

Aspectos sobre Instrumentação e Monitoramento de Barragens

Hosana Emilia Sarmiento Costa Leite
Doutoranda, UFPE, Recife, Brasil, hosana.emilia@ufpe.br

Lícia Mouta da Costa
Professora Dra., UFPE, Recife, Brasil, licia.costa@ufpe.br

Leonardo José Nascimento Guimarães
Professor Dr., UFPE, Recife, Brasil, leonardo.guimaraes@ufpe.br

Silvio Romero de Melo Ferreira
Professor Dr., UFPE, Recife, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

Olavo Francisco dos Santos Júnior
Professor Dr., UFRN, Natal, Brasil, olavo.santos@ufrn.br

RESUMO: A instrumentação de barragens e as inspeções visuais são os principais meios para avaliar a continuidade operacional e física de uma barragem, devendo ser consideradas como mutuamente complementares. O objetivo deste artigo é apresentar o estado da arte sobre aspectos dessa associação, bem como, sobre o plano de monitoramento de barragens, com foco na legislação brasileira e literatura técnica. A ênfase principal quanto ao monitoramento aborda a segurança de barragens, observando o plano nas diversas fases desde o projeto, a descaracterização e usos futuros, de forma a maximizar a segurança de barramentos. Relaciona-se também a pertinência de estudos de modos de falhas para determinar o melhor método de monitoramento a se executar e as análises de risco. Entre as principais considerações, observa-se que uma boa auscultação do barramento possibilita intervenções preventivas e corretivas, minimizando o risco de acidentes, preservando a segurança da estrutura, do meio ambiente e de terceiros em sua área de influência. Permite, também, mitigar incógnitas e incertezas de projeto, tendo por consequência refinamentos progressivos e melhorias nas técnicas de análise de risco e projetos futuros.

PALAVRAS-CHAVE: Auscultação, Monitoramento, Barragens.

ABSTRACT: Dam instrumentation and visual inspections are the main means of evaluating the operational and physical continuity of a dam and should be considered as mutually complementary. The objective of this article is to present the state of the art on aspects of this association, as well as on the dam monitoring plan, focusing on Brazilian legislation and technical literature. The main emphasis in terms of monitoring is dam safety, observing the plan in the various phases from planning, decharacterization and future uses, in order to maximize dam safety. It is also related to the relevance of failure mode studies to determine the best monitoring method to perform and risk analyses. Among the main considerations, it is observed that a good sounding of the dam enables preventive and corrective interventions, minimizing the risk of accidents, preserving the safety of the structure, the environment and third parties in its area of influence. It also allows the mitigation of project unknowns and uncertainties, resulting in progressive refinements and improvements in risk analysis techniques and future projects.

KEYWORDS: Auscultation, Monitoring, Dams.

1 INTRODUÇÃO

A construção de uma barragem requer um processo construtivo laborioso e uma engenharia multidisciplinar, estando muitas vezes sujeitas a grandes cargas e condições de fundação especiais. Somado ao fato que durante sua vida útil as barragens se deterioram e seus indicadores de confiabilidade se alteram.

Além disso, nenhuma estrutura está imune ao risco de falha. Relaciona-se “risco de falha” a algum comportamento anômalo, “movimentos não admissíveis” que podem ocasionar acidentes (Silva *et al.*, 2015 *apud* Guimarães Filho, 2021).

A Instrumentação de Barragens e as Inspeções Visuais são os principais meios de que se dispõe para avaliar a continuidade operacional e física de uma barragem, devendo ser encaradas sempre como mutuamente complementares. Zuculin (2020) afirma que a Segurança de Barragens é a área da engenharia que cuida da “saúde” da barragem. Nesse sentido o risco de acidentes é minimizado por meio do monitoramento na qualidade de diagnóstico da saúde da barragem, pois possibilita intervenções preventivas e corretivas, acarretando a diminuição do risco de acidentes e, consequentemente, preservando a segurança da estrutura e área de influência. A etapa de monitoramento, também, é conhecida por manutenção preditiva, na qual se “prediz” os possíveis problemas da estrutura (Piasentin, 2020).

