locais onde a trinca apresentava esborcinamento, o corte abrangeu esse esborcinamento, como mostrado na Figura 20;

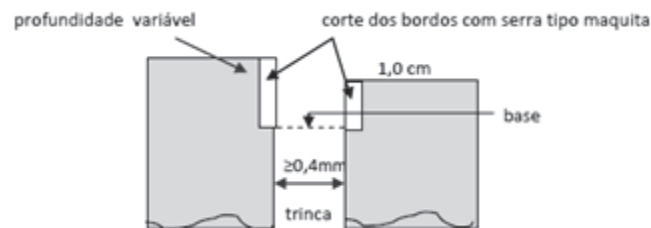


Fig. 19 – Corte dos bordos da trinca, fonte: Corrêa (2017).

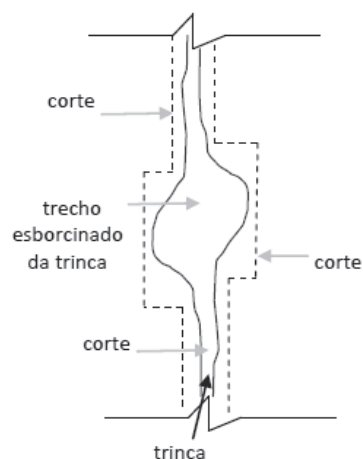


Fig. 20 – Corte com maquina, para enquadrar o trecho esborcinado, fonte: Corrêa (2017).

- para conter o material de injeção, foi feita a vedação da superfície da trinca com fôrma química (Figura 21), utilizando-se como produto para essa vedação, uma resina epoxídica, com tixotropia, e que embora deva ser aplicada em substrato seco, tem durabilidade na condição de submersa em contato com a água ou umidade, e não é atacada pelos raios ultravioleta. Essa fôrma química não necessita ser retirada, pois resiste até 60 bar de pressões de injeção;

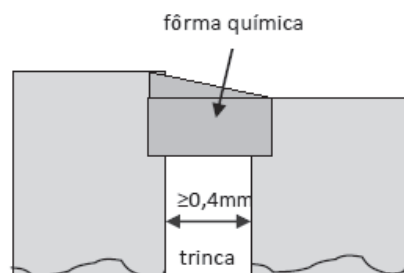


Fig. 21 – Vedação da trinca (fôrma química) como resina epóxi tixotrópica, fonte: Corrêa (2017).

- Depois de terminada a vedação da trinca, o material de enchimento foi preparado e injetado, conforme as orientações do fabricante. A injeção foi iniciada a partir dos furos situados em cota inferior, prosseguindo para os furos localizados acima deles.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou de forma sucinta um resgate histórico da construção da barragem do Castanhão e a identificação, diagnóstico e medidas para a correção de uma anomalia identificada na fase de operação da barragem.

A barragem apresentou em sua fase construtiva, uma feição geotécnica, referida como Páleo Canal, não prevista nos estudos geotécnicos realizados por ocasião da elaboração do projeto executivo, esta ocorrência ocasionou um atraso considerável nas obras até que fossem feitos estudos complementares e o projeto executivo fosse adaptado. Este fato evidencia a importância da condução da prospecção geotécnica e as consequências negativas decorrentes de estudos incompletos.

Onze anos após a entrada em operação a barragem apresentou uma anomalia, trinca vertical, detectada visualmente, sem que houvesse qualquer alteração nos registros da instrumentação da barragem. Segundo DNOCS (2015), o desnível existente na fundação da barragem foi apontado como a causa principal desta anomalia, e a mesma poderia ter sido evitada ainda na fase de projeto, através de medidas relativamente simples.

Apesar dos registros da ocorrência de sismos e dos inúmeros estudos sobre sismologia na área do reservatório, DNOCS (2015) não aponta qualquer relação destes eventos com a ocorrência da trinca.

Portanto, como lição aprendida neste caso em particular depreende-se que as peculiaridades geotécnicas das fundações da barragem foram responsáveis por alterações significativas no projeto executivo e pela ocorrência de anomalia na fase de operação da barragem e que, neste último caso, a inspeção visual foi imprescindível, pois foi capaz de detectar uma anomalia, de dimensões consideráveis, que não havia sido detectada pela instrumentação.

7 – AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro civil Getúlio Peixoto Maia, do DNOCS, que trabalhou efetivamente nas obras de construção da barragem Castanhão, pelo apoio prestado e pela documentação cedida para a elaboração deste artigo.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, M. Z. T (2003). *Barragens do Nordeste do Brasil*. DNOCS, 3ª Ed, Fortaleza-Ce.
- Barbosa, H. (2016). *Castanhão apresenta rachadura desde 2014*. Jornal Diário do Nordeste, Caderno Regional. Disponível em:
www.diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/castanhao-apresenta-rachadura-desde-2014-1.1480085>. Acesso em: 19 abril 2016.
- Corrêa, W. G. (2017). *Relatório de consultoria*. W.G Corrêa Consultoria de Engenharia Civil, Ltda. Rio de Janeiro – RJ.
- CREA-CE (2016). *Parecer técnico de engenharia sobre fissuramento no paramento de montante do bloco 13 da barragem Castanhão*. Conselho Federal de Engenharia e Arquitetura do Ceará, Fortaleza-Ce, julho/2016.

- DNOCS (2004). *Relatório Técnico Final “As built” da Barragem Castanhão*. Ministério da Integração Nacional, Departamento Nacional de Obras contra as Secas, Consórcio AGUASOLOS-HIDROTERRA, Fortaleza-Ce.
- DNOCS (2015). *Relatório: Inspeção em fissura no paramento de montante do bloco 13*. Ministério da Integração Nacional, Departamento Nacional de Obras contra as Secas, KL Engenharia, Fortaleza-Ce, Out. 2015.
- Mota, L. (2016). *Rachadura no Castanhão deve ser fechada até março, após mais de um ano da identificação do problema*. Jornal O Povo. Disponível em: www.opovo.com.br. Acesso em: 19 abril 2016.
- Ferreira, J. M., França, G. S, Vilar, C. S., do Nascimento, A. F., Bezerra, F. H. R., Assumpção, M. (2008). *Induced seismicity in the Castanhão reservoir, NE Brazil – Preliminary results*. The International Journal of Integrated Solid Earth Sciences - Tectonophysics, v. 456, pp. 103-110. Available online at www.sciencedirect.com.
- Fontenele, M. (2016). *Rachadura no açude Castanhão, o maior do Ceará, deve ser reparada até março*. Jornal Tribuna do Ceará. Disponível em www.tribunadoceara.uol.br. Acesso em: 19 abril 2016.
- Valêncio, N. F. L. S.; Gonçalves, J. C. *Da confiança à fatalidade: colapso de barragens como limite ao paradigma da modernização ?*. Revista Política & Trabalho, v. 25, p. 203-222, João Pessoa, out. 2006.