

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA DA
INFORMAÇÃO
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (2024)

TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA O MONITORAMENTO DE BARRAGENS – UMA REVISÃO DA
BIBLIOGRAFIA
INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR DAM MONITORING – A LITERATURE REVIEW

Cintia Wiliane da Silva Nogueira
Maxwell Ferreira Lobato

RESUMO

O monitoramento de barragens é uma prática essencial para garantir a segurança estrutural, prevenir desastres e minimizar impactos negativos ao meio ambiente e às comunidades adjacentes. Dada a importância estratégica dessas estruturas, a adoção de tecnologias avançadas no monitoramento têm se tornado cada vez mais relevantes para assegurar sua operação eficiente e sustentável. Dessa forma, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias inovadoras aplicadas ao monitoramento de barragens, com foco nos avanços recentes em sensores de alta precisão, sistemas de monitoramento remoto, inteligência artificial e análises em tempo real. Essas tecnologias permitem a coleta e o processamento de grandes volumes de dados, promovendo uma avaliação contínua e detalhada do comportamento estrutural das barragens e do ambiente ao seu redor. Além disso, a pesquisa analisa a transição dos métodos tradicionais de monitoramento, como inspeções visuais e instrumentos mecânicos, para soluções tecnológicas modernas.

Palavras-chave: Análises em tempo real. Instrumentação geotécnica. Segurança estrutural. Prevenção de desastres. Sustentabilidade

ABSTRACT

Dam monitoring is an essential practice to ensure structural safety, prevent disasters, and minimize negative impacts on the environment and surrounding communities. Given the strategic importance of these structures, the adoption of advanced technologies in monitoring has become increasingly relevant to ensure their efficient and sustainable operation. This paper presents a comprehensive literature review on innovative technologies applied to dam monitoring, focusing on recent advances in high-precision sensors, remote monitoring systems, artificial intelligence, and real-time analytics. These technologies allow the collection and processing of large volumes of data, promoting a continuous and detailed evaluation of the structural behavior of dams and the environment around them. In addition, the research looks at the transition from traditional monitoring methods, such as visual inspections and mechanical instruments, to modern technological solutions.

Key words: Real-time analytics. Geotechnical instrumentation. Structural safety. Disaster prevention. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Barragem é definida como qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas. Sua importância se ampliou ao longo da história contribuindo para o controle de inundações, produção de eletricidade, disponibilização de água para consumo humano, para fins comerciais ou recreação, e ainda na atividade mineração para a contenção de rejeitos (Silva; Silva, 2023).

As barragens podem ser construídas com diferentes elementos, podendo ser de terra, rochas ou enrocamento, alvenaria, rejeitos, concreto ou mistas. A escolha do tipo

de material a ser utilizado varia com as condições geotécnicas e do relevo de cada local, bem como com a finalidade da barragem a ser construída (Santos, 2019).

É conhecido que na história da mineração brasileira e mundial, acidentes ocorrem com relativa frequência. Alguns sequer chegam a ser noticiados pela grande mídia, passando despercebidos pela maioria da população. Todavia, a tragédia ocasionada pelo rompimento da barragem de Fundão foi particularmente dramática, haja vista suas consequências socioambientais de grande amplitude (Lopes, 2015).

O monitoramento de estruturas geotécnicas de mineração, em especial de barragens, passou a ser uma das prioridades para as mineradoras e órgãos fiscalizadores, principalmente após os eventos de ruptura de barragens de mineração no Brasil. Esse fato deve-se à importância do monitoramento, por meio da instrumentação e inspeções de campo, em proporcionar maior previsibilidade e confiabilidade em relação ao comportamento da estrutura, além de cumprir os requisitos legais (Souza *et al.* 2023).

Com isso, infere-se que monitoramento eficaz de barragens, aliado a sistemas de gestão baseados na identificação e avaliação de riscos, é essencial para garantir a segurança operacional e estrutural, prevenindo falhas catastróficas e minimizando impactos ambientais e sociais (Andrade; Cabral, 2022).

O uso mais antigo de instrumentos para monitorar movimentos de terra é datado de 1853, quando medições topográficas foram realizadas na barragem em Cantaria de Grosbois, na França, para observação de deslocamentos da crista. Alguns anos mais tarde, piezômetros foram empregados na Índia, com o intuito de estudar a percolação na fundação de barragens destinadas à irrigação. De 1917 em diante, piezômetros passaram a ser empregados nos Estados Unidos em barragens de terra. As células de pressão surgiram de modificações e alterações dos piezômetros (Silveira, 2006).

Na década de 1970, órgãos como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e o Laboratório Central da Companhia Energética de São Paulo (CESP) passaram a desenvolver uma diversidade de instrumentos para auscultação de barragens de terra, o que permitiu a substituição de muitos instrumentos que antes eram importados, e possibilitou a instrumentação, dentro de bons padrões de qualidade, de muitas barragens construídas na época (Santos, 2019).

Nas décadas seguintes, a instrumentação avançou com a introdução de tecnologias automatizadas, como sensores de vibração, medidores de nível e sistemas de monitoramento em tempo real, que ampliaram a capacidade de detecção de anomalias e responderam de forma mais eficiente a emergências (Andrade; Cabral, 2022).

Com base no exposto, percebe-se que o monitoramento de barragens tem apresentado avanços significativos ao longo do tempo, impulsionados por inovações tecnológicas que aprimoram a capacidade de identificar e prevenir falhas estruturais. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo revisar a literatura atual sobre as ferramentas e métodos mais avançados utilizados no monitoramento de barragens, analisando sua aplicação na prevenção de desastres. Além disso, serão abordados casos recentes de barragens que sofreram rompimentos, tendo como exemplo Brumadinho, uma barragem de rejeito que sofreu rompimento de sua estrutura no ano de 2019, destacando a importância de práticas mais seguras e sustentáveis para esse setor estratégico.

