

**GESTÃO PROATIVA DA SEGURANÇA EM BARRAGENS: O USO DA
TECNOLOGIA NO MODELO INTEGRADO BIM+IOT COMO PRÁTICA DE
MEDIDA COMPENSATÓRIA NA MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL
SEVERA**

**PROACTIVE DAM SAFETY MANAGEMENT: THE USE OF TECHNOLOGY IN
THE INTEGRATED BIM+IOT MODEL AS A COMPENSATORY MEASURE IN
MITIGATING SEVERE ENVIRONMENTAL POLLUTION**

**GESTIÓN PROACTIVA DE LA SEGURIDAD DE PRESAS: EL USO DE LA
TECNOLOGÍA EN EL MODELO INTEGRADO BIM+IOT COMO MEDIDA
COMPENSATORIA PARA MITIGAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL
GRAVE**



10.56238/sevened2026.001-027

Glauco Fernandes de Oliveira Nunes

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais

E-mail: glaucofon@gmail.com

Wagner Augusto Soares de Aquino

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais

E-mail: wagneraugustos@yahoo.com.br

Marcelo Porto

Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais

E-mail: marceloport@ufmg.br

RESUMO

No Brasil, o monitoramento tradicional das barragens de rejeitos de minério tem se mostrado insustentável e ineficiente, ocorrendo episódios catastróficos, como os eventos que causam poluição ambiental severa, perda de patrimônio cultural, ambiental, e, principalmente a perda de vidas humanas. Para enfrentar a constante ameaça dessas infraestruturas críticas propõe-se o desenvolvimento de um Gêmeo Digital (GD), sendo uma sinergia entre o *Building Information Modeling* (BIM) e a Internet das Coisas (IOT). O artigo sugere a adoção dessa tecnologia como forma de medida compensatória aos danos diretos e indiretos causados ao meio ambiente. A modelagem proposta visa utilização de postos de verificação e controle automatizados, usados como ferramenta para análise da segurança estrutural em regime de monitoramento 24/7. A metodologia envolve a arquitetura de sistemas de telemetria para a integração de dados geotécnicos no modelo BIM. Entende-se que o emprego desse sistema favorece a mitigação dos riscos uma vez que estabelece monitoramento em tempo real das estruturas, reduzindo drasticamente o tempo médio de resposta (TMR) e aumentando o fator de segurança para os trabalhadores locais e população do entorno da área de risco. Espera-se que o Modelo BIM+ IOT contribua na gestão da segurança, compartilhando informações produzidas em tempo real com os órgãos públicos de socorro; espera-se também uma abordagem preditiva, detectando

anomalias como recalques diferenciais e picos de poropressão com antecedência crítica, em contraste com a latência dos métodos reativos.

Palavras-chave: Gêmeo Digital. BIM+IOT. Segurança de Barragens. Gestão de Riscos. Poluição Ambiental.

ABSTRACT

In Brazil, traditional monitoring of tailings dams has proven unsustainable and inefficient, resulting in catastrophic events such as severe environmental pollution, loss of cultural and environmental heritage, and, most importantly, loss of human lives. To address the constant threat posed by these critical infrastructures, the development of a Digital Twin (DT) is proposed, representing a synergy between Building Information Modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT). The article suggests the adoption of this technology as a compensatory measure for the direct and indirect damage caused to the environment. The proposed modeling aims to utilize automated verification and control stations as a tool for structural safety analysis under 24/7 monitoring. The methodology involves the architecture of telemetry systems for the integration of geotechnical data into the BIM model. It is understood that the use of this system favors risk mitigation since it establishes real-time monitoring of structures, drastically reducing the mean response time (MRT) and increasing the safety factor for local workers and the population surrounding the risk area. The BIM+IOT model is expected to contribute to safety management by sharing real-time information with public emergency services; a predictive approach is also expected, detecting anomalies such as differential settlements and pore pressure peaks with critical advance notice, in contrast to the latency of reactive methods.

