

ADAPTAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS EM BARRAGENS A MONTANTE: CASO BRASILEIRO

OLIVEIRA, Bruno Aparecido de ¹; SCACCHETTI, Micaella Sachie Izumi ¹;
Prof. Me. Rafael Augusto Valentim da Cruz Magdalena ²

Universidade São Francisco

bruno.aparecido@mail.edu.br ; micaella.scacchetti@mail.usf.edu.br ;

¹ Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

² Professor Orientador, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

RESUMO. O Brasil é o quinto maior país do mundo, tendo uma rede hidrográfica muito rica e possuindo um relevo sem grandes dificuldades de ocupação, estas características favorecem a instalação de barragens. Infelizmente o Brasil sofreu catástrofes recentes ligadas a barragens, que evidenciaram a vulnerabilidade dessas estruturas e os impactos catastróficos associados. Além disso, há uma carência de tecnologias modernas de monitoramento e diagnóstico em barragens no Brasil, apesar dos avanços em áreas como inteligência artificial, sensoriamento remoto e IoT, que podem ser adaptados para esse contexto. Este artigo analisa a adaptação de tecnologias de diferentes áreas para identificação de patologias em barragens de rejeitos a montante, destacando como essas inovações podem ser aplicadas no contexto brasileiro. Para atingir o objetivo do artigo será realizado um levantamento dessas tecnologias, avaliando sua potencialidade para averiguar patologias específicas encontradas em desastres históricos como os rompimentos das barragens em Brumadinho e Mariana. Após o levantamento das tecnologias verificaremos como elas poderiam ser aplicadas a um caso real de rompimento no Brasil. Este artigo traz como resultado possíveis avanços na segurança das barragens, fato benéfico à sociedade.

Palavras-chave: Monitoramento; Segurança; Inovação.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto maior país do mundo, tendo uma rede hidrográfica muito rica e possuindo um relevo sem grandes dificuldades de ocupação, estas características favorecem a instalação de barragens.

Segundo Comitê Brasileiro de Barragens (2011), a mais antiga barragem que se tem notícia no território brasileiro foi na década de XVI na área urbana do Recife-PE, antes mesmo da invasão holandesa. Atualmente conhecido como açude Apipucos. ANA (2019) cita que as indústrias de mineração começaram a investir na construção de barragens de contenção de rejeitos em 1930, nessa época apresentavam problemas frequentes de segurança, devido a técnicas de engenharia menos desenvolvidas e à falta de regulamentação. É importante considerar que a mineração estava em um período de intensificação em várias partes do mundo. Especialmente na América Latina e na Europa, com exploração de minérios como ouro, prata, cobre e outros.

Barragem a montante é um tipo de barragem construída em um ponto do rio ou corpo d'água que retém água acima da estrutura, ou seja, “a montante” se refere a área que está rio

acima. Este tipo de barragem é projetado para armazenar água em um reservatório que está localizado na parte superior da barragem. A estrutura, geralmente, é feita de materiais como solo compactado, rocha ou concreto, e a construção utiliza o princípio da gravidade para estabilizar a estrutura. Podem ser utilizados para diversos fins, como geração de energia hidrelétrica, controle de cheias, irrigação, abastecimento de água, recreação e contenção de rejeitos.

Infelizmente o Brasil sofreu catástrofes recentes ligadas a barragens, que evidenciaram a vulnerabilidade dessas estruturas e os impactos catastróficos associados. Além disso, há uma carência de tecnologias modernas de monitoramento e diagnóstico em barragens no Brasil, apesar dos avanços em áreas como inteligência artificial, sensoriamento remoto e IoT, que podem ser adaptados para esse contexto.

A tecnologia está cada vez mais avançada e revolucionando a engenharia civil de várias maneiras, trazendo inovações que melhoram a eficiência, segurança e sustentabilidade dos projetos. Uma das principais é a internet das coisas (IoT), que refere-se à interconexão de dispositivos do cotidiano à internet, permitindo que coletem, compartilhem e analisem dados em tempo real. Esta tecnologia está transformando diversos setores, incluindo a engenharia civil, saúde, agricultura, transporte e muitos outros.

Por isso o objetivo deste artigo é analisar a adaptação de tecnologias de diferentes áreas para identificação de patologias em barragens de rejeitos a montante, destacando como essas inovações podem ser aplicadas no contexto brasileiro.

A metodologia adotada será um levantamento dessas tecnologias, avaliando sua potencialidade para averiguar patologias específicas encontradas em desastres históricos como os rompimentos das barragens em Brumadinho e Mariana. Após o levantamento das tecnologias verificaremos como elas poderiam ser aplicadas a um caso real de rompimento no Brasil. Acreditamos que vivemos em um momento em que as tecnologias podem contribuir ativamente na prevenção de desastres, especialmente associadas a rompimento de barragens.

Tecnologias em função da humanidade

A crescente incidência de desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração no Brasil, como os ocorridos em Brumadinho e Mariana, ressalta a urgência de novas abordagens tecnológicas para prevenir tais eventos catastróficos.

