

MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DE TERRA DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA – PCH NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Adele Santos de Oliveira, Márcia Maria Guimarães
Engenheira Civil, adeleoliveira951@gmail.com

RESUMO

O monitoramento do comportamento das estruturas de barragens é fundamental para suas seguranças, uma vez que representam grande potencial de risco ambiental e socioeconômico. É imprescindível o conhecimento dos parâmetros e procedimentos da instrumentação de monitoramento para estabelecer comparação entre valores de referência adotados em projeto e dados obtidos por meio da instrumentação. Este artigo apresenta a análise da instrumentação, onde foi avaliado o comportamento geral dos instrumentos durante o enchimento do reservatório por meio da comparação entre as leituras obtidas dos instrumentos e os valores de controle. Observou-se que antes da entrada em operação da usina as leituras dos instrumentos apresentaram-se, por um período, acima dos níveis normais de operação em função da formação momentânea de nível d'água à jusante do barramento (parte anterior), mas que a partir do início da entrada em operação da primeira unidade geradora houve diminuição desse nível d'água e, conseqüentemente, redução da carga piezométrica destes instrumentos.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento geotécnico. Instrumentação. Barragem de terra.

INTRODUÇÃO

As barragens são obras de construção pesada que permitem acumular água para diversos fins, dentre os quais podem-se citar a irrigação, o consumo humano ou animal e a geração de energia elétrica (GODKE, 2014). Conforme afirma Franco (2008), as barragens representam grande potencial de risco ambiental e social devido ao grande volume de água que armazenam, além de riscos econômicos, ligados a obras de engenharia de grande porte. Assim sendo, é necessário dar atenção especial às condições de segurança estrutural e operacional do empreendimento, a fim de identificar eventuais anomalias e propor ações corretivas.

Segundo Silveira (2006), em 1853, foram realizadas medições topográficas na barragem de Grosbois, na França, para monitoramento de deslocamentos da crista. A partir desse ano, tornou-se comum a adoção de observações através de medições topográficas. Já no final do século XIX, iniciou-se na Índia a utilização de piezômetros para a análise de percolação nas fundações de barragens. O mesmo instrumento foi utilizado nos anos seguintes, na Inglaterra e nos Estados Unidos. Com o passar dos anos, instrumentos para medição de pressão e deformações internas foram utilizados, fomentando o aprimoramento e criação de diversos outros instrumentos. No Brasil, a instrumentação para monitoramento teve impulso a partir da década de 1950, em barragens de terra e enrocamento.

O monitoramento com uso desses instrumentos constitui a ferramenta de instrumentação geotécnica, que segundo Fonseca (2003), permite a detecção e observação de deteriorações que representem risco para o empreendimento, através de dados adquiridos, registrados e processados pelos instrumentos que são instalados em diferentes pontos da construção.

As barragens estão associadas ao desenvolvimento de diversas áreas da economia de um país, a depender de sua finalidade. Entretanto, acidentes que envolvam a ruptura de barragens podem causar danos, no que diz respeito aos impactos socioeconômicos e ambientais (FUSARO, 2007). Mediante os ricos citados, a segurança é fundamental em projetos e construções de barragens. No entanto, faz-se necessária a análise permanente do comportamento das estruturas. Nesse contexto, é imprescindível o conhecimento dos parâmetros e procedimentos, assim como da instrumentação e não somente a obtenção dos dados, através de instrumentos, para a eficiência dos processos. É também necessária a análise em tempo hábil, permitindo a tomada de decisão e planejamento de intervenções, em caso de eventuais anomalias.

OBJETIVOS

Avaliar os parâmetros e procedimentos para monitoramento geotécnico da barragem de terra de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Nesse sentido serão avaliados os parâmetros e procedimentos para monitoramento geotécnico de barragens. Com relação ao estudo de caso, serão apresentadas as características da barragem de terra e os instrumentos a serem avaliados, a saber: marcos superficiais, piezômetros. Posteriormente serão apresentados os níveis de controle definidos em projeto e os dados obtidos através da instrumentação, a fim de estabelecer comparação entre os níveis de controle estabelecidos no projeto e os dados provenientes da instrumentação.

REVISÃO DE LITERATURA

Uma barragem pode ser definida, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) como “uma estrutura em um curso de água, permanente ou temporário, para fins de contenção ou acumulação de água, de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos.” (ANA, 2016, p.15). A barragem é composta por: **barramento**, que juntamente com suas fundações e as ombreiras, destinam-se a retenção da água; **reservatório**, formado a partir da retenção; **estruturas extravasoras**, também chamadas de vertedouros, destinados a evacuar cheias que elevem o nível do reservatório; e, pelo **dispositivo de adução**, chamado tomada d’água.