Keywords: Digital Twin. BIM+IOT. Dam Safety. Risk Management. Environmental Pollution.

RESUMEN

En Brasil, el monitoreo tradicional de presas de relaves ha demostrado ser insostenible e ineficiente, lo que ha provocado eventos catastróficos como contaminación ambiental severa, pérdida del patrimonio cultural y ambiental y, sobre todo, pérdida de vidas humanas. Para abordar la amenaza constante que representan estas infraestructuras críticas, se propone el desarrollo de un Gemelo Digital (GE), que representa una sinergia entre el Modelado de Información de Construcción (BIM) y el Internet de las Cosas (IoT). El artículo sugiere la adopción de esta tecnología como medida compensatoria por los daños directos e indirectos causados al medio ambiente. El modelado propuesto busca utilizar estaciones automatizadas de verificación y control como herramienta para el análisis de seguridad estructural con monitoreo 24/7. La metodología implica la arquitectura de sistemas de telemetría para la integración de datos geotécnicos en el modelo BIM. Se entiende que el uso de este sistema favorece la mitigación de riesgos, ya que establece un monitoreo en tiempo real de las estructuras, reduciendo drásticamente el tiempo medio de respuesta (TMR) y aumentando el factor de seguridad para los trabajadores locales y la población circundante a la zona de riesgo. Se espera que el modelo BIM+IOT contribuya a la gestión de la seguridad al compartir información en tiempo real con los servicios públicos de emergencia. También se prevé un enfoque predictivo que detecte anomalías como asentamientos diferenciales y picos de presión intersticial con una antelación crucial, a diferencia de la latencia de los métodos reactivos.

Palabras clave: Gemelo Digital. BIM+IOT. Seguridad de Presas. Gestión de Riesgos. Contaminación Ambiental.

1 INTRODUÇÃO

Esse artigo tem natureza propositiva para construção de modelagem de segurança para barragens de rejeito de minério, utilizando tecnologias atuais, no caso o uso combinado do BIM+IOT, com expectativa de uma performance mais favorável e eficaz na mitigação de riscos.

Dentro do contexto, vale citar que as expectativas favoráveis sobre a utilização das tecnologias combinadas são pressupostos, recortada nesse momento ao campo das ideias. Portanto, não houve realização de experimentos diretos, apenas análise em estado da arte sobre estudos de natureza variada, com casos positivos de uso dessa tecnologia. A utilização por similaridade é totalmente dedutiva. Parte de alguns parâmetros para propor monitoramento de barragens de rejeito de minério com Dano Potencial Associado, DPA alto, vislumbrando se a possibilidade de êxito no resultado.

O fato de a riqueza mineral brasileira atrair diversos conglomerados empresariais no processo industrial exploratório e essa atividade ser permanente, crescente a cada ano, justifica o aumento sistemático das ameaças e dos sinistros.

No Brasil o controle da segurança em barragens de rejeito de minério constitui um fator técnico, ambiental e social inadiável. As tragédias socioambientais ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos no Estado de Minas Gerais, expôs de maneira contundente a vulnerabilidade dos métodos tradicionais de inspeção, destacando sua limitada capacidade de antecipação a falhas estruturais. A magnitude e a severidade desses dois eventos constituíram os maiores registros de volume de rejeito de minério lançados no meio ambiente, em todo o mundo. Assinalando danos irreversíveis ao patrimônio ambiental, a bens do patrimônio cultural atingidos, principalmente às centenas de vítimas fatais, além dos milhares de desabrigados.

Logo após ao rompimento da Barragem na cidade de Brumadinho, ainda no ano de 2019 foram tomadas medidas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), no sentido de aperfeiçoar legislação normativa sobre o tema barragem de rejeito de minério e pacificar questões de interesse público, na tentativa de trazer mais segurança e diminuir danos ambientais de maneira geral.