Figura 1 – Vista Frontal da barragem no início da ruptura (embaixo, lado direito).



Fonte: Adaptado de Silva, 2010

Figura 2: Vista aérea (planta) da barragem com indicação da região aproximada do início da ruptura



2. RISCOS E DESAFIOS ASSOCIADOS ÀS BARRAGENS

A segurança de barragens é crucial, especialmente no Brasil, devido ao potencial catastrófico de rompimentos. Este tópico analisa os riscos e desafios, destacando a importância de medidas preventivas, como inspeções e monitoramento, e o papel da tecnologia na mitigação de riscos. Sendo assim, apresentando algumas circunstâncias que pode acarretar esses problemas estruturais.

A construção de uma barragem pode trazer benefícios socioeconômicos, no entanto, também apresenta riscos significativos e impactos de modo sistêmicos ao meio ao qual se integra, sendo o o impacto na saúde humana e sobre os sistemas sociais e ambientais um dos mais danosos à sociedade (Silva; Silva, 2023).

A maioria dos problemas significativos que ocorrem na infraestrutura principal são aqueles associados à falta de procedimentos de manutenção. O alto custo e a longa duração da construção de barragens ditam a necessidade para um programa abrangente de manutenção e proteção online (Soares, 2010).

Os motivos podem ser tanto por falta ou falha durante a fiscalização, em relação à segurança e estabilidade da estrutura, quanto pela inobservância durante a inspeção, podendo causar grandes desastres no futuro (Araújo, 2006).

Conforme Araújo (2006), os rompimentos de barragens de rejeitos podem ser atribuídos a dois fatores principais. O primeiro está relacionado a fenômenos naturais, como tsunamis, terremotos e outros eventos catastróficos que ocorrem nas suas proximidades ou que impactam diretamente sua estrutura. Essas forças externas, muitas vezes imprevisíveis, podem comprometer a estabilidade da barragem, especialmente em locais de maior vulnerabilidade geológica ou climática.

Em concordância com Araújo (2006), o segundo fator está associado a falhas humanas, que podem ocorrer tanto durante o planejamento e construção da barragem quanto em sua operação. Erros de projeto, escolha inadequada de materiais, monitoramento insuficiente e manutenção precária são exemplos de ações ou omissões

humanas que frequentemente figuram como causas predominantes de rupturas, incluindo no contexto brasileiro.

Rompimentos de barragens alteram aspectos ecológicos, econômicos e sociais e reduzem ou até eliminam a confiança das pessoas nas empresas e nas instituições governamentais. Entre os fatores que contribuem ou que são a causa de comprometimento ou colapso das estruturas das barragens, estão: o projeto ou a localização inadequada, processo de construção e de operação negligenciados levando ao comprometimento da estabilidade física ao longo do tempo (Silva; Silva, 2023).

O conceito de Segurança de Barragens pode ser definido como sendo a providência de condições que vise manter a integridade estrutural e vise manter a integridade estrutural e operacional da barragem e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (Brasil, 2010).

Dessa forma, a evolução tecnológica tem impulsionado o avanço dos sistemas de segurança em praticamente todas as áreas do conhecimento, incluindo a engenharia de barragens, que também absorveu essas inovações. No entanto, rompimentos de barragens ainda ocorrem, evidenciando a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre a aplicação dessas novas tecnologias e detalhar seu potencial para elevar o nível de segurança e a qualidade do monitoramento de barragens (Pereira, 2021).

3. PRINCIPAIS MÉTODOS DE MONITORAMENTO TRADICIONAIS

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).

De acordo com Medeiros (2020), a ciência que trata da segurança de barragens não apenas previne desastres, mas também monitora continuamente a "saúde" da estrutura ao longo de sua vida útil. Esse cuidado é realizado por meio de inspeções visuais sistemáticas e do uso de ferramentas específicas que auxiliam na detecção de alterações ou anomalias na estrutura.

Além da ficha de inspeção, existem diversos métodos e tecnologias disponíveis para coletar informações detalhadas sobre uma barragem e seus elementos

estruturais. A instrumentação, por exemplo, é uma técnica amplamente utilizada para monitorar o comportamento de uma barragem e suas fundações ao longo do tempo (Cruz, 1996). Utiliza-se uma variedade de instrumentos na barragem para obter dados, como os mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos. Esses instrumentos são essenciais para monitorar a integridade estrutural e o comportamento da barragem (Machado, 2007).

Segundo Silveira (2006), nas últimas décadas, o Brasil avançou significativamente no desenvolvimento de instrumentos para o monitoramento de barragens de terra e enrocamento. Entre as inovações destacam-se a produção de novos tipos de medidores de recalque, piezômetros em diferentes versões – elétricos, hidráulicos e pneumáticos. Além disso, foram introduzidas células de pressão total e acessórios aprimorados para inclinômetros e medidores de vazão.

3.1. Instrumentação para monitoramento de Barragens

3.1.1 Piezômetros

Os piezômetros têm por objetivo determinar as pressões neutras em maciços de terra ou de rocha. Estão entre os instrumentos mais importantes para a segurança de barragens, de forma que apresentam inúmeros tipos, para que o mais adequado para cada circunstância seja escolhido (Santos, 2019).

As pressões internas nas fundações, originadas tanto pela carga hidráulica do reservatório quanto pelas tensões de carregamento decorrentes da construção do barramento, desempenham um papel crucial na análise do desempenho do sistema de drenagem interna e na eficácia dos dispositivos de vedação.