[...] O progresso das tecnologias de implementação de barragens de rejeitos foi sempre entremeado pelos acidentes com rupturas de barragens, os quais sempre foram catalisadores do progresso tecnológico da engenharia de barragens, pela exigência da sociedade de eliminação desses desastres.
(CBDB, 2011,p. 371)

O desenvolvimento e uso de métodos geofísicos avançados para avaliação das condições geotécnicas das barragens são fundamentais para a detecção de condições potencialmente perigosas. Soares (2021), por exemplo, discutiu a aplicação de técnicas geofísicas como parte essencial do sistema de monitoramento para a segurança estrutural das barragens de terra. Essas abordagens permitem captar alterações sutis no comportamento da barragem antes que se tornem críticas.

Além disso, tecnologias baseadas em aprendizado de máquina estão sendo exploradas para a identificação de anomalias em dados de monitoramento, fornecendo alertas precoces que podem prevenir catástrofes. Brandão (2021) demonstrou a eficácia de técnicas estatísticas e algoritmos de aprendizado de máquina na detecção de padrões anômalos, contribuindo para uma abordagem mais proativa na gestão de riscos em barragens.

Barragens

A produção mineral gera um volume considerável de massa do minério que é rejeitada no processo e descartada na barragem. Os rejeitos de mineração apresentam características diversas, dependendo do minério e do método de beneficiamento utilizados. Eles são geralmente compostos por partículas finas, desde colóides até areias.

A importância de analisar e estudar os rejeitos nos leva a obter melhor escolha da metodologia utilizada para construir a barragem, pensando na segurança dos moradores locais e vizinhos evitando futuras tragédias, como o rompimento da barragem. Os três métodos mais comuns de alteamento são montantes, jusante e linha de centro, cada um sendo escolhido de acordo com variáveis como topografia, hidrologia, geologia, tipos de solo, entre outros. (SOARES,2010, P. 849)

O método conhecido como Montante: É erguido com os materiais de rejeito sendo depositados em camadas, formando uma estrutura que é construída em direção ao reservatório.

Imagem 1 - Seção transversal de barragem a montante
Fonte: ANA, 2019, p.16



É o método com armazenamento mais flexível de rejeitos e mais econômica, porém com alto risco de rompimento se não monitorar e fiscalizar corretamente, e dependência de condições geológicas locais.

Já o método conhecido como Jusante: É um método que envolve a construção de uma estrutura de barragem em que o material de rejeito ou a estrutura principal é erguido a partir da parte inferior em direção ao reservatório, ou seja, a barragem é construída em direção à correnteza do rio ou do corpo d'água.

Imagem 2 - Seção transversal de barragem a jusante
Fonte: ANA, 2019, p.16



É o Método com foco especial na segurança e na estabilidade da estrutura. Porém o custo é elevado comparado com o método a montante

E por fim o método conhecido como Linha de centro: refere-se à linha imaginária que passa pelo eixo central da barragem, ao longo de sua altura e comprimento.

Imagem 3 - Seção transversal de barragem de linha de centro
Fonte: ANA, 2019, p.16



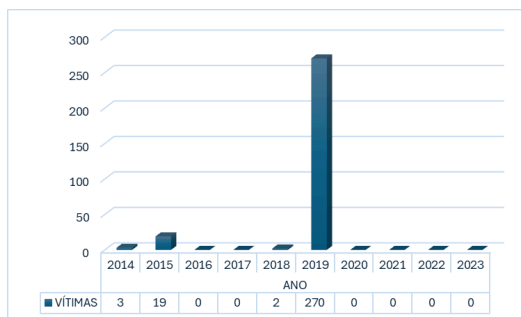
Obtendo equilíbrio estrutural. É um método seguro e eficaz pela configuração centralizada que minimiza a erosão nas margens, pois a movimentação da água é controlada, evitando a degradação das margens e, conseqüentemente, a perda de material.

O caso brasileiro

No Brasil, entre os anos de 2014 e 2023 foram reportados 4 acidentes relacionados a rupturas de barragens de rejeitos, sendo observadas 294 fatalidades e cerca de 45 milhões de metros cúbicos de resíduos liberados no meio ambiente.

Gráfico 1 - Acidentes relacionados a rupturas de barragens de rejeitos

Fonte: Próprio autor.

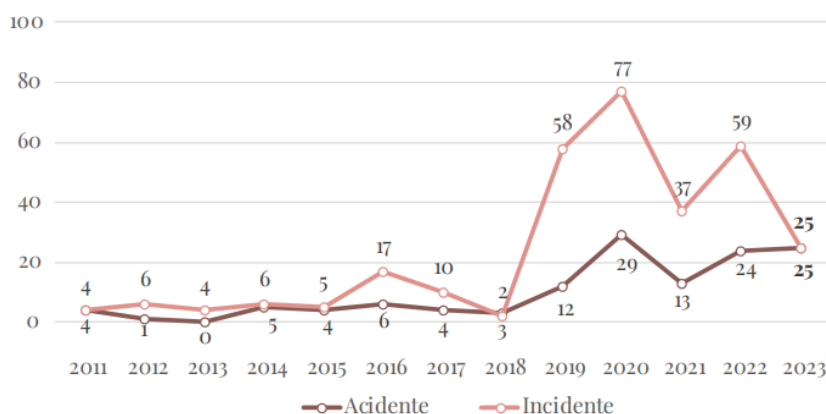


Os incidentes catastróficos ocorreram em várias ocasiões, resultando em consequências ambientais e humanas severas.