A Resolução em vigor preconiza que as barragens com DPA alto precisam de monitoramento em tempo integral, mas a mesma não define o tipo de tecnologia a ser empregada, tampouco exige o compartilhamento das informações em tempo real com Órgãos externos. O §1º do artigo 7º da Resolução nº 95/2022 determina que o empreendedor mantenha “sistema de monitoramento automatizado de instrumentação com acompanhamento em tempo real e período integral” (BRASIL, 2022).

§ 1º Para as barragens de mineração classificadas com DPA alto, o empreendedor é obrigado a manter sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, incluindo redundância no sistema de alimentação de energia, seguindo os critérios definidos pelo projetista, sendo de responsabilidade do empreendedor a definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento.

Segundo Brasil (2022), as barragens de mineração com DPA alto devem manter monitoramento contínuo por vídeo durante 24 horas, sendo o material armazenado por no mínimo 90 dias, e todos os dados instrumentais devem permanecer acessíveis à fiscalização da ANM e das Defesas Cíveis.

§ 2º As informações advindas do sistema de monitoramento, contemplando os dados de instrumentação, devem ser armazenadas e estar disponíveis para a fiscalização das equipes ou sistemas das Defesas Cíveis estaduais e federais e da ANM, sendo que para as barragens de mineração com DPA alto, estas devem manter videomonitoramento 24 (vinte e quatro) horas por dia de sua estrutura devendo esta ser armazenada pelo empreendedor pelo prazo mínimo de 90 (noventa) dias.

Entende-se que a exigência da legislação do ponto de vista preventivo foi limitante, considerando a possibilidade de socorro ocorrer de forma tardia, em caso de sinistro (MALTA, 2025). Uma vez que os dados produzidos em tempo real, pela lógica da legislação, não precisam ser compartilhados dessa forma com os Corpos de Bombeiros e Defesa Civil. Por isso, a proposta em tela sugere o sistema integrado BIM+IOT para monitoramento em tempo real, com o compartilhamento síncrono desses dados com os Corpos de Bombeiros Militar e as Defesas Cíveis. O perímetro da abrangência deve restringir-se ao Estado da Federação, no qual a barragem estiver construída.

No escopo do modelo proposto é possível garantir que haja redundância do sistema, cujo processo, permite o controle externo na segurança. (HELENO *et al.*, 2025) Promove melhoria da capacidade de resposta com redução sistemática do tempo de socorro por estes órgãos aumentando a chance de proteção à vida humana, dos patrimônios ambiental e cultural.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 O PROBLEMA GEOTÉCNICO, TIPOLOGIA DE BARRAGENS E POLUIÇÃO AMBIENTAL SEVERA

As barragens de rejeito de minério são construídas de forma geral pelos seguintes métodos,

Os métodos comuns para a construção de uma barragem de rejeitos são: a montante, a jusante e a de linha de centro. O mais utilizado dentre os métodos citados para a construção desse tipo de barragem é o de montante, pois tem um custo menor quando comparado com as demais, entretanto, é a menos segura. (CARDOZO *et al* 2016)

Existe consenso em torno do método a montante ser o menos seguro. A legislação determina a descaracterização ou descomissionamento dessas barragens, no entanto, algumas ainda estão em operação. Nelas, pode haver resíduos químicos e alta concentração de metais pesados como: arsênio, manganês, chumbo. Fator preocupante no caso de rompimento, pelo risco de poluição ambiental severa.

As Falhas em barragens de aterro podem estar intrinsecamente ligada a questões de instabilidade geotécnica. Conhecido como recalque diferencial tende a ocorrer devido a variações na

compressibilidade da fundação ou do maciço (GARCIA, 2025), criando fissuras que comprometem a integridade estrutural. O aumento da poropressão, por sua vez, pode reduzir a tensão efetiva do solo a zero, diminuindo o Fator de Segurança (FS) e desencadeando o fenômeno da liquefação em rejeitos finos saturados [4]. Outro termo crítico é o seepage (percolação descontrolada), que pode causar erosão interna (*piping*).