Monitoram as pressões neutras que ocorrem nas fundações e corpo da barragem, permitindo verificar as condições de percolação no maciço compactado e as variações de pressão provocadas pelas alterações dos níveis de água do reservatório (Ibrahim; Jardini; Magrini; Torikai, 2010).

3.1.2 Piezômetros Elétricos

São piezômetros constituídos por um diafragma de aço inoxidável no qual são fixados extensômetros elétricos de resistência, oferecendo os mais baixos tempos de resposta entre os piezômetros de membrana (Fonseca, 2003).

O piezômetro é instalado em um poço, com o espaço anular entre o filtro

poroso e as paredes do poço preenchido com uma mistura de cimento e bentonita ou com areia. A água presente no solo migra para o reservatório do piezômetro, causando o deslocamento do diafragma até que a pressão interna do reservatório se iguale à pressão da água nos poros do solo, correspondente à elevação do filtro poroso (Silveira, 2006).

Uma vez que os piezômetros de membrana, compostos por um diafragma de aço inoxidável com extensômetros elétricos de resistência, destacam-se pela rápida resposta às variações de pressão. Instalados em poços, seu funcionamento baseia-se na migração da água do solo para o reservatório interno, deslocando o diafragma até que a pressão interna se equilibre com a pressão nos poros do solo. Essa tecnologia é essencial para medições precisas e confiáveis em estruturas geotécnicas.

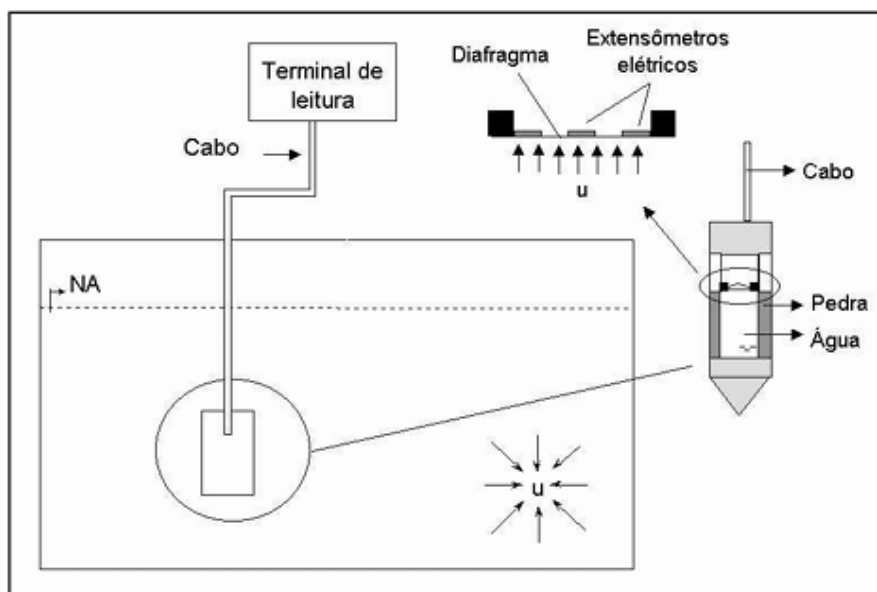
Conforme observado na figura 1, as deflexões do diafragma são acompanhadas por variações imediatas da resistência dos extensômetros afixados na sua superfície e uma conseqüente resposta diferenciada do sinal elétrico de saída (de magnitude proporcional à poropressão medida) e captada em um medidor externo (Fonseca, 2003)

Figura 1: Piezômetro elétrico de corda vibrante modelo VW2100 da RST Instruments.



Fonte: RST Instruments (2023).

Figura 2: Representação esquemática do modelo de piezômetro elétrico



Fonte: FONSECA (2003, p. 42)

3.1.3 Piezômetros Hidráulicos

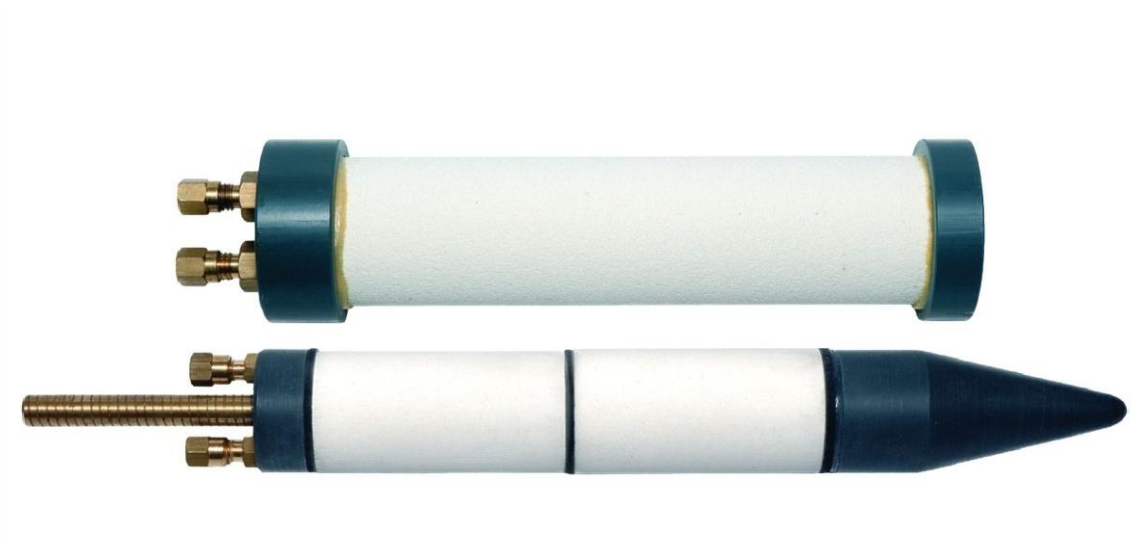
Os piezômetros hidráulicos possuem um filtro poroso que envolve um reservatório de água, conectado a um manômetro por meio de tubos flexíveis preenchidos com água. Esses tubos permitem a circulação da água no sistema, garantindo a remoção do ar e a manutenção do reservatório completamente cheio. Os piezômetros laváveis, por sua vez, são instalados em poços totalmente selados com argamassa, que atua como um filtro secundário, auxiliando na saturação do sistema sob a influência da sucção. Caso haja formação de ar no piezômetro, ele pode ser eliminado através da circulação de água nos tubos hidráulicos (Fonseca, 2003).

