

A IMPORTÂNCIA DO PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (PSB) NA MINERAÇÃO BRASILEIRA: FUNDAMENTOS TÉCNICOS PARA AVALIAÇÃO, MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DE RISCOS EM ESTRUTURAS DE REJEITOS

THE IMPORTANCE OF THE DAM SAFETY PLAN (PSB) IN BRAZILIAN MINING: TECHNICAL FOUNDATIONS FOR RISK ASSESSMENT, MONITORING, AND MITIGATION IN TAILINGS STRUCTURES

LA IMPORTANCIA DEL PLAN DE SEGURIDAD DE PRESAS (PSB) EN LA MINERÍA BRASILEÑA: FUNDAMENTOS TÉCNICOS PARA LA EVALUACIÓN, EL MONITOREO Y LA MITIGACIÓN DE RIESGOS EN ESTRUCTURAS DE RELAVES

Pedro Henrique Gonçalves Ribeiro¹
Cláudio Bonfante de Oliveira²
Aauri Silveira Rodrigues Junior³

RESUMO: A mineração é uma atividade estratégica para a economia global, mas envolve riscos significativos, especialmente relacionados às barragens de rejeitos. Este artigo explora a importância do Plano de Segurança de Barragens (PSB) como ferramenta de gestão de risco, prevenção de acidentes e sustentabilidade operacional. Discute-se a evolução normativa, os métodos de monitoramento, a implementação de planos de contingência, impactos ambientais e sociais e os benefícios para a governança corporativa.

Palavras-chave: Segurança de Barragens. Mineração. Gestão de Riscos. Monitoramento Geotécnico. Barragens de Rejeitos.

ABSTRACT: Mining is a strategic activity for the global economy, but it involves significant risks, especially those related to tailings dams. This article explores the importance of the Dam Safety Plan (PSB) as a tool for risk management, accident prevention, and operational sustainability. It discusses the evolution of regulations, monitoring methods, the implementation of contingency plans, environmental and social impacts, and the benefits for corporate governance.

Keywords: Dam Safety. Mining. Risk Management. Geotechnical Monitoring. Tailings Dams.

¹ Graduando em Engenharia Civil - Universidade de Vassouras.

² Mestrado Profissional em Gestão de Sistemas de Engenharias - Universidade de Vassouras.

³ Mestrado em Materiais - Universidade de Vassouras.

RESUMEN: La minería es una actividad estratégica para la economía global, pero implica riesgos significativos, especialmente relacionados con las presas de relaves. Este artículo explora la importancia del Plan de Seguridad de Presas (PSB) como herramienta de gestión de riesgos, prevención de accidentes y sostenibilidad operativa. Se analiza la evolución normativa, los métodos de monitoreo, la implementación de planes de contingencia, los impactos ambientales y sociales, y los beneficios para la gobernanza corporativa.

Palabras clave: Seguridad de Presas. Minería. Gestión de Riesgos. Monitoreo Geotécnico. Presas de Relaves.

I. INTRODUÇÃO

As barragens de rejeitos constituem estruturas essenciais à atividade minerária, destinadas à contenção dos resíduos gerados durante o beneficiamento mineral. Apesar de sua importância operacional, apresentam elevada complexidade técnica e riscos expressivos, sobretudo quando associados a falhas de projeto, monitoramento, manutenção ou governança. Os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), evidenciaram os graves impactos humanos, ambientais, sociais e econômicos decorrentes dessas estruturas, impulsionando uma profunda revisão dos mecanismos de gestão da segurança de barragens no Brasil.