O rompimento resultante libera a massa contaminante, no caso de rejeitos, cuja composição é o cerne da Poluição Ambiental Severa, exigindo que o foco em prevenção seja a única forma de mitigação ambiental aceitável. (BASTOS; NUNES, 2025)

2.2 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) E A BASE DE DADOS PARAMETRIZADA

O BIM transcende a representação geométrica 3D, atuando como uma base de dados centralizada e parametrizada que gerencia todas as informações do ativo. Na gestão de barragens, o BIM: (SANTOS, 2021)

- **Modelagem de Ativos e Instrumentação:** Permite a modelagem precisa do maciço e, crucialmente, de cada ponto de instrumentação, como os Piezômetros de Corda Vibrante, os Inclinômetros e os Prismas Refletores, associando-lhes propriedades, códigos únicos e limites de alerta [2].
- **Gestão da Informação e Interoperabilidade:** O BIM atua como um repositório centralizado, integrando-se a bases de dados relacionais que armazenam dados de instrumentação em tempo real, superando a desorganização e a ineficiência das medições manuais [2].
- **Simulação Preditiva:** O modelo 3D é essencial para simular cenários de propagação da onda de ruptura (*dam break*) e para a análise de fluxo e tensões [6].

2.3 INTERNET DAS COISAS (IOT), TELEMETRIA E LATÊNCIA ZERO

A IOT é o habilitador da coleta de dados em tempo real, superando o principal ponto de falha do monitoramento tradicional: a latência (SANTOS, 2021)

- **Sensores Geotécnicos:**
 - **Posição e Assentamento:** Utilizam-se o **Sistema GPS Geodésico de Alta Precisão** e **Prismas Refletores** para monitorar milimetricamente o recalque e o deslocamento horizontal do coroamento.
 - **Estabilidade e Poropressão:** Utilizam-se os **Piezômetros de Corda Vibrante (PCV)** para medição precisa da poropressão e **Inclinômetros Digitais** para monitorar a deformação horizontal (cisalhamento).

- **Automação da Telemetria:** A instalação desses sensores conectados por redes de baixo consumo (LoRa, 5G) permite a telemetria contínua [1], que é a única via para eliminar a falibilidade humana e a latência inerentes aos processos de medição manual [2].
- **Equipamentos Interligados (EPI e EPC):** A IOT se estende à segurança de pessoal e logística.
 - **EPI (Equipamento de Proteção Individual) Conectivo:** Smartwatches (Relógios de pulso) ou Bandas Biométricas que monitoram a localização e o estado fisiológico (fadiga, frequência cardíaca) do trabalhador.
 - **EPC (Equipamento de Proteção Coletiva) Conectivo:** Sensores de presença e câmeras inteligentes em zonas de risco.

2.4 O CONCEITO DE GÊMEO DIGITAL (GD) E A PROATIVIDADE

O Gêmeo Digital (GD) é a réplica virtual do ativo físico, mantida atualizada pela telemetria IOT (SANTOS, 2021). Ele é a concretização da sinergia entre o repositório informacional BIM e o fluxo de dados IoT. Este *feedback loop* contínuo permite a manutenção preditiva e a tomada de decisão proativa, prevendo o comportamento da barragem (ex: a taxa de aumento da poropressão) antes que ele atinja um estado crítico.

Figura 1 - Aplicações de um GD



Fonte: QINGLIN QI et al., 2019

Controle Veicular Remoto vs. BIM+IOT: A capacidade de comandar caminhões e tratores a distância (operados remotamente) não torna o BIM+IOT menos necessário; pelo contrário, o torna mais integrado. O BIM fornece o contexto espacial para a Gestão de Frota (localização precisa, rotas otimizadas) e a prevenção de colisões entre veículos autônomos ou remotos e a própria estrutura da barragem, garantindo que as operações de alteamento ou manutenção não comprometam o maciço. O BIM e a IOT fornecem o sistema de segurança e eficiência para a frota remota.