Entre as vantagens potenciais desse instrumento estão sua simplicidade de operação, alta confiabilidade e rapidez na resposta, mesmo em solos com baixa permeabilidade, como também de que não precisará de eletricidade, distinto do piezômetro elétrico, já a sua desvantagem é de que pode exigir manutenção frequente

para evitar entupimentos.

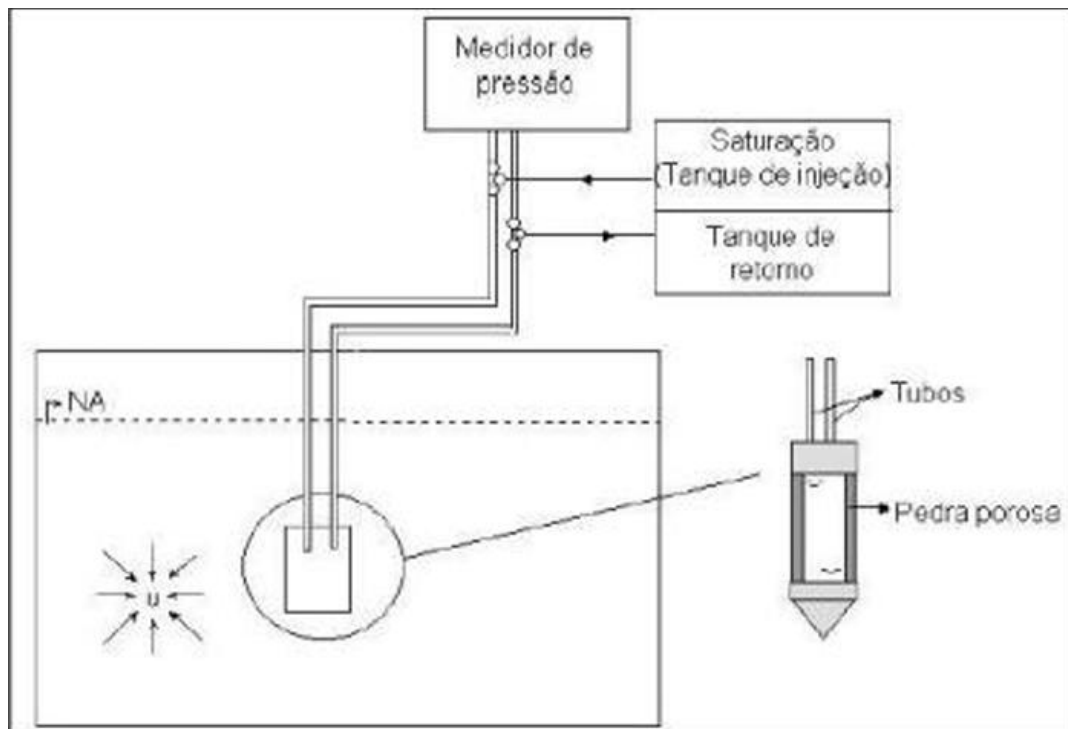
Além disso, conforme observado na figura 2 pode-se atentar que ele permite a realização de ensaios de permeabilidade in situ, tanto com carga variável quanto constante, mede poropressões negativas e não interfere nas atividades construtivas, tornando-se uma ferramenta versátil e eficiente para aplicações geotécnicas (Fonseca, 2003).

Figura 3: Piezômetro hidráulico do modelo W2



Fonte: Loja virtual GEOTEKNIK

Figura 4: Representação esquemática do modelo de piezômetro hidráulico



Fonte: FONSECA (2003, p. 38)

3.1.4 Piezômetros Pneumáticos

De acordo com Silveira (2006), os piezômetros pneumáticos são amplamente utilizados no monitoramento de pressões de água em barragens e estruturas geotécnicas. O funcionamento desses dispositivos baseia-se no uso de um gás pressurizado, como ar comprimido ou nitrogênio, que é introduzido no sistema até alcançar o equilíbrio de pressão com a água presente no solo. Esse equilíbrio é registrado por um manômetro conectado ao sistema, permitindo a medição precisa das pressões intersticiais.

Este instrumento consiste em um sensor piezométrico pneumático, inserido em um furo de sondagem pré-perfurado por meio de uma estrutura de suporte, ou até mesmo, em determinadas ocasiões, cravados em solo mole. Conforme observado na figura 3, pode-se observar que o sensor é envolto em areia, por onde o fluxo da água subterrânea percola até atuar também no sensor, que por sua vez é submetido à uma determinada poro-pressão (Cerqueira, 2017).