A Agência Nacional de Águas (ANA,2023) mostra o aumento de acidentes e incidentes de barragens (em geral) no século XXI no Brasil.

Gráfico 2 - Aumento de acidentes e incidentes de barragens no século XXI no Brasil

Fonte: Agência Nacional de Águas, 2023, p. 80.



Define-se acidente e incidentes pela Lei nº 12.334, Art. 2º:

XII – acidente: Comprometimento da integridade estrutural com liberação do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa;

XIII – incidente: ocorrência que afeta o comportamento da barragem ou de estrutura que, se não controlada, pode causar um acidente.

De acordo com a lei nº 12.334, Art. 2º, o acidente que foi o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais, ocorreu em 5 de novembro de 2015, e foi um dos maiores desastres socioambientais da história do Brasil.

A Barragem era parte do complexo de mineração da Samarco (uma *joint venture*¹ entre a Vale e a *BHP Billiton*²), resultou na liberação de cerca de 40 milhões de metros cúbicos de

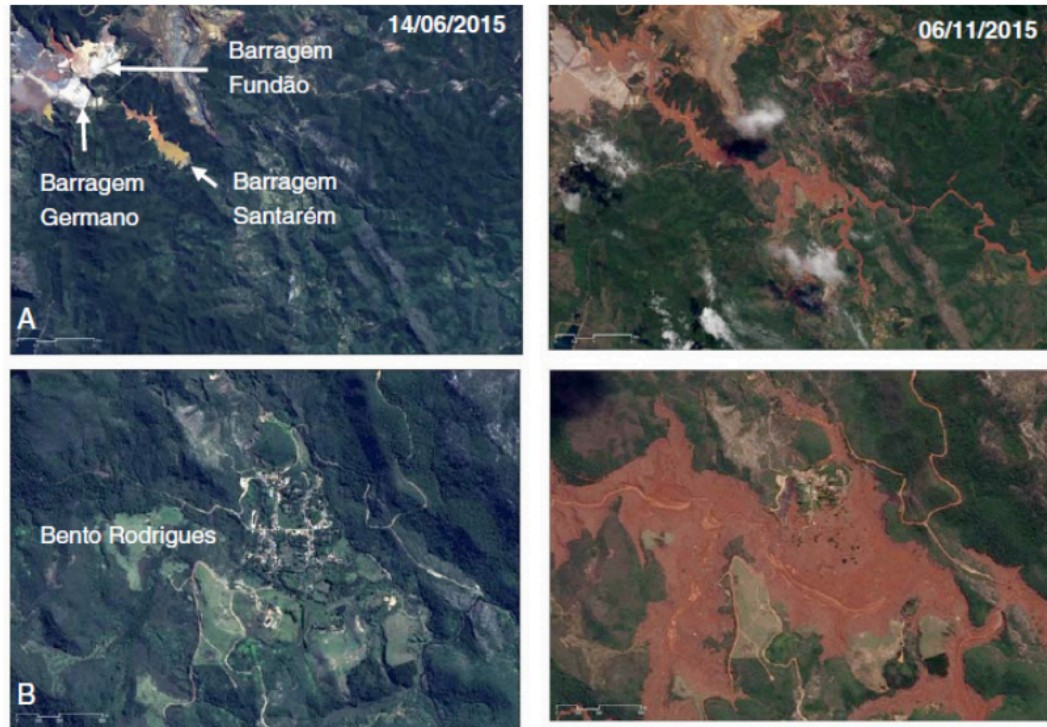
¹ É uma forma de parceria comercial em que duas ou mais empresas se unem para realizar um projeto específico ou alcançar um objetivo comum, compartilhando recursos, riscos e lucros.

² Broken Hill Proprietary Company (BHP) é uma das maiores empresas de mineração e recursos naturais do mundo com sede em Melbourne, Austrália.

rejeitos de mineração, que inundaram a cidade de Mariana e afetaram o Rio Doce, causando devastação em vários municípios ao longo do curso do rio. O desastre resultou em 19 mortes, destruição de propriedades e sérios impactos ambientais.

Imagem 4 - Área atingida por rompimento de barragem em Mariana antes e depois.

Fonte: Agência Nacional de Águas, 2016, p.48.



No dia 25 de janeiro de 2019 ocorreu outro acidente, o rompimento da barragem de rejeitos no município de Brumadinho em Minas Gerais, soterrando 3 milhões de m³ de lama, acarretando em 270 mortes. Foi considerado uma das maiores tragédias ambientais da mineração já ocorrido no século.

Imagem 5 - Rompimento da barragem VI em Brumadinho antes e depois.