Nesse contexto, as inspeções associadas a uma análise criteriosa dos dados fornecidos pela instrumentação de auscultação da barragem, quando adequadamente projetada, corretamente instalada e sistematicamente interpretada, formam a mais importante e eficiente ferramenta na avaliação do comportamento dessas estruturas, do mesmo modo que riscos potenciais têm maior possibilidade de serem detectados, a partir dessa associação (Oliveira, 2008). Permite, também, mitigar incógnitas e incertezas de projeto, tendo como consequência refinamentos progressivos e melhorias nas técnicas de análise de risco e projetos futuros (Andrade, 2021).

No artigo objetiva-se discorrer sobre aspectos dessa associação, tal como, sobre o plano de monitoramento de barragens com foco na legislação brasileira sobre segurança de barragens e literatura técnica, nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros, de forma a maximizar a segurança de barramentos. Em suma, trata-se de uma revisão bibliográfica sobre o tema.

No estudo relacionou-se também a pertinência de estudos de modos de falhas para determinar o melhor método de monitoramento a se executar, e complementando o tema, cometa-se sobre o Sistema Integrado de Segurança um conceito que vem sendo considerado como o mais completo para o controle dessas estruturas.

2 PROJETO DA INSTRUMENTAÇÃO DE AUSCULTAÇÃO

Segundo a Lei n.º 14.066 de 2020, Artigo 4º, inciso I, são fundamentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) “a segurança da barragem, consideradas as fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros” (Brasil, 2020). Desse modo, o Plano de Monitoramento e Instrumentação deve ser elaborado na fase de planejamento e projeto, sendo detalhado e complementado, à medida em que se forem obtendo novas informações sobre a obra e seu comportamento.

Na fase de planejamento e projeto, de acordo com Zuculin (2020), é definido o tipo e o arranjo da barragem e, a contar destes, estabelece-se quais as principais grandezas que deverão ser monitoradas pela instrumentação. Esse plano é implementado na fase de construção, de modo a poder controlar eficazmente o comportamento durante o primeiro enchimento do reservatório e ao longo da vida da barragem, até a sua desativação, descaracterização e usos futuros. Além disso, a instrumentação de barragens assume diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra.

O tipo de instrumento é escolhido de acordo com a grandeza a ser medida, levando em consideração a escala, desde a primeira medição até o final da vida útil da estrutura. A compatibilidade entre a magnitude do parâmetro medido e a precisão do instrumento é um aspecto fundamental, bem como seu campo de leitura. A falha nessa combinação pode danificar o dispositivo. Nessa fase, também, se considera a decisão sobre a automação da instrumentação. As grandezas a serem monitoradas em barragens de aterro e de concreto, juntamente como os instrumentos mais comuns para sua medição, podem ser encontradas no Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), *Volume V - Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens* (ANA, 2016a, p. 144-145).

Ao longo da construção é o momento de verificar se as hipóteses de projeto estão evoluindo de forma positiva, se a relação entre os carregamentos e a tensões geradas está conforme especificada, se as deformações estão dentro dos limites previstos, nos maciços, fundação e estruturas anexas, etc. (Zuculin, 2020).

O primeiro enchimento do reservatório, etapa onde a barragem entra em carga total pela primeira vez, é uma das etapas mais relevantes do ponto de vista da segurança, reflete, inclusive, o teste inicial do desempenho da barragem e de suas fundações devendo, portanto, o controle de segurança merecer especial cuidado nessa fase (ANA, 2016a). Neste estágio, as leituras dos instrumentos podem não só reportar a ocorrência de anomalias que possam ameaçar a segurança da estrutura do barramento, como também, servirem de parâmetros de retro análise em modelos matemáticos, conferindo a eficiência e simplificações para novos projetos (Smiderle, 2014).