Barragens de Usinas hidrelétricas

Segundo Silva (2016), nas barragens utilizadas para fins energéticos, o arranjo das estruturas é definido em função de fatores geológicos, geotécnicos, topográficos, hidrológicos e financeiros. Tais fatores determinam além da posição de cada estrutura, o tipo de material empregado na execução. Existem três tipos principais de barragens: terra, enrocamento e concreto. Esse autor também afirma que as **barragens de terra** são mais comuns, devido ao fato de se utilizar para sua construção material natural, onde o processamento é mínimo. Além disso, acrescenta-se o fato dessas construções serem historicamente adotadas. Existem duas formas de construção das barragens de terra, que podem ser homogêneas, quando constituídas de apenas um tipo de material, ou zoneadas, quando o material de empréstimo para construção não é suficiente, empregando-se no núcleo o material mais impermeável (SILVA, 2016). No caso do **enrocamento**, recebem essa classificação as barragens constituídas de aterro onde mais da metade de seu volume é obtido de pedras naturais ou escavação em rocha (DIVINO, 2010). De acordo com as definições de Silva (2016), a construção dessas barragens pode ser de enrocamento com núcleo argiloso, núcleo asfáltico, face de concreto ou face de concreto asfáltico. As **barragens de concreto** por gravidade são utilizadas quando a fundação pode ser apoiada sobre material rochoso de alta resistência. Nesse tipo, o peso próprio da estrutura é suficiente para resistir aos esforços horizontais provenientes da água. A técnica de construção pode ser de concreto convencional ou concreto compactado a rolo (SILVA, 2016).

Quanto à escolha do tipo de barragem em função dos aspectos topográficos as barragens de terra devem ser utilizadas em locais de planícies amplas, onde o relevo seja ondulado. Nesse caso também se pode construir barragem mista (terra e enrocamento), ou de enrocamento, o que dependerá da disponibilidade de material para construção. Já as de concreto devem ser utilizadas em vales mais encaixados, com formato em “V”.

Causas mais comum de acidentes em barragens de terra e enrocamento

As duas principais causas de ruptura de barragens de terra são: erosão interna ou entubamento (*piping*) e galgamento (*overtopping*).

A **ruptura por *piping*** ocorre quando há uma erosão interna de jusante (parte anterior) para montante (parte posterior), formando um tubo (*pipe*), ocasionando o carreamento de partículas de solo pelo maciço, devido ao fluxo de água em excesso de montante para jusante do barramento. O deslocamento de partículas gera instabilidade no equilíbrio de forças na matriz do solo e no estado de tensões no maciço por onde ocorre esse fluxo. O efeito é gradual até a formação de uma brecha e o colapso da estrutura, sendo sua ocorrência mais frequente no primeiro enchimento e nos cinco primeiros anos de operação (ZUCULIN, 2011).

Um exemplo desse tipo de ruptura se deu com a Barragem da Pampulha – Belo Horizonte- MG, quando em 1954 a barragem foi rompida por *piping*, devido à drenagem ineficiente e à ação de água na estrutura, causando instabilidade e rompimento. “Muitas famílias tiveram seus lares destruídos, perdendo tudo o que tinham conquistado com muito sofrimento. O aeroporto também foi atingido pela força das enxurradas” (MESQUITA, 2013).

Quanto à **ruptura por galgamento**, essa decorre geralmente de uma cheia extraordinária, para a qual a barragem não estava projetada, ou por falha de operação nos sistemas extravasores. Durante a construção, pode ocorrer galgamento das ensecadeiras, pois seu dimensionamento é sempre calculado com para em menor tempo de retorno, portanto, com risco maior que a barragem principal, por ser uma estrutura provisória (ZUCULIN, 2011).

Critérios de Segurança

Antes da definição dos parâmetros a serem medidos, as barragens devem ser classificadas segundo a **Categoria de Risco, Dano Potencial Associado** e volume do reservatório, conforme a Resolução Normativa N° 696, de 15 de dezembro de 2015 que estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2015). Na construção de uma matriz de classificação, essa Resolução define os critérios analisados, tais como características

técnicas, estado de conservação e o plano de segurança da barragem, referentes à **Categoria de Risco**. Os critérios de volume do reservatório, potencial de perdas de vidas humanas e danos socioeconômicos e ambientais se referem ao **Dano Potencial Associado**.

O **Quadro 1**, apresenta a matriz de classificação de barragens quanto à Categoria de Risco e ao Dano Potencial Associado.

Quadro 1: Classificação de barragens.
Fonte: adaptado de ANEEL (2015).

Categoria de risco	Dano potencial associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Parâmetros

Para o monitoramento de barragens, utiliza-se um programa de instrumentação geotécnica, que é definido por meio de projeto, onde os profissionais envolvidos no planejamento devem estar familiarizados com as condições do empreendimento. O processo visa à definição dos objetivos e determinação dos parâmetros a serem medidos, bem como a forma que serão implantados (SILVEIRA, 2006). Segundo o Ministério da Integração (BRASIL, 2002) deve haver disponibilidade de instrumentos nas barragens, garantindo a avaliação da segurança.