Fonte: G1-Globo, 2019



Os eventos de Brumadinho e Mariana demonstraram a necessidade de inovação nos métodos de segurança e prevenção em barragens. A mineração provoca impactos

significativos no meio ambiente e na sociedade, os principais impactos incluem a poluição atmosférica, especialmente em áreas urbanas próximas, e os danos aos recursos hídricos, como o consumo elevado de água, contaminação e o rebaixamento do lençol freático. Conflitos socioambientais são gerados através de remoção compulsória de comunidades impactando a qualidade de vida dos moradores ao redor. (Milanez, 2017, P.95)

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa adotará uma abordagem metodológica mista, combinando aspectos qualitativos e quantitativos. Tal escolha justifica-se pela necessidade de explorar uma vasta gama de tecnologias existentes em diversas áreas.

O método de amostragem será intencional, focando na seleção de tecnologias reconhecidamente eficazes em identificar patologias em contextos similares ao das barragens de rejeitos. A amostra incluirá tecnologias utilizadas em áreas como geofísica, aprendizado de máquina e IoT, conforme destacado por autores como Meireles (2019) em relação ao uso de redes de Internet das Coisas para monitoramento e alerta em situações de risco.

Para a coleta de dados secundários, será realizado um levantamento das publicações científicas e estudos de caso relevantes disponíveis em bases de dados acadêmicas e repositórios de universidades. Segundo Valerius (2019), um levantamento sólido é crucial para entender a governança de risco em barragens de rejeitos.

A análise qualitativa permitirá a interpretação de percepções e experiências observacionais, tal como discutido por Freitas (2021) em estudos envolvendo simulações numéricas do comportamento geotécnico.

Os resultados obtidos serão organizados de forma a destacar tecnologias com maior potencial de aplicabilidade ao contexto brasileiro, fornecendo uma análise comparativa entre as diversas soluções exploradas.

Espera-se que a metodologia descrita permita identificar e validar tecnologias que possam ser integradas aos sistemas de monitoramento existentes em barragens de rejeitos, promovendo avanços significativos na prevenção e mitigação de desastres a partir de soluções tecnológicas viáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo sobre a adaptação de tecnologias para a identificação de patologias em barragens a montante revelou uma série de achados cruciais partindo do levantamento bibliográfico.

Inicialmente, a integração de metodologias de aprendizado de máquina, popularmente chamada de inteligência artificial (IA), demonstrou potencial significativo na detecção precoce de anomalias, conforme evidenciado por Souza (2021). As técnicas estatísticas e algoritmos de aprendizado permitiram a identificação de padrões que poderiam indicar falhas estruturais eminentemente graves, trazendo um novo nível de prevenção para as práticas de monitoramento.

Sendo assim, a primeira tecnologia a ser considerada por este artigo como uma ferramenta de prevenção a acidentes em barragens de rejeito é a utilização da *machine learning*, ou seja, aprendizado de máquina que é parte da **inteligência artificial (IA)**

Outra tecnologia destacada pelo trabalho é a utilização da **Internet das Coisas (IoT)**, a partir de redes de sensores, que tem o objetivo de alertar e prevenir a população residente em áreas de risco, contribuindo para a proteção da vida e do patrimônio, além de desastres para a natureza.

Além disso, o uso de Internet das Coisas (IoT) para a construção de redes de monitoramento em tempo real apresenta uma alternativa viável e econômica para aumentar a eficiência na prevenção e no alerta de emergências.

A solução é integrar **sensores** através da plataforma Arduino³, que serão destinados a medir temperatura, umidade do ar e níveis de água de um rio. Segundo Silva, Frota e Santos (2023, p.125), através da IoT e da interação com Arduino será possível criar um módulo que permitirá a transmissão, armazenamento e visualização de dados em tempo real. Este sistema realizará medições sistemáticas, permitindo a análise de mudanças e tendências, o que é crucial para a avaliação de riscos.

Os dados coletados também destacaram a utilidade das redes de Internet das Coisas (IoT) para a coleta de dados em tempo real, melhorando a capacidade de resposta a emergências. Meireles (2019) observou que o uso de IoT em ambientes de risco proporcionou não apenas monitoramento contínuo, mas também comunicação eficiente com equipes de intervenção, o que é fundamental para mitigar desastres nascentes

Outra tecnologia selecionada foi as imagens obtidas por **Georreferenciamento** utilizando Drones (**Vants**). Esta tecnologia permite que sejam obtidas imagens precisas da área de interesse. A técnica é conhecida por Fotogrametria é uma técnica de captação de imagens com precisão, sendo fundamental na criação de modelos tridimensionais. Quando aplicada por drones, essa técnica se torna aerofotogrametria, facilitando levantamentos em áreas de difícil acesso, onde a presença humana é inviável. Equipamentos modernos conseguem alcançar uma precisão submilimétrica, tornando o processo rápido e eficiente.

Quando os Vants estão equipados com o **LIDAR** (*Light Detection and Ranging*) conseguem emitir pulsos de luz na forma de laser e obter dados da altíssima precisão e detalhamento, sendo capaz de monitorar o progresso da construção de forma remota e abrangente, melhorando a eficiência e a qualidade dos projetos. Essa combinação de tecnologias representa uma inovação significativa para obter mais segurança em diferentes campos de trabalho.