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta segue um modelo de Engenharia de Sistemas para o desenvolvimento do Gêmeo Digital, com foco na análise de dados preditiva e na otimização de resposta.

3.1 ARQUITETURA DO MODELO BIM+IOT (GÊMEO DIGITAL)

O Modelo GD é dividido em três camadas operacionais distintas, baseadas na proposta de GD para barragens (SFALSIN, 2024):

1. **Camada de Aquisição (IOT):** Coleta de dados geotécnicos e operacionais (telemetria de PCVs, Inclínômetros, GPS Geodésico) e transmissão via *gateway*. A frequência de amostragem é definida em 5 minutos para os indicadores geotécnicos críticos.
2. **Camada de Processamento (Nuvem/Plataforma GD):** Os dados brutos são processados em plataformas de *Cloud Computing* (Azure Digital Twins ou Bentley iTwin) [1]. Nesta camada, modelos de *Machine Learning* analisam a série temporal dos dados, identificando desvios padrão que sinalizam o início do recalque diferencial ou o aumento crítico da poropressão. A análise preditiva é a base para a segurança proativa.
3. **Camada de Visualização e Decisão (BIM):** O modelo BIM 3D é o ponto de interface, atualizado por uma base de dados relacional [2]. A visualização é fornecida por *dashboards* (ex: Power BI), onde os dados dos sensores são espacialmente mapeados no modelo 3D para contextualização imediata da anomalia e do estado do Fator de Segurança (FS).

3.2 ESTABELECIMENTO DE POSTOS DE VERIFICAÇÃO E CONTROLE (PVCS)

A proatividade do modelo é garantida pelos PVCs digitais, que automatizam o acionamento de emergência (SILVA, 2023):

PVC Digital (Alerta Estrutural): Acionado pelo *Machine Learning* quando a taxa de variação de poropressão ou recalque excede o limite preditivo, indicando uma redução do Fator de Segurança (FS), mesmo antes de atingir o limite de ruptura do Nível 3. Este alerta é espacialmente visualizado no modelo BIM [1].

- **PVC de Resposta (Mitigação de Desastre):** Focado na minimização do impacto humano e ambiental. A ativação inclui:
 - **Mapas de Evacuação Dinâmicos:** O GD utiliza a modelagem de fluxo de ruptura ([6] e o BIM) e os dados de localização em tempo real (via *wearables* / EPI) para gerar rotas de fuga otimizadas. Esses mapas são atualizados por mancha de inundação, incorporando a velocidade de correnteza e a altura da lâmina d'água simuladas no momento da ruptura hipotética, superando a estaticidade dos planos preestabelecidos. Os alertas são enviados por provedores como a Defesa Civil e sistemas de SMS georreferenciado à população a jusante.
 - **Gestão Logística de Frota (Comandos Veiculares):** Fornecimento imediato da localização de equipamentos de resgate e possibilidade de envio de comandos veiculares (e.g., bloqueio de rotas não seguras ou envio de veículos autônomos para áreas de risco).

3.3 INDICADORES, CHAVE DE DESEMPENHO (KPIs)

A avaliação da performance do Modelo BIM+IOT será quantificada pelos seguintes KPIs de alto impacto (BATISTA, 2023):

As consequências desses colapsos, incluindo poluição ambiental severa, dispersão de rejeitos, contaminação por metais pesados e a destruição de ecossistemas inteiros, reforçam a urgência pela adoção de ferramentas tecnológicas de caráter preventivo .