Os piezômetros pneumáticos monitoram pressões de água em barragens utilizando gás pressurizado, como ar comprimido ou nitrogênio, para equilibrar a pressão com a

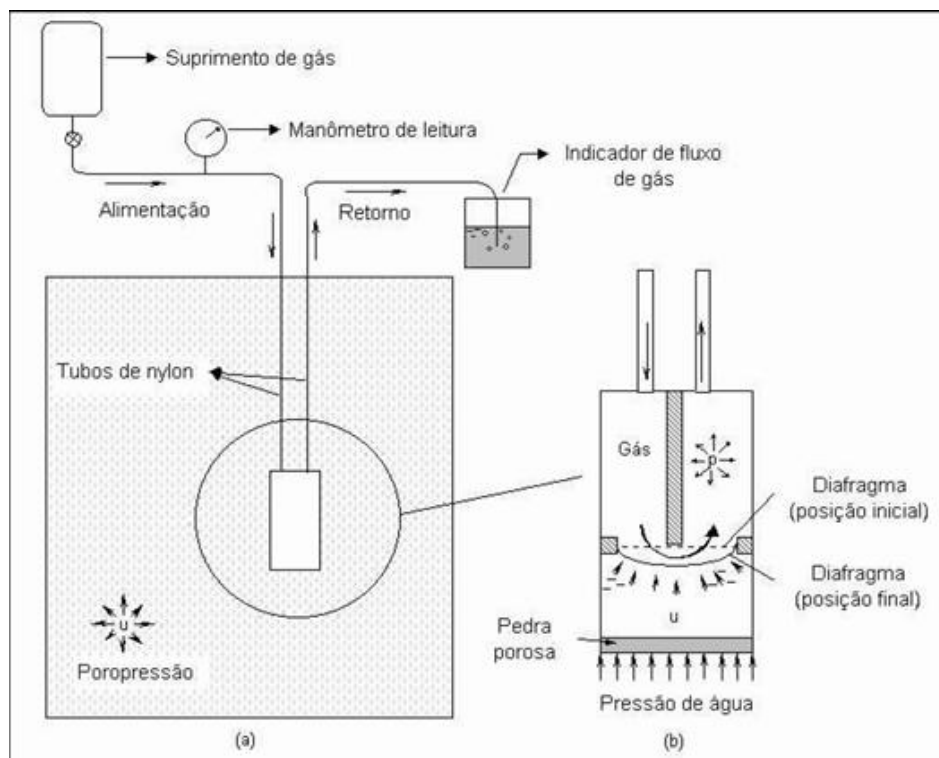
água nos poros do solo. Sendo assim, uma de suas vantagens é uma boa precisão e sendo menos sensível a entupimentos do que os hidráulicos, já uma de suas desvantagens é o motivo da leitura ser intermitente, ou seja, ela não é contínua.

Figura 5: Piezômetro pneumático FPC-2 Rocktest



Fonte: Loja virtual AMPERE

Figura 6: Representação esquemática do modelo de piezômetro pneumático



4. TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA O MONITORAMENTO DE BARRAGENS

As tecnologias inovadoras para o monitoramento de barragens desempenham um papel essencial no fortalecimento da segurança e na eficiência operacional dessas estruturas. Diante da crescente preocupação com falhas e riscos associados, novos métodos e ferramentas têm sido desenvolvidos para aprimorar a coleta e análise de dados.

Desde a década de 1970, o avanço da tecnologia de sensoriamento remoto tem viabilizado o mapeamento do uso e da cobertura do solo por meio de imagens orbitais. Como parte de uma iniciativa conjunta entre a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Comissão Europeia, no âmbito do Programa Copernicus, foi lançada em 2014 a série de satélites Sentinel, que tem se aprimorado continuamente desde então (Embrapa, 2020).

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm sido amplamente utilizadas no monitoramento ambiental, incluindo o acompanhamento de barragens. Essas redes consistem em diversos sensores distribuídos que coletam e transmitem dados em tempo real, permitindo a detecção precoce de anomalias e a prevenção de desastres (Baiocchi *et al.*, 2012).

Um exemplo de aplicação de RSSF (Redes de Sensores Sem Fio) no monitoramento de barragens é o uso de sensores para medir parâmetros como pressão, umidade e movimentação estrutural. Esses dados são transmitidos sem fio para uma central de controle, onde são analisados para identificar possíveis riscos (Baiocchi *et al.*, 2012).

Além do potencial gerado pelo baixo nível de monitoramento atualmente realizado em barragens, a implementação de um sistema de monitoramento baseado em IoT representa um avanço significativo na gestão dessas estruturas. Nos últimos anos, o setor tem se mostrado mais receptivo às inovações tecnológicas, e a adoção de IoT no monitoramento de barragens é um exemplo claro dessa transformação (Santos, 2018).

As aplicações da Internet das Coisas (IoT) têm o potencial de melhorar significativamente a qualidade de vida das pessoas, especialmente no que diz respeito à preservação de vidas em cenários de desastres. Podendo citar de exemplo, um sistema de

monitoramento regional pode ser utilizado para gerar alertas à comunidade quando os dispositivos de sensoriamento detectarem mudanças que sugerem o início ou uma alta probabilidade de ocorrência de um desastre. Esses alertas em tempo real podem permitir que as autoridades e a população tomem medidas preventivas rapidamente, minimizando os danos (Perez; Pereira, 2019).

O uso de drones para o monitoramento de barragens, sejam de terra ou de concreto, oferece uma solução eficaz, econômica e segura para inspecionar locais de difícil acesso, reduzindo riscos que foram notados. Equipados com sensores avançados, como câmeras de alta resolução e termográficas, eles possibilitam análises detalhadas e em tempo real das condições estruturais, facilitando a identificação precoce de anomalias e a coleta ágil de dados. Essa tecnologia contribui para a manutenção preventiva e para a segurança operacional dessas infraestruturas críticas (Bitencourt, 2024).