Associado a captura das imagens e dados está o **Geoprocessamento** que utiliza de sistemas computacionais para interpretar as imagens, transformando-as em dados que podem ser analisados para identificar inconformidades em fachadas e superfícies. Este processo é crucial na geração de mapas de danos, que documentam alterações estruturais e funcionais, auxiliando na manutenção e recuperação de possíveis danos que possam vir a ocorrer.

³ Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que facilita criação de projetos interativos e dispositivos eletrônicos com linguagem de programação baseada em C/C++.

Os mapas de danos, sintetizam informações sobre condições estruturais, permitem a quantificação dos problemas e a elaboração de orçamentos para intervenções. Essa abordagem é vital para o planejamento e execução de serviços de manutenção e restauro.

Outra tecnologia selecionada foi a **interferometria de radar orbital (INSAR)**, é uma técnica que utiliza imagens de radar adquiridas por satélites para detectar e medir deformações na superfície da Terra. O método se baseia na comparação de imagens radar obtidas em momentos diferentes, permitindo a identificação de deslocamentos milimétricos na superfície, permitindo a detecção de pequenas mudanças na geometria da barragem ao longo do tempo, que podem indicar problemas estruturais ou instabilidade. Com a análise de séries temporais de dados, é possível criar mapas de deslocamento que mostram áreas específicas de movimento, ajudando na identificação de zonas críticas.

De acordo com NEGRÃO (2017), ao monitorar continuamente a barragem, é possível avaliar o risco de falhas e implementar medidas preventivas antes que ocorram eventos catastróficos. Algumas plataformas de radar orbital têm capacidade para fornecer dados em tempo real, permitindo uma resposta rápida a mudanças significativas. Os dados de interferometria podem ser integrados a outras informações, como dados geotécnicos, meteorológicos e hidrológicos, para uma análise mais abrangente da segurança da barragem.

A interferometria de radar não requer intervenção física na barragem, permitindo monitoramento contínuo sem perturbar a estrutura. Satélites podem cobrir grandes áreas, permitindo o monitoramento de várias barragens ao mesmo tempo. A técnica pode detectar deslocamentos com precisão na ordem de milímetros, o que é crucial para a segurança. Porém, a qualidade dos dados pode ser afetada por condições meteorológicas, como chuvas intensas ou nuvens e a análise dos dados requer conhecimento especializado para distinguir entre deformações reais e artefatos causados por outros fatores. (NEGRÃO, 2017)

Não obstante, uma análise crítica dos resultados sugere que a aplicação de radares orbitais INSAR ainda enfrenta resistências operacionais, sobretudo devido aos custos associados e à necessidade de infraestrutura tecnológica avançada. Contudo, Clemente (2023) reporta que, onde foi aplicada, essa tecnologia oferece dados confiáveis sobre deslocamentos e deformações nos solos de barragens, comprovando ser um instrumento valioso para a detecção de patologias estruturais.

Tecnologias como o uso de radares orbitais INSAR, citadas por Clemente (2023), oferecem soluções potenciais para o monitoramento de deslocamentos em barragens, visto que essas técnicas já são empregadas com sucesso em diferentes partes do mundo.

Por fim, a aplicação de **geomembranas** em tapetes impermeáveis foi vista como uma solução eficaz no prolongamento da vida útil das barragens de terra e na redução da infiltração de água. Pierozan (2019) relatou que a utilização destas membranas não apenas estabiliza o solo ao redor, mas também reduz significativamente os riscos de erosão, um fator crítico para a segurança de barragens.

Tabela 1 - Tecnologias
Fonte: Próprio autor.

Tecnologia	Descrição	Compatibilidade
------------	-----------	-----------------

Inteligência artificial (IA)	É a área da computação que desenvolve sistemas e máquinas capazes de realizar tarefas que exigem inteligência humana, como aprender, resolver problemas, reconhecer padrões e tomar decisões.	IoT + VANT + LIDAR + GP + INSAR.
Internet das Coisas (IoT) Sensores	É uma rede de dispositivos físicos conectados à internet, que podem coletar e compartilhar dados entre si sem intervenção humana. Esses dispositivos incluem desde eletrodomésticos e veículos até sensores e máquinas industriais.	IA VANT + LIDAR + GP + INSAR.
Georreferenciamento (Vant)	Também conhecido como drone, é utilizado no georreferenciamento para capturar imagens aéreas e realizar mapeamentos precisos de terrenos, áreas urbanas ou rurais. Ele facilita a coleta de dados geoespaciais para análise e monitoramento.	IA + IoT + LIDAR + GP + INSAR.
LIDAR	É uma tecnologia de sensoriamento remoto que usa luz (geralmente laser) para medir distâncias até a superfície da Terra, criando modelos 3D precisos do terreno e objetos. É amplamente utilizado em mapeamento topográfico, arqueologia, e monitoramento ambiental.	IA + IoT + VANT + GP + INSAR.
Geoprocessamento(GP)	É o conjunto de técnicas e ferramentas utilizadas para coletar, analisar, processar e interpretar dados geográficos ou espaciais, como mapas e imagens de satélite, para apoiar a tomada de decisões em diversas áreas, como urbanismo, meio ambiente e agricultura.	IA + IOT + LIDAR + VANT + INSAR.