“A fase de operação engloba toda a vida útil da barragem. Nesta etapa, a barragem vai “trabalhar”, isto é, deformar, recalcar, deslocar, aquecer, esfriar. Passará por situações de cheias e secas e, algumas até, por sismos.” (Zuculin, 2020, p. 18). A instrumentação nesta fase tem por finalidade fornecer dados para verificação contínua das hipóteses de projeto, de maneira geral, monitorar o desempenho da barragem e estruturas associadas, ademais fundação e áreas críticas, indicar se a estrutura está funcionando como previsto, alertar para quaisquer acontecimentos que possam causar riscos à sua segurança (possíveis zonas de riscos), e obter informações para o aprimoramento de projetos de barragens futuras (Oliveira, 2008).

Além da instrumentação das estruturas do barramento pode ser relevante monitorar a área do reservatório, assim como as condições meteorológicas, hidrológicas e limnológicas que podem influenciar o desempenho de alguns instrumentos (Zuculin, 2020).

Em suma, o Manual de Monitoramento pode ser considerado o principal elo entre as fases de projeto, construção e operação de uma barragem. No plano completo de auscultação por instrumentação devem ser previstas todas as etapas supraditas, incluindo as dispostas a seguir (ANA, 2016a e 2016b; Piasentin, 2020). A estruturação dessas etapas são fundamentais para o sucesso do processo.

- Projeto da instrumentação a ser instalada: arranjo, detalhes, especificações dos materiais, instalação e montagem. Após a instalação é fundamental que a barragem tenha a documentação técnica do projeto, da instrumentação e dos desenhos como construído. Na escolha do tipo de instrumento deve-se atentar para os seguintes cuidados: simplicidade de funcionamento e instalação; confiabilidade; sensibilidade, faixa de medição; durabilidade; resistência; estabilidade; custos, operação e manutenção; experiência prévia com sua utilização; assistência técnica do fabricante; automação da coleta dos dados, entre outros (Fonseca, 2003; ANA, 2016a).
- Definição dos valores previstos e limites de comportamento aceitáveis para todos os instrumentos (em todas as fases), estabelecidos em projeto e com base no comportamento esperado da estrutura frente ao parâmetro lido pelo instrumento. Esta definição é importante para traduzir as expectativas do projetista comparativamente a um determinado parâmetro a monitorizar e permitir que as leituras recolhidas ganhem significado e utilidade na avaliação da segurança, nomeadamente nas fases de enchimento e início da operação, quando as equipes de monitoramento ainda não estão totalmente familiarizadas com a obra (Fusaro *et al.*, 2017).
- Plano de operação da instrumentação: deve-se estabelecer uma metodologia de leitura, responsabilidades, procedimentos aplicáveis, frequências das leituras em toda vida útil da obra e durante possíveis casos excepcionais. Recomenda-se ainda que as leituras devem ser programadas com sequência e itinerário fixo; que os leituristas sejam os mesmos, e atuem também como inspetores visuais, no mínimo uma vez por semana, em especial no período operacional, percorrendo os diversos trechos e galerias da barragem. Frequências mínimas recomendadas para leitura dos instrumentos de auscultação, em barragens de aterro e de concreto, para as diferentes fases da vida da barragem, podem ser encontradas no Manual da ANA (2016b).
- Plano de observações visuais e inspeções in situ com suas frequências. Observações análogas ao plano de operação da instrumentação.
- Plano de análise e interpretação do comportamento da barragem baseado nos resultados da instrumentação e das inspeções visuais. As análises destas informações devem ser feitas por profissional habilitado (geólogo e/ou engenheiro geotécnico), de modo que possam ser identificadas eventuais situações anômalas indicativas da necessidade de intervenções corretivas ou de investigações mais detalhadas, tais como análise de estabilidade dos taludes.
- Plano para armazenamento das informações históricas, como relatórios e a base de dados da instrumentação. Refere-se ao tratamento de dados e registros a serem adotados. Levando em conta que ao longo do tempo, estes documentos formarão um histórico de dados, que é essencial para esclarecer eventuais comportamentos inesperados e auxiliar na interpretação dos resultados obtidos.