Os parâmetros a serem analisados em barragens de terra, segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) são: estabilidade, percolação e drenagem, fissuração, erosão superficial, resistência a sismo e estabilidade da fundação. Para melhor especificar os parâmetros, dentro do estabelecido pelo Ministério da Integração Nacional, Silveira (2006, p.23), aponta que devem ser medidos (i) a pressão da água nos poros, (ii) a pressão da água na rocha de fundação, (iii) as pressões totais, (iv) os recalques, (v) os deslocamentos horizontais, (vi) as cargas e a tensão nos elementos estruturais, (vii) a temperatura, (viii) as vazões de drenagem, e, (ix) os materiais sólidos carreados”.

Definição de procedimentos

Os procedimentos e instruções devem ser definidos para operação, manutenção e inspeção do empreendimento. Conforme o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002), é necessário obter informações sobre nível d’água, volume acumulado, vazão e capacidade das estruturas de vertedouros. Devem ser definidos procedimentos para operação de emergência em caso de algum dano à barragem que leve à necessidade de esvaziamento do reservatório.

De acordo com a Resolução Normativa Nº 696 (ANEEL, 2015), as inspeções são classificadas em regular e especial. As **inspeções de segurança regular** devem ser realizadas sempre que houver alteração no nível de segurança da barragem, sendo a periodicidade limite definida em função da classe da barragem. A periodicidade limite é de 6 meses para barragens classe A, 1 ano para classe B e 2 anos para classe C. As **inspeções especiais** são realizadas por equipe multidisciplinar de especialistas nas áreas de hidráulica, hidrologia, geologia, geotecnia, estruturas, elétrica e mecânica. Essa inspeção visa manter ou reestabelecer o nível de segurança à categoria normal e deve ser realizada sempre que o nível de segurança estiver na categoria alerta ou emergência. Também deve ocorrer em casos de eventos excepcionais como cheias, galgamento ou abalos sísmicos e a partir de denúncia fundamentada, resultado de fiscalizações realizadas ou comunicado feito pelo empreendedor.

Essa resolução também define prazos para realização de **Revisão Periódica de Segurança - RPS**, que visa diagnosticar o estado geral de segurança da barragem e indicar medidas para manutenção da segurança. Para usinas que entraram em operação comercial antes da publicação da Resolução Normativa Nº 696 (ANEEL, 2015), o prazo para realização da RPS é de 5 anos para barragens classe A, 7 anos para classe B e 10 anos para classe C. Já as usinas em operação comercial após a publicação (novas), o prazo é de 5 anos para realização da primeira RPS.

No que diz respeito à instrumentação, Juntamente com todas as descrições dos instrumentos devem estar suas leituras iniciais, limites de projeto, dados e requisitos para sua calibração, faixas normais de operação e níveis de alarme, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária.” (BRASIL, 2002, p.32).

Instrumentação

Um termo utilizado no âmbito do monitoramento de barragens é a auscultação, que pode ser definida como o “conjunto de processos que visam à observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global” (FONSECA, 2003, p.6). Seguindo a mesma ideia, Fusaro (2007) observa que a auscultação pode ser feita por inspeções visuais em conjunto com a instrumentação.

A instrumentação de barragens é uma ferramenta de monitoramento que permite avaliar o desempenho das estruturas para garantir a segurança. Cada instrumento instalado em um empreendimento é selecionado tomando como base uma pergunta específica que precisa ser respondida. São as questões que possivelmente surgirão durante o projeto, execução e operação, que irão definir os instrumentos e métodos de medição (SILVEIRA, 2006).

O termo auscultação é mais abrangente, pois, além da instrumentação, abrange a metodologia a ser adotada para leitura e manutenção dos instrumentos, a frequência na qual as leituras serão realizadas, a definição dos valores de referência que serão comparados a valores medidos pelos instrumentos.

- **Marcos de deslocamento superficial**

Os marcos superficiais são utilizados para medir os deslocamentos horizontais e verticais do maciço. São constituídos de uma barra de aço, tendo uma semiesfera na parte superior e um bloco de concreto para fixação. A medição das variações é possível através de levantamentos topográficos que ocorrem com uma determinada periodicidade, utilizando marcos de referência implantados em pontos próximos à barragem, mas que são indeslocáveis (FONSECA, 2003). A **Figura 1** apresenta um marco superficial e a **Figura 2** apresenta um marco de referência.