Nos últimos anos, a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem se intensificado, impulsionada pela sua crescente popularização entre a sociedade civil. Entre as diversas aplicações dos VANTs na engenharia, destaca-se a geração de informações topográficas, que são obtidas através do levantamento de seções transversais em cursos hídricos. Essa técnica é especialmente útil para auxiliar nos estudos de rompimento de barragens, além de atender a legislação federal específica, facilitando a obtenção de dados em áreas de difícil acesso e com grande declividade (Oliveira; Paiva; Tschiedel, 2017).

A inteligência artificial (IA), através de técnicas avançadas como aprendizado de máquina (ML) e aprendizado profundo (DL), oferece uma abordagem inovadora e eficaz para a detecção de danos estruturais em tempo real ao analisar sinais de vibração, como aceleração e deslocamento. Sendo assim, destacam-se por prever e identificar deteriorações antes que se tornem críticas, aumentando a segurança estrutural. A habilidade de lidar com grandes volumes de dados coletados por sensores distribuídos estrategicamente permite análises detalhadas e decisões fundamentadas em informações robustas (Alves; Cury, 2023).

O avanço tecnológico tem permitido a aplicação de técnicas de Machine Learning na engenharia civil, possibilitando a extração de informações valiosas e a identificação de padrões complexos e anomalias a partir de grandes volumes de dados. Isso auxilia na análise e tomada de decisões sobre a segurança das barragens, proporcionando uma abordagem mais precisa e eficiente para a gestão de riscos. Essas técnicas complementam, mas não substituem, as inspeções visuais e outras formas

tradicionais de monitorização, oferecendo uma visão abrangente e baseada em dados sobre o comportamento estrutural das barragens (Mendes, 2023).

No Distrito Federal (DF), a Companhia Energética de Brasília (CEB), em colaboração com pesquisadores da UnB, iniciou um projeto de pesquisa e desenvolvimento para estudar a ocorrência de piping em barragens. O projeto, denominado AINOA, visa implementar um Sistema de Monitoramento de Patologias Internas em Barragens de Terra e Enrocamento, utilizando Inteligência Artificial e Internet das Coisas na barragem do Paranoá, no Distrito Federal. O monitoramento será realizado por meio de sensores piezoelétricos e geofones, com a criação de um sistema integrado de gerenciamento de dados em tempo real (Barros, 2020).

Na pesquisa de Lima (2010), foi desenvolvido um sistema inovador de auscultação civil para monitoramento de barragens, implementado na barragem de Porto Primavera, localizada em Rosana, São Paulo. O trabalho teve como foco principal o desenvolvimento e a adaptação de sensores, com o objetivo de comparar o desempenho de diferentes tecnologias de sensoriamento aplicadas a piezômetros e medidores de vazão. A meta do projeto foi a instalação de um sistema piloto na barragem da usina hidrelétrica, possibilitando a análise das condições de operação em ambiente real. De acordo com os resultados apresentados, tecnologias como os MEMS (Sistemas Microeletromecânicos) demonstraram um desempenho satisfatório. Contudo, algumas técnicas e sensores enfrentaram dificuldades devido às condições adversas do ambiente, caracterizado por altas temperaturas e elevada umidade.

Raminelli (2013) apresentou um sistema instalado na Usina Hidrelétrica Mauá, localizada no Rio Tibagi, no Estado do Paraná, que utilizou uma estação robotizada para realizar medições estruturais. O sistema monitorou ângulos verticais e direções horizontais, permitindo a análise do comportamento dos pontos da estrutura da barragem por meio da comparação das coordenadas obtidas em diferentes períodos, destacando que, com os avanços da Internet das Coisas (IoT), esse tipo de sistema pode ser aprimorado com sensores inteligentes conectados, permitindo monitoramento em tempo real, maior precisão e agilidade na detecção de anomalias estruturais.

Segundo Nadal (2017), o avanço tecnológico na instrumentação transformou ferramentas clássicas de topografia, como goniômetros e teodolitos, em estações totais robotizadas, que, equipadas com servos-motores, automatizam a coleta de dados, reduzindo significativamente os erros humanos e aumentando a precisão na detecção de deformações e deslocamentos. Essa tecnologia tem mostrado resultados

expressivos no monitoramento de barragens, incluindo maior precisão na identificação de mudanças estruturais, incremento da segurança devido à capacidade de gerar métricas confiáveis ao longo do tempo, eficiência operacional pela redução de intervenções manuais e prevenção de riscos por meio de ações preventivas mais assertivas, baseadas em dados robustos.

A integração de metodologias tradicionais de inspeção visual com tecnologias avançadas oferece uma abordagem abrangente e eficaz para avaliar a segurança e integridade das barragens de terra. Ao combinar a experiência e familiaridade das metodologias tradicionais com os benefícios das novas tecnologias, é possível obter uma visão mais detalhada e precisa das condições da barragem, melhorando a capacidade de detectar precocemente anomalias e prevenir potenciais falhas (Calheiros, 2024).

5. DESAFIOS E LIMITAÇÕES DAS TECNOLOGIAS INOVADORAS

A avaliação de tecnologias de monitoramento estrutural não apenas constitui um campo de estudo essencial para a garantia da segurança e eficácia de grandes obras, mas também envolve importantes questões relacionadas à segurança e privacidade. Sistemas avançados geram dados sensíveis que podem ser alvo de ciberataques ou uso indevido, exigindo estratégias robustas, como criptografia e autenticação, para proteger informações e mitigar riscos (Freitas, 2024).