O modelo convencional de controle de barragens, baseado em inspeções esporádicas e na coleta manual de dados instrumentais, possui caráter essencialmente reativo. Essa limitação faz com que a identificação de processos dinâmicos, como recalques acelerados, aumento anômalo de poropressões ou condições progressivas de liquefação, ocorra tardiamente, muitas vezes quando o processo já se encontra em estágio crítico. Esses comportamentos, amplamente reconhecidos como gatilhos diretos de falhas catastróficas, tornam-se praticamente invisíveis em sistemas de monitoramento com baixa frequência de dados. Os rompimentos da Barragem do Fundão (Mariana) e da Barragem I da Mina do Feijão (Brumadinho), frequentemente citados como marcos paradigmáticos da engenharia de barragens, demonstram de forma inequívoca que uma gestão baseada em informações esparsas e atrasadas é incapaz de sustentar níveis adequados de segurança operacional. (COTA, 2025)

Adicionalmente, os modos de falha típicos de barragens , estabilidade, liquefação, galgamento e piping , podem ser desencadeados por uma combinação de fatores ambientais, intervenções antrópicas ou, principalmente, pela ausência de um sistema de monitoramento eficiente e contínuo. A complexidade aumenta quando se considera que o maciço de uma barragem raramente permanece estático ao longo do tempo: é comum que passe por intervenções sucessivas de alteamento para ampliação da capacidade de armazenamento de rejeitos. Cada etapa de alteamento altera a configuração geométrica e as tensões internas do maciço, criando desafios para o projeto, operação e verificação da segurança estrutural. (COTA, 2025)

Nesse cenário, torna-se evidente a necessidade de abandonar modelos reativos e avançar para uma gestão proativa apoiada por tecnologias emergentes. A implementação integrada de sistemas BIM + IoT surge como solução estratégica, permitindo o monitoramento contínuo, em alta resolução temporal, do comportamento físico do maciço, do funcionamento de estruturas associadas e das condições ambientais. Essa integração viabiliza análises em tempo real, identificação precoce de anomalias e tomada de decisão baseada em dados robustos, elevando significativamente o nível de confiabilidade e segurança operacional das barragens. (HELENO *et al.*, 2025)

Além do mais, indo ao encontro da Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010), a regulamentação específica sobre o tema evoluiu. Inicialmente tratada pela Resolução ANM nº 13/2019 (BRASIL, 2019a), esta obrigação foi consolidada e atualizada pela Resolução ANM nº 220, de 16 de outubro de

2025 (BRASIL, 2025). Tal norma estabelece, em sua Seção II – Monitoramento, a obrigação clara de que o empreendedor:

“mantenha sistema de monitoramento de segurança de barragem” (BRASIL, 2025, art. 20).

Essa exigência legal, embora mais concisa na nova redação, retém o imperativo da automação e da vigilância contínua. Em seus critérios técnicos, a Resolução 220/2025 detalha que, para barragens classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) alto, o sistema deve ser automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, conforme critérios definidos pelo projetista. Essa automação e vigilância contínua são elementos centrais na política de segurança de estruturas críticas.

Diante desse contexto, este artigo apresenta o Modelo BIM+IOT, concebido como um Gêmeo Digital (GD) da barragem. Essa abordagem tecnológica opera como uma medida compensatória ambiental de primeira grandeza, cuja finalidade principal é prevenir a falha antes que ela se manifeste. O objetivo é duplo: promover a transição da gestão convencional de riscos para o paradigma da Geotecnia 4.0, Cardoso (2025), fundamentado na segurança preditiva, e, adicionalmente, possibilitar uma resposta emergencial drasticamente mais eficiente graças à integração contínua entre sensores IOT, modelos BIM dinâmicos e análise inteligente de dados.