- Procedimentos de manutenção: trata-se das regras de manutenção, procedimentos, registros e responsabilidades, que devem ser desenvolvidos e implementados para assegurar que os instrumentos sejam mantidos em condições totalmente operacionais e seguras.

Fusaro *et al.* (2017) apresentam sugestões para a estruturação de um Manual de Monitoramento como ferramenta para a segurança de barragens. O artigo divide as atividades de monitoramento em três elementos: inspeção visual, instrumentação e testes em equipamentos eletromecânicos e comenta cada um desses itens, no caso da instrumentação discute-se desde a descrição geral da instrumentação e objetivos, descrição da instrumentação por seção, programa de coleta das leituras da instrumentação, procedimentos para calibração e manutenção dos instrumentos até procedimentos de análise dos dados.

Desta forma, com um plano de monitoramento eficiente, torna-se possível antecipar todos os cenários de ações necessárias para minimizar os danos decorrentes de uma possível ruptura. Contudo, quando as etapas de manutenção preditiva (monitoramento) e preventiva (obras de reparo) não são suficientes para evitar um acidente, é preciso ter regras definidas para serem adotadas, e nesse caso, insere-se o Plano de Ação de Emergência (PAE), cujo objetivo principal é minimizar os danos e fatalidades de eventos catastróficos (Piasentin, 2020).

É importante considerar que a interpretação dos dados fornecidos pela instrumentação é tão relevante quanto a própria existência da instrumentação e o melhor instrumento não é garantia de segurança se os dados obtidos não forem analisados corretamente, além disso, os instrumentos geotécnicos por si só não garantem a segurança estrutural, pois esses são apenas componentes para observação do comportamento da barragem (Silveira, 2006). Smiderle (2014, p. 29) cita que “a instalação de instrumentação sem a análise e interpretação adequadas é o mesmo que não se ter instrumentação alguma”.

Um bom sistema de instrumentação de campo deve ser capaz de examinar as hipóteses de projeto, a adequação dos métodos construtivos e as condições de segurança nas diversas fases da obra (Danese, 1998).

3 SISTEMA INTEGRADO DE SEGURANÇA (SIS)

Um conceito que vem sendo considerado como o mais completo para o controle dessas estruturas é o chamado Sistema Integrado de Segurança (SIS), que discerne a questão sobre três pilares: Técnico-Operacional (T-O); Monitoramento-Vigilância (M-V); e Gestão de Riscos / Emergência (G-E). Onde cada pilar deve ser analisado como uma condição necessária e complementar as outras, que em soma, conserva a barragem segura em todas as suas fases de vida (Perini, 2009; Leite 2019).

A segurança de barragens tem sido controlada por uma abordagem tradicional de engenharia baseada em critérios e normas técnicas vigentes. No SIS essa abordagem refere-se aos dois primeiros componentes supracitados, sendo o T-O responsável pelo controle da segurança estrutural, hidráulica e operacional, aplicados nas fases de projeto, construção, operação e descomissionamento, e o M-V pelo monitoramento, inspeção, auscultação da barragem, detecção e análise da obra (ICOLD, 2005; Melo, 2014; Leite 2019).

Autores como Pimenta (2009), enfatizam a necessidade de a ótica tradicional evoluir para abordagens orientadas para o risco, tratando de forma integrada as ações de desempenho e consequências. Menescal (2004), também, relata a importância de se reconhecer as ameaças aos empreendimentos por meio da metodologia de análise de risco.