<p>Interferometria de radar orbital (INSAR)</p>	<p>É uma técnica que utiliza imagens de radar de satélites para medir e monitorar mudanças no terreno, como deslocamentos ou deformações. Ela é usada para estudar fenômenos como terremotos, deslizamentos de terra e subsídios, fornecendo dados precisos sobre alterações na superfície da Terra.</p>	<p>IA + IOT + GP + LIDAR + VANT</p>
<p>Geomembranas</p>	<p>São materiais sintéticos impermeáveis usados para vedação e controle de líquidos ou gases em projetos de engenharia, como aterros sanitários, barragens e minas. Elas evitam a contaminação do solo e da água, proporcionando segurança e proteção ambiental.</p>	<p>Trata-se de um material físico utilizado para controle e proteção ambiental.</p>

Se as tecnologias selecionadas e destacadas neste artigo pudessem ser aplicadas nos acidentes nas barragens de rejeito brasileiras, estes rompimentos poderiam ter sido previstos ou até mesmo evitados. Segue abaixo as causas de cada rompimento e a forma como estas tecnologias se encaixam.

No caso da barragem de Fundão é possível verificar no relatório de monitoramento de barragens de 2016 da Agência Nacional de Águas (ANA), que as causas do rompimento da barragem são atribuídas a uma combinação de fatores, incluindo:

Estruturas Deficientes: A barragem do Fundão era classificada como uma barragem de rejeitos a montante, considerada menos segura. Relatórios anteriores já haviam apontado problemas estruturais e a necessidade de monitoramento e manutenção adequados. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia de Inteligência artificial junto a Internet das coisas (IoT) e Interferometria de radar orbital (INSAR) para obter monitoramento contínuo e comunicação eficiente para empresas responsáveis e para órgãos de monitoramento em tempo real, Georreferenciamento (Vants) para mapear a área e realizar tomadas de decisões para implementar sensores (LIDAR) em locais estratégicos e o uso de geomembranas para estabilizar o solo.

Falta de Fiscalização: A ausência de fiscalização rigorosa por parte das autoridades competentes contribuiu para a deterioração das condições da barragem. Muitas vezes, as recomendações de especialistas não foram implementadas. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia de **Inteligência artificial (IA)** junto a **Internet das coisas (IoT)** e **Interferometria de radar orbital (INSAR)** para obter monitoramento contínuo e comunicação eficiente para empresas responsáveis e para órgãos de monitoramento em tempo real, **Georreferenciamento (Vants)** para mapear a área e realizar tomadas de decisões para implementar **sensores (LIDAR)** em locais estratégicos.

Condições Geológicas: A área onde a barragem estava localizada apresentava características geológicas que, quando somadas à pressão dos rejeitos, aumentaram o risco de colapso. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia de **geoprocessamento** para interpretar os dados obtidos e realizar estudos geológicos da área, **geomembranas** para estabilizar o solo ao redor e evitar erosão na estrutura e **georreferenciamento** para melhor monitoramento e mapeamento das áreas ao redor da barragem para analisar possíveis rompimentos e caminho que os rejeitos poderiam percorrer, assim, poderiam preparar outra barragem para evitar a contaminação de outros rios.

Gestão Inadequada: A falta de um plano de emergência eficaz e de comunicação com a população local também foi um fator crítico. A empresa não estava adequadamente preparada para lidar com uma possível emergência. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia **Inteligência artificial (IA)**, **internet das coisas (IoT)** com **LIDAR**, porque o sensor iria detectar deslocamento na barragem e enviaria uma alerta via internet, com a IA seria realizada a distribuição da informação, inclusive, para sirenes que tocariam em segundos.

Histórico de Problemas: Antes do desastre, já haviam ocorrências de vazamentos e problemas relacionados à segurança da barragem, que não foram suficientemente tratados. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia de **Inteligência artificial (IA)**, **Internet das coisas (IoT)**, **Interferometria de radar orbital (INSAR)**, **Georreferenciamento (Vants)**, **LIDAR** para obter monitoramento contínuo e comunicação eficiente para empresas responsáveis e órgãos de monitoramento em tempo real. Realizar melhor tomadas de decisões para implementar sensores em locais estratégicos e geomembrana para estabilizar o solo ao redor e evitar erosão na estrutura.

O rompimento da barragem do Fundão levantou questões significativas sobre a segurança das barragens de rejeitos no Brasil e a responsabilidade das empresas de mineração, resultando em um debate nacional sobre regulamentações e práticas de segurança na indústria.

Já no caso da barragem de rejeitos de Brumadinho, ocorreram falhas técnicas no monitoramento e na sinalização de suposto risco na estrutura que era responsabilidade do empreendedor Vale S.A. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia **Inteligência artificial (IA)**, **internet das coisas (IoT)**, **LIDAR**, por que com a combinação dessas tecnologias as informações seriam distribuídas para órgãos responsáveis e subiria no ranking de CRI (Categoria de Risco) alertando as entidades fiscalizadoras e evitando acidentes.