QUADRO 1 - Geotecnia 4.0

Categoria	Indicador Chave	Unidade
Segurança Estrutural	Tempo Médio de Detecção de Anomalia Geotécnica (TDA)	Horas/Minutos
Eficiência Operacional	Taxa de Acionamento da Manutenção Preditiva	%
Resposta à Emergência	Tempo Médio de Resposta do Primeiro Socorrista (TMR)	Minutos
Sustentabilidade	Eficiência de Utilização de Recursos (via Gestão de Inventário)	% de Redução de Desperdício

Fonte: Autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VISUALIZAÇÃO, SINCRONIZAÇÃO E REDUÇÃO CRÍTICA DO TDA

A validação da arquitetura demonstrou que a sincronização dos dados geotécnicos, como leituras de Piezômetros de Corda Vibrante e GPS Geodésico, é mantida abaixo de 10 segundos, um resultado notável em comparação com a coleta manual. Cardoso (2025)

Resultado Principal: A automação do fluxo de dados e a análise preditiva resultam em um TDA (Tempo Médio de Detecção de Anomalia) reduzido de dias para minutos. Esta redução na latência é o cerne da segurança preditiva, permitindo ações corretivas antes que a condição atinja o estado de falha iminente.

4.2 DETECÇÃO PREDITIVA DE RISCOS ESTRUTURAIS E MITIGAÇÃO DE FALHAS

A simulação de tensões e deformações no modelo BIM, alimentada por dados em tempo real, permite a identificação de um aumento não, uniforme na taxa de recalque diferencial e seepage (percolação) 48 horas antes do limite de ruptura (Nível 3) . Cardoso (2025)

- **Manutenção Preditiva:** O sistema, ao identificar tensões elevadas em pontos específicos do maciço, aciona um alerta de manutenção preventiva que visa restaurar o Fator de Segurança (FS). Isso permite intervenções como o reforço estrutural, interceptando o ciclo de falha antes que ele cause o desastre ambiental.

4.3 OTIMIZAÇÃO DA RESPOSTA À EMERGÊNCIA E PROTEÇÃO HUMANA

A eficácia do sistema de PVC de Resposta foi quantificada pela redução significativa do TMR (Tempo Médio de Resposta) de 45 minutos para 12 minutos em simulações [6].

- **Ação Dirigida e Mapas Dinâmicos:** O uso de EPI Conectivo (*wearables*) e o mapa de evacuação dinâmico do GD garantem que a localização de colaboradores seja precisa. Os Mapas de Evacuação Dinâmicos são gerados com base na simulação da mancha de inundação, incluindo dados vitais como a velocidade da correnteza e a altura da lâmina d'água, permitindo que a Defesa Civil emita alertas mais precisos e direcionados à população a jusante.

4.4 O GD COMO MEDIDA COMPENSATÓRIA PARA A SUSTENTABILIDADE

O Modelo BIM+IOT, ao mitigar o risco de falha estrutural através da detecção precoce de anomalias, configura-se como a medida compensatória ambiental mais eficaz [4]. A prevenção do despejo de rejeitos é a forma primordial de proteger o bioma da contaminação severa por metais pesados. A Gestão de Inventário baseada em IOT rastreia o uso de materiais e rejeitos, melhorando a Eficiência de Utilização de Recursos para 92% e contribuindo para a sustentabilidade da construção, alinhando-se aos princípios da ISO 19650 . Cardoso (2025)

5 CONCLUSÃO

O artigo foi consolidado dentro de um campo propositivo. Não obstante a esse fato, durante seu processo de desenvolvimento o conceito se mostrou com perspectiva favorável para ser implementado. O uso de um Gêmeo Digital na segurança de barragens com DPA alto, integrado sincronicamente no compartilhamento de dados com órgãos como os bombeiros e defesa civil, ao que tudo indica pode ser uma tomada de decisão vanguardista.

Apesar dos aspectos favoráveis ficou claro a possibilidade de o sistema proposto apresentar falhas, principalmente àquelas que decorrem das questões operacionais. Ainda assim, a chance de

atuar com previsibilidade e promover uma ação de resposta em tempo anterior a instalação de um sinistro torna esse modelo um objeto com alto potencial de valor.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Mineração (ANM). **Estatísticas de Segurança de Barragens e Regulamentação**. <https://www.gov.br/anm/pt,br>.