Figura 1: Marco superficial. Fonte: Oliveira (2019)



Figura 2: Marco de referência. Fonte: Oliveira (2019)

- **Piezômetros**

Para controle da segurança é preciso conhecer a evolução das pressões que se desenvolvem no aterro e nas fundações. Essas pressões, também denominadas poropressões, são exercidas pelo fluido (água) no interior dos poros

dos solos. Os instrumentos utilizados na medição da poropressão são os piezômetros, em seus diversos tipos e princípios de funcionamento. O instrumento constitui-se de um tubo de PVC perfurado introduzido em um furo de sondagem e envolvido por uma manta geotêxtil. O espaço entre o tubo e o furo é preenchido com um material drenante, normalmente areia. A escolha é influenciada por fatores como durabilidade, facilidade de instalação, confiabilidade das medidas e custo (FONSECA, 2003). De acordo com Fusaro (2007) existem diversos tipos de piezômetros. A **Figura 3** apresenta um piezômetro do tipo Casagrande. Os diferentes instrumentos são utilizados em conjunto, a fim de permitir o monitoramento dos parâmetros que devem ser observados, para garantir o atendimento aos critérios especificados e a adequação das condições de segurança.



Figura 3: Piezômetro Casagrande. Fonte: Oliveira (2019)

Histórico de rompimentos de barragens brasileiras

Segundo a ANA, a cada ano ocorrem, em média, três acidentes com barragens no país. Os dados compilados são divulgados anualmente e encaminhados ao Congresso, a partir do Relatório de Segurança de Barragens (RSB). Esses dados retratam o atual cenário do país, onde a segurança de barragens está totalmente desalinhada com a necessidade que requer. No decorrer dos últimos anos, o Brasil vem enfrentando graves problemas com o rompimento de barragens, gerando consequências que são historicamente as mesmas: assoreamento de cursos d'água, cidades destruídas e vítimas fatais. Como os casos das barragens em Mirai (2007), Mariana (2015), e recentemente, Brumadinho (2019), demonstram a importância de manter estruturas desse porte seguras.

No dia 10 de janeiro de 2007, no município de Mirai – MG, ocorreu o rompimento de um dique da mineradora Rio Pomba Cataguases. De acordo com a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), que contratou especialistas em segurança de barragens na época do acidente, o laudo técnico concluiu que o nível de água no reservatório não atingiu a cota máxima e que a ruptura da barragem ocorreu por erosão do solo, pois o vertedouro de emergência não tinha revestimento adequado à passagem do fluxo de água.

Em 2015, no município de Mariana – MG, rompeu-se uma barragem de rejeitos de mineração denominada "Fundão", controlada pela Samarco Mineração S.A. Construída para armazenar resíduos gerados durante o processo de mineração de ferro, entrou em colapso causando uma catástrofe sem precedentes na história. Os especialistas do setor da mineração são uníssonos em afirmar que a utilização de técnicas mais modernas de filtragem dos resíduos, a manutenção correta das barragens, a utilização de instrumentos de monitoramento eletrônico, a implementação de sistemas de alerta, a adoção de planos emergenciais e, sobretudo, uma fiscalização séria e eficiente pelos órgãos competentes são medidas que, se estivessem em pleno funcionamento, certamente teriam evitado o desastre ou minimizariam seus impactos socioambientais (LOPES, 2016).

E, recentemente, em 25 de janeiro de 2019, uma barragem da mineradora Vale se rompeu na região do Córrego do Feijão, em Brumadinho, região metropolitana de Belo Horizonte, MG. A Vale, através de nota oficial informou que a barragem de Brumadinho era monitorada por 94 piezômetros e 41 INAs (Indicador de Nível D'Água). "As informações dos instrumentos eram coletadas periodicamente e todos os seus dados analisados pelos geotécnicos responsáveis. Dos 94 piezômetros, 46 eram automatizados". A barragem não possuía um sistema completo de monitoramento de estruturas em tempo real. O presidente da empresa Vale, Fábio Schvartsman relatou à imprensa que devido à velocidade da lama, as sirenes de alerta de Brumadinho não foram acionadas após o rompimento da barragem. Porém, engenheiros e técnicos especialistas da área garantem que o sistema de monitoramento teria emitido alertas sobre a possibilidade de a estrutura ruir, e com, isso permitir a evacuação de parte da área atingida pelo mar de lama.

METODOLOGIA

Os principais passos metodológicos da rotina de um processo de monitoramento de barragens por instrumentação são mostrados na **Figura 4**.



Figura 4: Processo de monitoramento de barragens por instrumentação. Fonte: Oliveira (2019).