Como a barragem estava ativa há quase 40 anos, não havia histórico em relação às primeiras etapas construtivas da estrutura. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), a barragem estava passando por um processo de mudança para sistema de monitoramento automatizado. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia **Inteligência artificial (IA)**, **internet das coisas (IoT)**, **LIDAR**, **INSAR**, **Geomembrana**, **Geoprocessamento**, por que a integração dessas tecnologias poderia ter proporcionado uma abordagem proativa na gestão de barragem, permitindo identificar e mitigar riscos antes que se tornassem ameaças significativas. Utilizando a geomembrana, seria possível a estabilização do solo e evitar erosão para garantir a segurança e a integridade de infraestruturas críticas.

As sirenes já haviam sido instaladas e foi realizada a simulação, porém o sistema não foi acionado no momento da tragédia. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia **Inteligência Artificial (IA)**, **sensores IoT** e **LIDAR**, com a necessidade de uma automação mais robusta, eficiente e integrada para situações de emergência. A aplicação dessas tecnologias permitiria uma monitoração em tempo real, análise preditiva e respostas automáticas, podendo, em muitos casos, ter evitado ou mitigado os impactos das tragédias.

Além disso, a presença de lençóis empoleirados na reserva indicou uma dificuldade na drenagem natural de todo o material depositado ao longo do tempo no reservatório. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia de radar e imagens de satélite(Insar),drones equipados com lidar e geoprocessamento(gp),o uso integrado de **sensores de monitoramento em tempo real**, poderia ter detectado sinais de falha iminente na barragem, como problemas de drenagem e acúmulo de material. A adoção dessas tecnologias permitiria uma fiscalização mais precisa e a adoção de medidas corretivas antes que as tragédias de Mariana e Brumadinho acontecessem.

Algumas situações analógicas foram consideradas de maior crítica e não foram reportadas à Agência e que se fossem, teriam elevado a posição do ranking para prioridade de fiscalização, colaborando na melhoria das condições de segurança da estrutura. Este elemento poderia ter sido verificado com grande antecedência a partir da utilização da tecnologia de **drones, LIDAR, InSAR**, isso poderia ter detectado as falhas estruturais como rupturas, fissuras, movimentações de terra e aumentos de pressão nos taludes barragens de Mariana e Brumadinho com antecedência, ajudando a elevar a prioridade de fiscalização e melhorando as condições de segurança.

Tabela 2 - Tecnologias e Barragens
Fonte: Próprio autor.

Barragem de Rejeito	Problemas	Tecnologia adotada
Fundão	Estruturas deficientes	IA+IoT+INSAR +Vant+LIDAR+Geomembrana
	Falta de fiscalização	IA+IoT+INSAR+Vant+LIDAR
	Condições geológicas	Geoprocessamento+Georreferenciamento+Geomembranas
	Gestão inadequada	IA+IoT+LIDAR
	Histórico de problemas	IA+IoT+INSAR +Vant+LIDAR+Geomembrana

Brumadinho	Falhas no monitoramento e sinalização	IA+IoT+LIDAR
	Processo de mudança para monitoramento automatizado	IA+IoT+LIDAR+Geomembrana+Geoprocessamento
	Sirene não acionada no momento do rompimento	IA+IoT+LIDAR
	Dificuldade na drenagem natural	INSAR+Vants+Geoprocessamento+
	Falta de comunicação entre empresa responsável e a ANA	LIDAR+INSAR+Vants

A amplitude de tais tecnologias não só proporciona uma camada adicional de proteção, mas também redefine o papel das soluções tecnológicas na arquitetura de infraestrutura crítica.

CONCLUSÕES

Este artigo busca sintetizar conhecimentos de múltiplas disciplinas, integrando avanços em engenharia civil com inovações tecnológicas emergentes, apresentando o esforço para delinear práticas mais seguras e eficientes na gestão de barragens através de uma abordagem multidimensional, que considera tanto fatores técnicos quanto socioeconômicos.

Além dos benefícios técnicos, este artigo considera as vantagens econômicas e sociais advindas da implementação de tecnologias integrativas nas barragens. O artigo também aponta para a necessidade de políticas públicas que apoiem a integração de novas tecnologias no monitoramento de barragens.

Investimentos em inovação tecnológica não apenas promovem uma segurança estrutural aprimorada, mas também fomentam a confiança pública, conforme Medeiros (2018) menciona, a transparência e o volume de dados proporcionados pela tecnologia moderna fornecem um terreno fértil para políticas mais eficazes e sustentáveis. Medeiros (2018) destaca como a aplicação de níveis de controle e monitoramento geotécnico influenciam diretamente na segurança e na avaliação de barragens de rejeitos.