É nesse contexto que se insere o terceiro pilar de sustentação da segurança de uma barragem: a Gestão de Riscos / Emergência, compreendendo “a implementação e preparação de todas as medidas e procedimentos necessários para o controle dos riscos e para dar uma resposta aos eventuais acidentes que possam ocorrer numa barragem”, com o objetivo de antecipar a detecção de crises e falhas (Perini, 2009, p. 6). Essa inserção, deve ser encarada como uma complementação da prática tradicional, e não como um senso de substituição.

Conceitualmente, a gestão de riscos de segurança de barragens corresponde a uma série de atividades integradas, tais como a avaliação de risco (identificação, análise e apreciação dos riscos) e controle de risco (mitigação, prevenção, detecção, plano de emergência, revisão e comunicação). Definido o contexto em que se enquadram os controles e padrões de referência, o próximo passo é a avaliação de riscos, que deve: integrar o processo de análise e avaliação de riscos e, também, fornecer recomendações sobre a necessidade de redução destes (ICOLD, 2005; Melo, 2014; Perini, 2009).

É possível realizar uma avaliação de riscos de maneira qualitativa, quantitativa ou com variações dessas abordagens. Os métodos de caráter qualitativo se apoiam em formas descritivas das probabilidades e

consequências, na semiquantitativa, associa-se valores numéricos a essas descrições, enquanto os quantitativos explicitam as incertezas, baseando-se, portanto, em valores numéricos da probabilidade e consequência. A decisão sobre qual abordagem adotar depende do nível de detalhamento desejado, dos tipos de riscos analisados, do objetivo da análise e, principalmente, das informações, dados e recursos disponíveis (Perini, 2009).

Vários são os métodos propostos na literatura: Índices de Risco, Causa e Indicadores de Falhas (LCI), Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) que são considerados essencialmente qualitativos, e as Análises por Árvore de Falhas (FTA) e Eventos (ETA) que podem ser utilizadas tanto qualitativamente como quantitativamente (Melo, 2014).

Os Métodos quantitativos não devem ser considerados mais precisos ou adequados. A análise qualitativa é suficiente, e muitas vezes a única possibilidade, para certos tipos de decisões, seja por falta de informação numérica sobre modos de falha específicos ou devido a recursos e tempo insuficientes. Por outro lado, a qualidade da análise quantitativa depende da precisão e qualidade dos valores numéricos e do modelo analítico escolhido (Fusaro, 2011).

Segundo Yokozawa (2019) é possível analisar com precisão o risco de barragens, mas essa análise requer o cálculo da probabilidade de ruptura, que é resultado de uma abordagem probabilística. Os autores dizem que esse tipo de análise tem sido criticado porque o método de avaliação é considerado subjetivo, o que dificulta o estabelecimento de critérios para a elaboração de um projeto, acabando por tornar a análise determinística mais precisa e segura. No entanto, esta segunda categoria de análise não leva em conta as incertezas, o que torna a avaliação menos confiável.

Rebêlo (2021) afirma que os métodos probabilísticos podem ser interpretados como análises determinísticas complementares. A partir deles, conhecendo a distribuição de probabilidade das variáveis independentes (como os parâmetros do material), pode-se avaliar a distribuição probabilística das variáveis dependentes (como o fator de segurança). A autora destaca que órgãos e normas internacionais, como a ISO (*International Organization for Standardization*) já adotam a teoria de confiabilidade. Mas, os atuais critérios de análise de estabilidade do Brasil, se restringem ao desenvolvimento de projetos com uma filosofia inerentemente determinista. E mesmo reconhecendo a existência de incertezas geotécnicas, os conceitos de confiabilidade para desenvolvimento de projetos funcionam de forma muito limitada.

No caso de barragens, tendo em vista a necessidade de classificar e quantificar os riscos, a Resolução CNRH n.º 143, de 2012 (Brasil, 2012) apresenta critérios qualitativos para a classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei n.º 12.334 de 2010 (Brasil, 2010). A referida Resolução considera risco como a possibilidade de ocorrência de acidente. Sua formulação, no entanto, diverge do formalmente definido e encontrado na literatura, estando restrito às características técnicas e de conservação da barragem e de suas estruturas associadas (Leite, 2019).