O monitoramento abrange as **inspeções visuais**, que contribuem com a análise juntamente com os dados da instrumentação. Para o monitoramento com **instrumentação**, primeiramente é necessário definir o **tipo de barragem** através da **classificação**, pela qual é possível definir também quais **parâmetros** serão medidos e quais os instrumentos

adequados. Após a **determinação dos instrumentos** é realizado o projeto de instrumentação. Os **níveis de controle** são definidos com base em estudos de percolação de água e estabilidade da estrutura, levando em consideração a geometria da barragem, o NA no reservatório e o tipo de material que constitui a estrutura do maciço. Uma vez instalados os instrumentos, o que pode ocorrer durante ou após a construção da barragem, o **funcionamento** dos mesmos é verificado. O projeto de instrumentação gera, além dos desenhos, um manual de procedimentos. Nesse manual são especificadas as frequência e os procedimentos para **leituras de campo** e armazenamento e disponibilização dos dados. Até esse ponto, o desenvolvimento do artigo se deu através de pesquisa bibliográfica e consulta ao projeto e manual de instrumentação da barragem. A partir dos dados de leituras de campo, o processo entra em um ciclo, onde se realiza a **análise dos dados, a comparação com dados anteriores** do mesmo instrumento e dos demais instrumentos, permitindo uma análise do comportamento geral da estrutura e as **recomendações de medidas a serem adotadas** para melhorias, em caso onde os níveis atingem valores de atenção ou até mesmo em possíveis anomalias. Para efeitos da análise da instrumentação da barragem em questão foi selecionada a seção instrumentada correspondente a um dos pontos de maior altura da barragem. A análise foi realizada por meio da elaboração de gráficos, onde foi avaliado o comportamento geral dos instrumentos durante o enchimento do reservatório e individualmente por meio da comparação entre as leituras obtidas dos instrumentos e os valores de controle (níveis normais, atenção e alerta) definidos conforme o manual de controle e operação dos instrumentos, elaborado durante a implantação das obras.

RESULTADOS

A barragem de terra em estudo constitui a estrutura de barramento de uma Pequena Central Hidrelétrica - PCH. Na margem direita existe uma barragem em concreto, na parte central existe um vertedouro, construído com mesmo material e a na margem esquerda a barragem de terra. Sua extensão é de aproximadamente 60 metros e a altura do maciço é de aproximadamente 15 metros.

Para o **projeto de instrumentação**, foram definidas três seções transversais, devido ao pequeno porte da barragem. Nas seções são distribuídos nove piezômetros do tipo Casagrande (PC), para observação das subpressões na fundação e no tapete drenante (camada de material granular para direcionar o fluxo de água na base interna do maciço), e três marcos de deslocamentos superficiais (MS). Além desses, foram instalados dois marcos de referência (MR), para suporte na leitura dos marcos superficiais.

A **definição dos níveis de controle** da barragem em estudo foi realizada por meio da elaboração de estudos de percolação e análises de estabilidade durante a fase de projeto executivo. Os valores de controle das leituras dos instrumentos foram divididos em três categorias: valores normais de operação, valores de atenção e valores de alerta. Valores abaixo dos de alerta indicam que o comportamento da estrutura é normal, já os valores de alerta indicam que devem ser realizadas análises detalhadas, pois esses são os valores máximos para os instrumentos.

Para definição dos níveis normais dos **piezômetros** foram realizados estudos a partir das análises de estabilidade para a condição de percolação estável (regime permanente), que é representativo da condição de operação no qual o nível do reservatório, tendo atingido o seu valor máximo normal, assim permanece por um período de tempo suficientemente longo para a saturação do maciço nas zonas submetidas à percolação. Para definição dos níveis de atenção e alerta, tomou-se como premissa de projeto a adoção de tapete drenante inoperante, provocando a saturação do talude de jusante. E assim, apoiado nos estudos de percolação, partiu-se para a pesquisa da linha de saturação de jusante que resultasse nas análises de estabilidade fatores de segurança correspondentes a 1,4 para o caso de atenção e 1,3 para alerta. As análises de estabilidade e percolação foram executadas com auxílio do *software GeoStudio*, da *GeoSlope®*.

Quanto aos **marcos superficiais**, o recalque máximo de crista equivale a uma deformação vertical de 0,50%H, sendo H a altura da barragem. O critério utilizado para determinação dos valores de atenção foi de 50% do deslocamento máximo, ou seja, 0,25%H. Para os valores de alerta adotou-se 100% do valor, ou seja, 0,50%H.

Análise dos Resultados

Nas **Figuras 5 a 8**, são apresentadas as leituras individuais de cada um dos quatro piezômetros integrantes da seção instrumentada selecionada para análise, desde o início do enchimento do reservatório, ocorrido em fevereiro de 2018, bem como os níveis de controle e os NA's de montante e jusante.