De acordo com o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (Brasil, 2016), pretende-se estabelecer orientações gerais quanto às metodologias e procedimentos a ser adotados pelos empreendedores, visando a assegurar adequação das condições de segurança para as barragens pelas quais são responsáveis, ao longo das diversas fases da vida das obras, designada mente, as fases de planejamento e projeto, de construção e primeiro enchimento, de operação e de descomissionamento (desativação).

O custo de um projeto de instrumentação começa pela elaboração do plano de instrumentação, que é desenvolvido em sua concepção básica com a análise detalhada das necessidades da barragem. Esse plano envolve a definição dos tipos de instrumentos a serem utilizados, a quantidade necessária, os pontos críticos de monitoramento, os tipos de medidas a serem obtidas e a frequência das leituras. Além disso, é fundamental considerar os custos de implementação, que englobam a aquisição dos equipamentos, sua instalação e a integração dos sistemas de leitura e controle. Igualmente importante é a avaliação dos custos de manutenção ao longo do tempo, incluindo calibração periódica

dos instrumentos, substituição de componentes e eventuais reparos, garantindo assim a confiabilidade e a eficácia do sistema de monitoramento (Machado, 2007).

De acordo com dados disponíveis na literatura, o custo de um programa de instrumentação em barragens atualmente varia entre 0,5% e 1,0% do custo global do empreendimento. No entanto, no passado, esses valores eram significativamente mais elevados, situando-se entre 20% e 30%. Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, aos altos custos de importação dos equipamentos à época. A redução ao longo dos anos reflete avanços tecnológicos, a nacionalização de equipamentos e o aumento da competitividade no mercado, tornando a instrumentação mais acessível e economicamente viável (Silveira, 2006).

Os índices de estimativa de custo são ferramentas úteis para prever gastos em projetos de engenharia quando há poucas informações detalhadas. Na manutenção de instrumentos, o custo é influenciado pelo tipo de equipamento, sua complexidade, frequência de manutenção, ambiente operacional e disponibilidade de peças sobressalentes. Esses índices consideram fatores como custo inicial, ciclo de vida útil, mão de obra especializada e histórico de falhas (Mattos, 2006).

6. PERSPECTIVAS FUTURAS E TENDÊNCIAS

Os avanços recentes e a aplicação de tecnologias modernas de monitoramento, já consolidadas em outros setores da engenharia civil e da mineração, têm gerado expectativas promissoras para o aprimoramento do controle e segurança de barragens. Entre essas tecnologias destacam-se o radar terrestre, o radar satelital InSAR, sistemas de microsísmica, estações totais robóticas e drones. Essas ferramentas apresentam a capacidade de fornecer dados em tempo quase real, com alta precisão e cobrindo extensas áreas, o que as torna particularmente adequadas para monitorar estruturas de grande porte e de alta criticidade (Souza et al., 2023).

A princípio, a implementação de tecnologias de monitoramento de barragens exige um entendimento aprofundado de sua aplicabilidade, benefícios e limitações. A redundância no monitoramento é crucial, pois permite a validação cruzada de dados e funciona como um sistema de contingência, garantindo a continuidade do monitoramento em caso de falha de equipamentos. Portanto, a combinação de diferentes tecnologias é uma estratégia eficaz para aumentar a confiabilidade e a robustez dos sistemas de monitoramento de barragens (Souza; Pimentel; Martins; Lima; Sá, 2023).

A Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) no Brasil, com o objetivo de garantir que as barragens atendam aos requisitos de segurança necessários. Essa política visa minimizar a probabilidade de acidentes e seus impactos, estabelecendo regras e critérios rigorosos para a segurança dessas estruturas (Brasil, 2010).

Nesse contexto, garantir a segurança de uma barragem depende da identificação e correção tempestiva de anomalias, deste modo a realização de inspeções visuais regulares desempenha um papel crucial, permitindo o monitoramento contínuo das condições estruturais e operacionais da barragem. Essas inspeções são regulamentadas pelo art. 9º da Lei nº 12.334/2010, que estabelece diretrizes claras para a realização de inspeções regulares, destinadas à manutenção preventiva, e especiais, voltadas para a avaliação de situações críticas ou emergenciais (Brasil, 2010).

7. CONCLUSÃO

Em conclusão, esta pesquisa explorou o panorama das tecnologias inovadoras aplicadas ao monitoramento de barragens, com o objetivo de contribuir para a análise crítica e a revisão bibliográfica deste tema crucial. A revisão realizada revelou um progresso notável no desenvolvimento de ferramentas e métodos mais eficazes e seguros, impulsionado pela necessidade de garantir a integridade dessas estruturas complexas e a segurança das comunidades. Os avanços tecnológicos destacados, como a aplicação de sensores de última geração, técnicas de análise de dados em tempo real e o uso de inteligência artificial, representam um salto qualitativo no monitoramento de barragens. A capacidade de coletar e analisar dados com precisão e em tempo real permite a identificação precoce de anomalias e a previsão de riscos, possibilitando a adoção de medidas preventivas e mitigadoras. A integração de diferentes tecnologias, como o uso de drones e imagens de satélite, amplia ainda mais o potencial de monitoramento, proporcionando uma visão abrangente e detalhada das condições da barragem.