BASTOS, Pablo Jorge Pires; NUNES, Mirian Nunes de Carvalho. Os impactos ambientais originados devido o rompimento da barragem de Fundão: rejeito industrial de uma companhia mineradora que afetou o município de Mariana-MG. *Revista Interlocus*, v. 1, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15663921>.

BATISTA, Luciana Teixeira. *Metodologia para automatização da gestão sustentável da água em edificações pela interação do BIM – IOT – FM* [recurso eletrônico]. 2023. 1 recurso online (143 f., il., color.). Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2023. Orientador: Ricardo Hallal Fakury. Coorientador: José Ricardo Queiroz Franco.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução nº 220, de 16 de outubro de 2025**. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 17 out. 2025. Disponível em: <https://anmlegis.datalegis.net/>. Acesso em: 01 dez.2025.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://anmlegis.datalegis.net/>. Acesso em: 22 nov. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm]. Acesso em: 22 nov. 2025.

CARDOSO, João Pedro Milagres. Centros de monitoramento geotécnico em barragens de rejeito: revisão das abordagens manuais e automatizadas. 2025. 48 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. *Holos*, [S. l.], v. 1, p. 1–??, 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.5367. Artigo submetido em 21 nov. 2016 e aceito em 14 dez. 2016.

COSTA, F. G.; SILVA, R. M. **Modelagem de Propagação de Onda de Ruptura Utilizando BIM para Otimização de Rotas de Fuga**. Congresso Nacional de Engenharia Civil, 2023.

GARCIA, Laís dos Santos. Comportamento dinâmico em barragem de terra: um estudo comparativo de diferentes abordagens de análises sísmicas. 2025. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 2025.

HELENO, A. et al. **Aplicação da metodologia BIM na monitorização da segurança de barragens de aterro**. [Nome da Revista], 2022.

HELENO, Aline; AZENHA, Miguel; CALDEIRA, Laura; SILVA, Maria João. Aplicação da metodologia BIM na monitorização da segurança de barragens de aterro. Disponível em: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.38>. Acesso em: 2 dez. 2025.
https://anmlegis.datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=RES&numeroAto=00000095&seqAto=000&valorAno=2022&orgao=ANM/MME&cod_modulo=351&cod_menu=8731, consultado em 22/11/25)

ISO 19650,1:2018. **Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM).**

MALTA, Paola da Conceição Campos. *Efeitos do rompimento da barragem de Fundão nos solos afetados da região de Mariana-MG: revisão bibliográfica*. 2025. Monografia (Especialização), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

QINGLIN QI; TAO, F (2018) Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. IEEE Access, 6, 3585,3593.
doi:10.1109/access.2018.2793265.

QINGLIN QI; TAO, F.; HU, T.; ANWER, N. (2019) Enabling technologies and tools for digital twin. Journal of Manufacturing Systems, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>

SANTOS, A. R. **Desenvolvimento do Gêmeo Digital de Barragens**. Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2021.

SANTOS, Alan Ribeiro. Desenvolvimento do gêmeo digital de barragens. 2021. xiii, 65 p. Monografia de Projeto Final (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, [Distrito Federal], 2021.

SFALSIN, Fabrício Nascimento. Diagnóstico de defeitos em unidades geradoras hidrelétricas com base na solução de problemas inversos. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/46494>. Acesso em: dia mês abrev. ano.

SILVA, Evelyn Eduarda da. Análise comparativa da quota de acordos em barragens brasileiras nos anos de 2016, 2020 e 2023. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/34708>. Acesso em: dia mês abrev. ano.

SOUZA, L. L. et al. **Recalque e Liquefação em Barragens de Rejeitos: Lições de Brumadinho**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 40, n. 1, 2020.

XU, X.; LIU, Y. **Digital Twin , A New Paradigm for Engineering Systems**. In: Smart Factory and Sensing Systems. Springer, 2018.