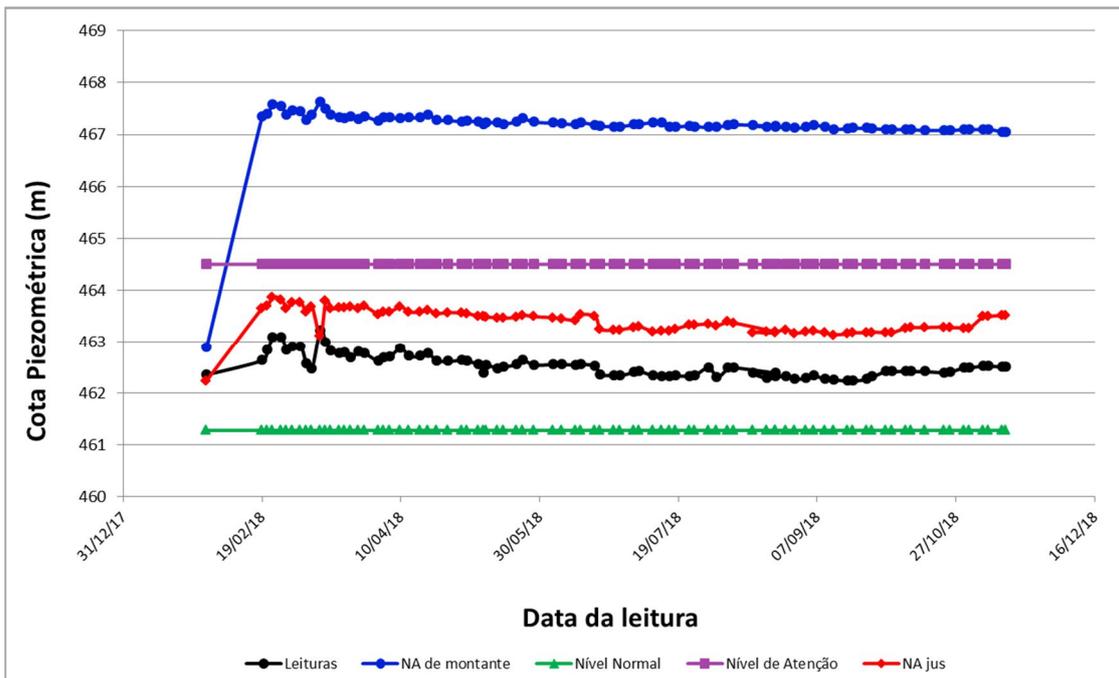


Figura 5: Leitura e níveis de controle do piezômetro PC-201. Fonte: Autores do trabalho.

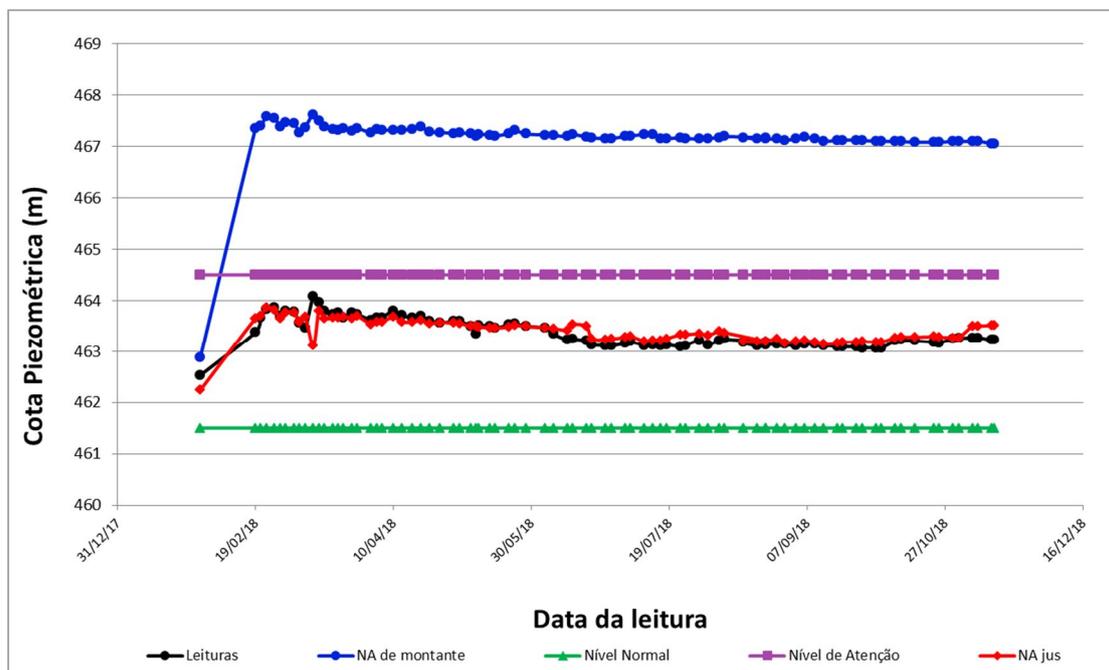


Figura 6: Leitura e níveis de controle do piezômetro PC-202. Fonte: Autores do trabalho.