Apesar dos obstáculos, relacionados aos custos e especialização de mão de obra, estas tecnologias se mostram essenciais, uma verdadeira ambivalência entre custo e benefício. Apesar das importantes informações sobre estas tecnologias e o monitoramento de barragens presentes neste artigo, este é apenas mais um passo para futuras investigações e implementações práticas que avançam a segurança e a eficiência dentro desse campo essencial no Brasil.

Por fim, o que se observa é uma percepção crescente de que a tecnologia pode não só oferecer soluções para problemas antigos, mas também redefinir as práticas de segurança em

barragens. Fernandes (2020) sugere que a combinação de tecnologias emergentes pode proporcionar um novo paradigma na gestão e prevenção de riscos associados a barragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Relatório de Segurança de Barragens 2016/** Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA,2017. 225 P. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores/rsb-2016>.

Acesso em: 24/10/2024

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Relatório de Segurança de Barragens 2019/** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA,2020. 131 P. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019>. Acesso em: 24/10/2024

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Relatório de Segurança de Barragens 2023/** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA,2024. 123 P. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 24/10/2024

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p. 831-888. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/769>. Acesso em: 11/10/2024

CLEMENTE, B. M.. **Aplicabilidade e confiabilidade do monitoramento de deslocamento em barragem de mineração por radar orbital InSAR**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-401/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89 p. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/bitstream/10482/48688/1/BeatrizMapaClemente DISSERT.pdf>. Acesso em: 24/10/2024

MEDEIROS, A. B. S. de. Interpretação e aplicação dos níveis de controle do monitoramento geotécnico na avaliação de segurança de barragens de mineração. 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/12215>. Acesso em: 01/11/2024

NEGRÃO, P.; GERENTE,J.; GAMA, F.F.; MURA, J.C. **Interferometria Diferencial com Dados SAR: Princípios Básicos e Aplicações em Geociências**. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Rio de Janeiro, 6 nov. 2017. Disponível em: https://www.cartografia.org.br/cbc/2017/trabalhos/4/fullpaper/CT04-70_1506595061.pdf.

Acesso em: 28/10/2024

MEIRELES, L. V. Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco. 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10072>. Acesso em: 25/10/2024

VALERIUS, M. B. Governança de risco em barragens de contenção de rejeitos: uma análise da lei de segurança de barragens e das entidades reguladoras. 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/15398>. Acesso em: 01/11/2024

MILANEZ, B. **Mineração, ambiente e sociedade: Impactos complexos e simplificação da legislação.** Boletim regional, urbano e ambiental [16] Juiz de fora, MG, 2017. 10 p. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/poemas//files/2014/07/Milanez-2017-Minera%C3%A7%C3%A3o-ambiente-e-sociedade.pdf>. Acesso em: 01/11/2024.

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens / [coordenador, supervisor, Flavio Miguez de Mello; editor, Corrado Piasentin]** - Rio de Janeiro, RJ, 2011. 524 p. Disponível em: https://issuu.com/sobratema/docs/a_historia_das_barragens_no_brasil_1#:~:text=A%20primeira%20dessas%20barragens%20foi,Cear%C3%A1%20e%20conclu%C3%ADa%20em%201906. Acesso em: 01/11/2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 22300:2022 – Segurança e Resiliência - Vocabulário**

SOARES, L. F. C. Universidade Federal de Viçosa. **Métodos geofísicos aplicados à avaliação das condições geotécnicas em barragem de terra [recurso eletrônico]** – Viçosa, MG, 2021. 121 p. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_f561eb1a7e90a090632d93bf1748b65c. Acesso em: 05/11/2024

BRANDÃO, H. A. Universidade Federal de Ouro Preto. **Utilização de técnicas estatísticas e de aprendizado de máquinas para identificação de anomalias em dados de monitoramento de barragens de rejeito de mineração. [manuscrito]** – Ouro Preto, MG, 2023. 116 p. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/9001674b-89aa-4217-9ae3-05fec7b0483b/content>. Acesso em: 05/11/2024

BRASIL, **Lei nº12.334**, de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 20/11/2024

FREITAS, R. D. A. de. Universidade Federal de Ouro Preto. **Simulação numérica tridimensional do comportamento geotécnico de uma barragem de contenção de rejeitos por meio de ensaios de campo e microssísmica.** Ouro Preto, MG, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13268>. Acesso em: 05/11/2024

SOUZA, D. O. O. de. Universidade Federal de Ouro Preto. **Utilização de técnicas estatísticas e de aprendizado de máquina para identificação de anomalias em dados de**

monitoramento de barragens de rejeito de mineração. Ouro Preto, MG, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/17107>. Acesso em: 05/11/2024

SILVA, D. N; FROTA, V. B; SANTOS, A. J: **Internet das Coisas: Arquiteturas Teóricas e Metodológicas.** 1º edição. Belo Horizonte. Editora Poisson, 2023. 138 p. Disponível em: https://www.poisson.com.br/livros/individuais/Internet_das_Coisas/Internet_das_Coisas.pdf. Acesso em :24/10/2024

PIEROZAN, R. C. **Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra** / Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil. – Curitiba, PR, 2014. 182 p. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/36088/R%20-%20D%20-%20RODRIGO%20CESAR%20PIEROZAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18/11/2024