Melo (2014) ressalta, porém, que ainda que falha quanto à nomenclatura técnica de risco, a metodologia da Lei n.º 14.066, de 2020 (Lei n.º 12.334 de 2010 atualizada), enquadra-se em uma das “boas práticas” da gestão de segurança de barragens adotadas internacionalmente. O autor citado acrescenta que, além da classificação rápida das barragens, esse método permite uma ponderação primária de possíveis modos de falha da barragem, podendo estabelecer valores de monitoramento. A Lei, também, contempla métodos construtivos, idade do empreendimento, e precedentes para que os reguladores estabeleçam normas de acordo com suas necessidades (Brasil, 2020).

Outra alteração, no âmbito da gestão de riscos, trata-se do primeiro objetivo da Lei n.º 12.334, de 2010, no Art. 3º, Inciso I, anteriormente escrito como: “garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;” (Brasil, 2010), sendo modificado pela Lei n.º 14.066, de 2020, onde é inserido na redação do texto o conceito de “prevenção” quanto à possibilidade de acidentes ou desastres. No último objetivo (Inciso 8) incluiu-se também a necessidade quanto à definição dos procedimentos emergenciais em caso de incidente, acidente ou desastre (Brasil, 2020; Pereira, 2021).

Na PNSB Brasileiras o documento que consolida os procedimentos para o gerenciamento do risco e às respostas a situações de emergência é o Plano de Ação de Emergência – PAE, servindo como uma ferramenta suplementar de apoio à tomada de decisão para cada nível de alerta estabelecido. Este documento agora é obrigatório para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração indiferentemente da sua classificação quanto ao dano potencial associado e ao risco (Brasil, 2020).

Ladeira (2007) destaca que a análise qualitativa de probabilidades para avaliação de riscos aplicados ao gerenciamento de segurança de barragem está se desenvolvendo com rapidez, particularmente nos Estados Unidos, Austrália, Canadá, Noruega e Reino Unido. O autor empregou em sua dissertação o método de análise de segurança ETA com enfoque probabilístico com o intuito de avaliar a possibilidade de ruptura de barragem por piping e o método chamado de UNSW (*University of New South Wales*), que foi desenvolvido na referida Universidade, em Sydney, Austrália.

A barragem da UHE – São Simão foi utilizada pelo autor supradito como estudo de caso e a base de dados na quantificação de rupturas e acidentes históricos conteve 1.462 barragens (aproximadamente 13 % da população mundial de barragens existentes até 1982). O resultado foi uma probabilidade de falha anual estimada por piping em grandes barragens de $4,5 \times 10^{-4}$ por barragem, que se mostrou consistente com os dados históricos coletados no estudo. Os resultados também identificaram pontos-chaves que demandam atenção e ações de prevenção para evitar impactos ambientais decorrentes do rompimento de barragens (Ladeira, 2007).

Outros trabalhos que merecem destaque na Gestão de Riscos com enfoque na avaliação de riscos e sua aplicação na engenharia de barragens através de estudos de casos são: Perini (2009), Melo (2014), Vianna (2015), Yokozawa (2019) e Leite (2019). Em geral os estudos avaliam os impasses na aplicação da abordagem baseada nos riscos e as vantagens decorrentes de seus resultados.

Yokozawa (2019) em sua dissertação aplicou os métodos probabilísticos FOSM (*First Order Second Moment*), PEM (*Point Estimated Method*), HPEM (*Híbrido Point Estimated Method*) e Monte Carlo, a partir de dados estatísticos dos parâmetros de entrada, averiguando as principais diferenças entre eles, assim como suas limitações e vantagens. Foram os objetos do estudo de caso dois tipos de barragens hipotéticas, uma do tipo mista (enrocamento com núcleo de argila) para aproveitamento hidrelétrico, e uma de rejeito, com três alteamentos. Dentre os métodos analisados a autora citou o Monte Carlo como mais confiável e exato, apesar de algumas limitações.