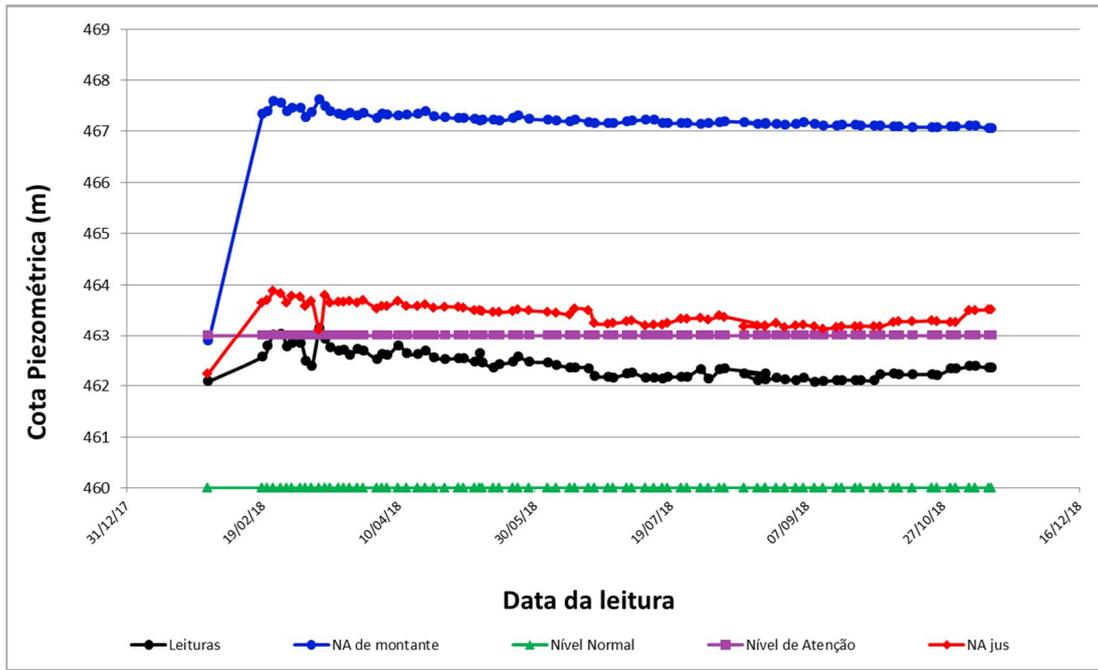


Figura 7: Leitura e níveis de controle do piezômetro PC-203. Fonte: Autores do trabalho.

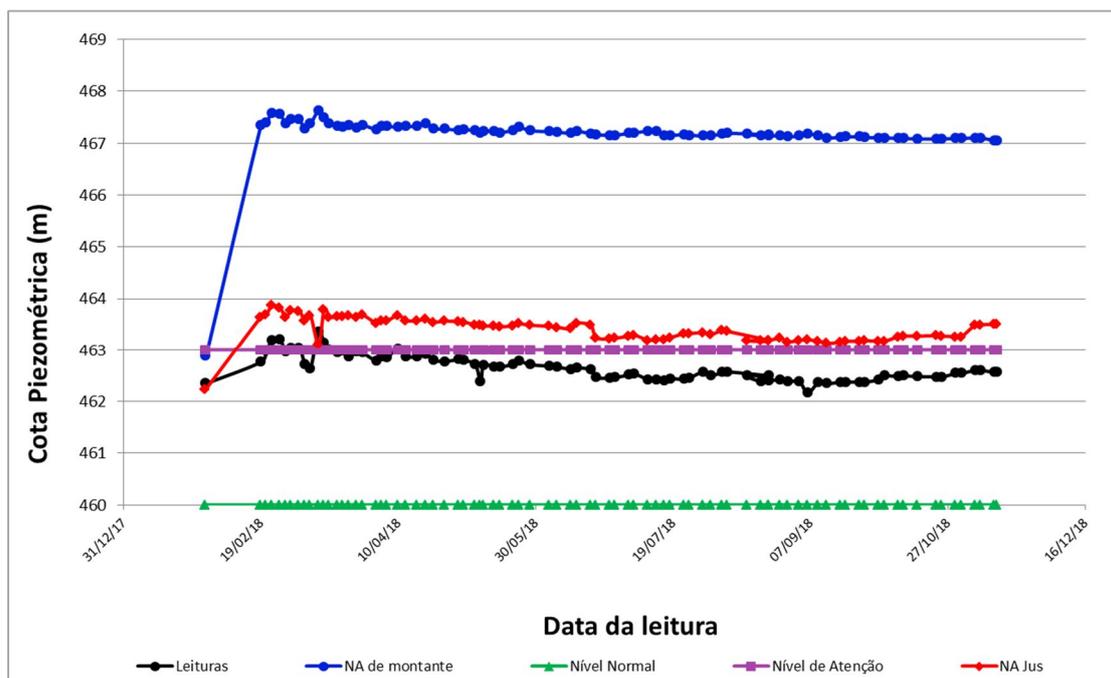


Figura 8: Leitura e níveis de controle do piezômetro PC-204. Fonte: Autores do trabalho.