Apesar dos avanços significativos, ainda existem desafios a serem superados, como a necessidade de desenvolver soluções específicas para diferentes tipos de barragens e condições climáticas. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas tecnologias são essenciais para aprimorar o monitoramento de barragens e garantir a segurança das comunidades. Em suma, esta pesquisa consolidou o conhecimento existente sobre as tecnologias inovadoras para monitoramento de barragens, destacando

os avanços, os desafios e as oportunidades para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, H. M. M. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**, 2004. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em : [https://www.abge.org.br/img/biblioteca/24_Affonso_2005 .pdf](https://www.abge.org.br/img/biblioteca/24_Affonso_2005.pdf) . Acesso em: 22 nov 2024

ANDRADE, T.; CABRAL, E. **Monitoramento de Barragem de Rejeito: Importância do Controle e Instrumentação**, 2022. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/57835/1/EDUARDA_CABRAL.pdf. Acesso em: 12 nov 2024

ARAUJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/452823382/CONTRIBUICAO-AO-ESTUDO-DO-COMPORTAMENTO-DE-BARRAGENS-DE-REJEITO-DE-MINERACAO-DE-FERRO-Cecilia-Bhering-de-Araujo>. Acesso em: 22 Nov 2024

BAIOCCHI, O.; CARVALHO, F.; LEAL, B.; SANTOS, J. Aplicações Ambientais de Redes de Sensores Sem Fio. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 2, n. 1 a 3, 2012. Disponível em: <http://doi.org/10.12721/2237-5112.v02n01a03>. Acesso em: 15 dez 2024

BARROS, Matheus Lima. **Machine Learning aplicado à previsão de piping em Barragens de terra homogêneas**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, 2020. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?user=aEFn_dIAAAAJ&hl=pt-BR. Acesso em 19 Jan 2025

BITENCOURT, Hanna Patrícia Gomes. **Uso da Tecnologia de drones em Barragens: Um estudo exploratório por meio da teoria do enfoque meta analítico consolidado**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Busca/Download?codigoArquivo=169115&tipoMidia=0. Acesso em : 20 Dez 2024

BRASIL, Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a política nacional de segurança de barragens**. Disponível: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**. ANA (Agência Nacional de águas). Brasília, 2016.

CALHEIROS, Yasmim Rayane Silva Cavalcante. **Novas ferramentas e tecnologias para Inspeção visual e acompanhamento de Barragens de terra**, 2024. Artigo Científico de Pós-Graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br>

CRUZ P. T. 100 barragens brasileiras: **casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo. Oficina de textos, 1996. Disponível em: <https://www.ofitexto.com.br/100-barragens-brasileiras/>

FAGGION, P.; NADAL, C.; NADAL, M.; SOARES, M.; VEIGA, L. Emprego de estações totais robotizadas na automação, controle e aquisição de dados, voltado ao monitoramento. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n.1, p. 018-030, 2017. Baiocchi. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315956074_Emprego_de_estacoes_totais_robotizadas_na_automacao_controle_e_aquisicao_de_dados_voltado_ao_monitoramento_d_e_barragens

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**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.]. Disponível em : <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6431>. Acesso em : 16 Dez 2024

FREITAS, Gabriel Fonseca. **Avaliação de Tecnologias de Monitoramento Estrutural em Obras de grande porte**, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Católica de Goiás. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/8677>. Acesso em: 08 Jan 2025

IBRAHIM, R.; JARDINI, J.; LIMA, B.; MAGRINI, L.; TORIKAI, D. **Sensoriamento para Segurança de Barragens de Usina Hidrelétricas**, 2010.

ICOLD. **Crerios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás, 2003.

LIMA, V.; MARTINS, A.; PIMENTEL, K.; SÁ, L.; SOUZA, N. **Gestão do Monitoramento Geotécnico de Barragens de Mineração**, 2023. Disponível em: https://cbdbwebuploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/ckeditor/attachments/1420/054_-_Gest%C3%A3o_do_Monitoramento_Geot%C3%A9cnico_rev.0.pdf. Acesso em: 18 Jan 2025

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**, 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf>. Acesso em : 16 Dez 2024

MATTOS A.D. **Como preparar orçamentos de obras: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos**. 1ª ed., Pini, São Paulo, 286p, 2006. Disponível em : https://www.academia.edu/download/51804529/Como_preparar_orcamentos_de_obras_-_Aldo_Dorea_Mattos.pdf. Acesso em: 02 Jan 2025

MEDEIROS, Carlos Henrique de A. C. **Curso de segurança de barragens**. Rio de Janeiro: Agência Nacional de Águas, 2020.

PEREIRA, João Marcelino Lacerda. **Análise sobre a política Nacional de Segurança de Barragens com ênfase nos critérios de Monitoramento/ Instrumentação**, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26071/1/GP_COECI_2021_1_15.pdf. Acesso em : 18 Nov 2024

PEREZ, R. R.; PEREIRA, F. C. Internet das coisas (iot). **PROJETOS E RELATÓRIOS DE ESTÁGIOS**, v. 1, n. 1, p. 1–40, 2019.

RST INSTRUMENTS. **Vibrating Wire Piezometer**. Canada, 2 p, 2020.

SANTOS, Laryssa Cortes. **Estudo sobre a Instrumentação de barragens de terra e rejeitos**, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1. ed. [S. l.]: Oficina de textos, 2006. Disponível em : <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28051/4/EstudoSobreInstrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 18 dez 2024

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos. Colaboração técnica para o livro Tratamento de Minérios**. Edição 5 . Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). 2010.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**, 2008. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG.

OLIVEIRA, V.; PAIVA, R.; TSCHIEDEL, A. **Utilização de Vants de pequeno porte em estudos de rompimento de Barragens**, 2017. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/ArthurTschiedel/publication/322603174_USE_OF_SMALLSCALE_UAVS_IN_DAMBREAK_STUDIES/links/5a624d154585158bca4c521b/USE-OF-SMALL-SCALE-UAVS-IN-DAMBREAK-STUDIES.pdf. Acesso em: 05 Jan 2025