Outro trabalho recente, que conta com uma boa revisão bibliográfica sobre o tema é o trabalho de Leite (2019). Sua pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso exploratório, buscando aperfeiçoar e aumentar a experiência em torno da análise de risco dentro da temática de segurança de barragens, o autor propôs desenvolver um modelo estruturado de suporte ao Processo de Monitoramento e Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Uma grande dificuldade na realização do levantamento de Leite (2019) foi a falta de estatísticas oficiais sobre os acidentes nas barragens brasileiras. A inexistência de uma base de dados histórica com informação sobre a natureza da eventual ruptura, as suas prováveis causas e consequências impede a criação de cenários credíveis capazes de compreender as realidades da engenharia nacional.

Deve-se sempre considerar que a análise de risco é apenas uma etapa de um processo de gestão que não se encerra em si mesmo. O desenvolvimento adicional de pesquisas com base nesta análise não teria sentido sem um foco na manutenção da segurança (Fusaro, 2011).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É inquestionável a essencialidade das barragens para o funcionamento e desenvolvimento da sociedade, uma vez que garantem o abastecimento de água, geração de energia elétrica e a acumulação de rejeitos oriundos da produção minerária e industrial, entre outras funcionalidades. Contudo, adicionalmente aos seus atributos têm-se o potencial de risco dessas obras. A segurança estrutural dessas obras abrange desde a concepção da barragem (projeto), qualidade da construção, manutenção e monitoramento adequados, gestão de emergência eficiente da sua vida útil etc.

Para contribuir na redução do risco de barragens, muitos aspectos estão incluídos. Com a pesquisa, observa-se que uma boa auscultação do barramento possibilita intervenções preventivas e corretivas, minimizando o risco de acidentes, preservando a segurança da estrutura, do meio ambiente e de terceiros em sua área de influência. Permite, também, mitigar incógnitas e incertezas de projeto, tendo como consequência refinamentos progressivos e melhorias nas técnicas de análise de risco e projetos futuros. É importante considerar que a interpretação dos dados fornecidos pela instrumentação é tão importante quanto a própria existência da instrumentação e o melhor instrumento não é garantia de segurança se os dados obtidos não forem analisados corretamente, outrossim, os instrumentos geotécnicos por si só não garantem a segurança estrutural, pois esses são apenas componentes para observação do comportamento da barragem.

A cerca dos modos de falhas observa-se que projetar com foco em modos de falha específicos de uma estrutura permite que as atividades de monitoramento sejam direcionadas para os pontos sensíveis mais críticos, contribuindo desta maneira para um diagnóstico mais preciso do comportamento. Neste aspecto, conclui-se que o Plano de Monitoramento e Instrumentação deve ser elaborado na fase de planejamento e projeto, sendo detalhado e complementado, à medida em que se obtém novas informações sobre a obra e seu comportamento nas suas demais fases, potencializando, por conseguinte, a segurança do barramento.

Salienta-se que não é possível estabelecer uma regra para definir a quantidade de instrumentos. A determinação parte de uma avaliação do projetista. Duas barragens de mesma dimensão, por exemplo, podem ter quantidades diferentes de instrumentos, a depender do seu tipo de fundação. Recomenda-se, porém, na definição do número de instrumentos, a providência de alguns instrumentos de reserva.