De uma forma geral, percebe-se que todos os instrumentos da seção analisada foram rapidamente sensibilizados pelo enchimento do reservatório, passando a se comportar em função das variações do mesmo. Verifica-se, entretanto, que o comportamento dos instrumentos sofre maior influência do momentâneo NA de jusante do barramento, uma vez que os mesmos se encontram “afogados”, ou seja, abaixo do NA. Os piezômetros localizados no tapete drenante, PC201 e PC203, apresentam-se acima dos níveis normais de operação em função da formação momentânea de nível d’água a jusante do barramento decorrente da não entrada em operação das unidades geradoras. Entre os meses de fevereiro e março de 2018 estes instrumentos chegaram a se aproximar do nível de atenção, mas a partir do início da entrada em operação da primeira unidade geradora houve diminuição do NA de jusante e, conseqüentemente, redução da carga piezométrica destes instrumentos.

Quanto a isso, Fusaro (2007) expõe que os níveis de controle para os dados da instrumentação devem ser determinados na fase de projeto, antes do início do enchimento do reservatório e a análise de dados deve observar tendências e correlações com os níveis d'água de montante e de jusante. No caso dos valores excederem os níveis aceitáveis, deve-se recalcular a estabilidade considerando-se as pressões efetivamente verificadas no campo.

Os instrumentos PC202 e PC204, instalados respectivamente, no *cut-off* [escavação de uma parte do terreno de fundação e a sua substituição por um material muito menos permeável (geralmente material argiloso), visando aumentar o caminho de percolação do fluxo na fundação (SOUZA, 2013, p.34)], e na fundação em saprolito, apresentam-se também acima dos níveis normais em função da influência do momentâneo NA de jusante do reservatório, com a particularidade de que as cargas apresentadas pelo PC202 foram superiores as do PC204 em função do meio em que se encontra instalado (solo compactado), enquanto o PC204, por estar instalado em meio mais arenoso (saprolito) tende a apresentar menor carga piezométrica, devido à maior percolação nesse material.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após conhecimento das características da barragem de terra e dos instrumentos, foi realizada uma análise para comparação dos níveis de controle definidos em projeto e os dados obtidos através da instrumentação. Verificou-se que as leituras dos piezômetros se apresentaram, por um período, acima dos níveis normais de operação em função da formação momentânea de nível d'água a jusante do barramento decorrente da não entrada em operação das unidades geradoras, mas que a partir do início da entrada em operação da primeira unidade geradora, houve diminuição do NA de jusante e, conseqüentemente, redução da carga piezométrica destes instrumentos. Verificou-se ainda que os recalques observados a partir da leitura do marco superficial encontram-se dentro dos limites estabelecidos. Por fim, recomenda-se a manutenção das rotinas de inspeção visual das estruturas para obtenção de informações além dos dados fornecidos pela instrumentação, para subsidiar a adequada avaliação do comportamento das estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agência Nacional de Águas (ANA). **Guia prático de pequenas barragens**. Brasília, 2016.
2. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 696**, de 15 de dezembro de 2015.
3. BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, 2002.
4. DIVINO, Paula Luciana. Comportamento de enrocamentos em barragens [manuscrito]: estudo de caso da Barragem de Emborcação. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Ouro Preto, 2010.
5. FONSECA, Alessandra da Rocha. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Ouro Preto, 2003.
6. FRANCO, Carlos Sergio Souza Pinto de Almeida. **Segurança de barragens: aspectos regulatórios. Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 2008.
7. FUSARO, Teresa Cristina. Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto, 2007.
8. GODKE, Bruna. Proposta de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade: um estudo de caso. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2014.
9. LOPES, L.M.N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Direito da Universidade Federal Fluminense - UFF Niterói, RJ, 2016.
10. MESQUITA, Y.N. Jardim de asfalto: água, meio ambiente, canalização e as políticas públicas de saneamento básico em Belo Horizonte, 1948-1973. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia – EE-UFGM, 2013.
11. OLIVEIRA, Adele Santos de. Monitoramento geotécnico de barragem de terra de uma Pequena Central Hidrelétrica – PCH. **Trabalho de conclusão de curso – TCC em Engenharia Civil**. Centro Universitário Una. Contagem-MG, 2019.

12. SILVA, Juliana da. Análise em segurança de barragens com base em sistema de inspeção e monitoramento de instrumentação. **Trabalho de conclusão de curso – TCC**. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2016.
13. SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
14. SOUZA, Mariana Miranda de. Estudo para o Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC. **Projeto de Graduação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica - UFRJ/ Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2013.
15. ZUCULIN, Sérgio. **Curso Segurança de Barragens – Módulo II: Inspeção e Auscultação de barragens**. Curso promovido pela ANA – Agência Nacional de Águas em Brasília, 2011. Disponível em: https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/24/Unidade_2-modulo2.pdf Acessado em 17/04/2019.

AGRADECIMENTOS

As autoras expressam seus agradecimentos ao Centro Universitário UNA pelo apoio e incentivo à pesquisa.