Quanto ao SIS, acredita-se que a combinação de análises determinísticas com probabilísticas permite uma otimização nas análises, representando um avanço significativo na avaliação de segurança de barragens, especialmente levando em consideração a variabilidade das propriedades dos materiais e fornecendo resultados relacionados aos níveis de confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas - ANA (Brasil) (2016a) Manual do empreendedor sobre segurança de barragens. *Volume V - Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens*. ANA, Brasília, DF, 156 p. Disponível em: <https://www.snisd.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor>. Acesso em: 1 jun. 2022.
- Agência Nacional de Águas - ANA (Brasil) (2016b) Manual do empreendedor sobre segurança de barragens. *Volume VII - Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens*. Brasília, ANA, Brasília, DF, 135 p. Disponível em: <https://www.snisd.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor>. Acesso em: 1 jun. 2022.
- Andrade, G.S. (2021) Análise de risco integrada à gestão de segurança de barragens. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 218 p.
- Brasil. (2010) Presidência da República. *Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos [...] Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: 9 jun. 2018.
- Brasil. (2012) Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução n.º 143, de 10 de julho de 2012*. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens [...]. Brasília, DF. Disponível em: <<https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20143.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2022.
- Brasil. (2020) Presidência da República. *Lei n.º 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Altera a Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010 [...] Brasília, DF. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm>. Acesso em: 1 fev. 2022.
- Danese, P.C. (1998) *Estudo da transferência de tensões devido a efeitos tridimensionais na Barragem do Zabumbão*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 112 p.
- Fonseca, A.R. (2003) *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, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 158p.
- Fusaro, T.C; Furtado, A.S.O.; Oliveira, V.R.F.; Silva, I.T.C. (2017) Estruturação do manual de monitoramento como ferramenta para a segurança de barragens. *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens*, ano IV, (5), p. 15-21.
- Fusaro, T.C. (2011) Unidade 1: *Análise e gestão de risco*. Curso Segurança de Barragens Volume III. Módulo III: gestão e desempenho de barragens. ANA/FPTI, Itaipu, Foz do Iguaçu.

- Guimarães Filho, U. (2021) *A importância da instrumentação automatizada para a gestão de segurança de barragens*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 49 p.
- International Commission on Large Dams – ICOLD. (2005) *Risk assessment in dam safety management: a reconnaissance of benefits, methods and current applications*. Bulletin 130. ICOLD, Paris, 276 p.
- Ladeira, J.E.R. (2007) *Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos*. O caso UHE São Simão. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 230 p.
- Leite, S.R. (2019) *Modelo para avaliação de riscos em segurança de barragens com associação de métodos de análise de decisão multicritério e conjuntos fuzzy*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 222 p.
- Melo, A.V. (2014) *Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 168 p.
- Menescal, R.A. (Org.). (2004) *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil*. Proágua, Brasília, DF, 314p.
- Oliveira, J.R.C. (2008) *Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra...* Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 263 p.
- Pereira, J.M.L. (2021) *Análise sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens com ênfase nos critérios de monitoramento/instrumentação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 62 p.
- Perini, D.S. (2009) *Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 128p.
- Piasentin, C. (2020) *Unidade 2: Aspectos gerais da segurança de barragens*. Repositório ANA: Curso de Segurança de Barragens. Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais. ANA, Brasília, DF. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/2/Unidade_2-modulo1.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2020. (apostila).
- Pimenta, M.L. (2009) *Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro*. Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Rebêlo, T.S. (2021) *Análise comparativa de métodos analítico e numérico na avaliação de estabilidade de escavação com solo grampeado e cortina ancorada utilizando abordagem probabilística*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/RJ, 162 p.
- Silveira, J.F.A. (2006) *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. 1 ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, 416 p. ISBN 978-85-8623-861-1.
- Smiderle, C.S.D. (2014) *Segurança de barragens: análise da instrumentação da Barragem de Itaúba*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rio Grande Sul, UFRGS, Porto Alegre, 224 p.
- Vianna, L.F.V. (2015) *Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 118 p.
- Yokozawa, S.Y. (2019) *Avaliação dos métodos probabilísticos aplicados na análise de risco devido à instabilidade de barragens*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 111 p.
- Zuculin, S. (2020) *Unidade 2: Instrumentação de Barragens*. Repositório ANA: Curso de Segurança de Barragens. Módulo II: Inspeção e Auscultação de Barragens. ANA, Brasília, DF. (apostila).