Nesse contexto, o Plano de Segurança de Barragens (PSB) consolidou-se como o principal instrumento de gestão de riscos aplicável às barragens de rejeitos, reunindo procedimentos de caracterização geotécnica, monitoramento contínuo, inspeções periódicas, manutenção preventiva e planejamento para situações de emergência. Paralelamente, o ordenamento jurídico fortaleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e aperfeiçoada pela Lei nº 14.066/2020, enquanto a Agência Nacional de Mineração (ANM) editou normas mais rigorosas, com destaque para a Resolução ANM nº 95/2022. Soma-se a esse cenário a crescente incorporação de normas técnicas nacionais, como a ABNT NBR 13.028, e de diretrizes internacionais da International Commission on Large Dams (ICOLD), que contribuiriam para o aprimoramento dos padrões de monitoramento e gestão de riscos.

Entretanto, os desastres de Mariana e Brumadinho demonstraram que o fortalecimento do arcabouço normativo e o avanço das tecnologias de monitoramento, embora indispensáveis, não são suficientes para garantir a segurança dessas estruturas. As investigações posteriores

revelaram falhas sistêmicas relacionadas à governança, à fiscalização, ao monitoramento e à integração entre os diferentes agentes responsáveis pela gestão dos riscos, evidenciando que a efetividade do PSB depende tanto da qualidade dos instrumentos técnicos quanto da capacidade institucional de implementá-los.

Diante desse cenário, este artigo busca responder à seguinte questão: em que medida o Plano de Segurança de Barragens contribui para a prevenção de acidentes em barragens de rejeitos e quais são os principais desafios técnicos, regulatórios e institucionais para sua efetiva implementação?

A relevância da pesquisa decorre da centralidade da segurança de barragens para a Engenharia Civil contemporânea, especialmente diante da expansão da atividade minerária e da crescente demanda por modelos de gestão capazes de conciliar eficiência operacional, proteção ambiental e responsabilidade social. Além de reduzir a probabilidade de acidentes, a gestão preventiva contribui para minimizar passivos ambientais, custos operacionais e riscos às comunidades potencialmente atingidas, reafirmando o PSB como instrumento estratégico para uma mineração sustentável.

O objetivo geral consiste em analisar o Plano de Segurança de Barragens como instrumento de gestão de riscos aplicado às barragens de rejeitos da mineração brasileira, examinando seus fundamentos técnicos, normativos e institucionais e sua contribuição para a prevenção de acidentes. Especificamente, busca-se analisar a evolução do marco regulatório brasileiro, discutir os principais instrumentos de monitoramento geotécnico, avaliar a contribuição das tecnologias aplicadas à gestão de riscos e identificar os desafios relacionados à efetiva implementação do PSB.

A pesquisa possui natureza qualitativa, de caráter exploratório-descritivo, fundamentando-se em revisão bibliográfica, documental e normativa. Foram examinadas a legislação brasileira sobre segurança de barragens, os regulamentos da Agência Nacional de Mineração, normas técnicas nacionais e internacionais e a literatura especializada em Engenharia Civil, Geotecnia e gestão de riscos. Os rompimentos de Mariana e Brumadinho são analisados como marcos da evolução normativa e institucional da segurança de barragens no Brasil.

O estudo delimita-se à análise dos fundamentos técnicos, normativos e institucionais do Plano de Segurança de Barragens aplicado às barragens de rejeitos da mineração brasileira, não

abrangendo dimensionamentos estruturais, modelagens geotécnicas específicas ou análises periciais dos rompimentos.

Além desta introdução, o artigo está organizado em cinco seções: inicialmente são apresentados os fundamentos teóricos da segurança de barragens; em seguida, examina-se a evolução do marco regulatório brasileiro; posteriormente, discutem-se os desafios relacionados ao monitoramento geotécnico e às tecnologias emergentes; na sequência, são apresentadas propostas de aperfeiçoamento do Plano de Segurança de Barragens; por fim, expõem-se as considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evolução da mineração brasileira ocorreu, durante décadas, sem um arcabouço regulatório compatível com a complexidade técnica das barragens de rejeitos. Impulsionada pela expansão da atividade mineral, a gestão dessas estruturas desenvolveu-se sob uma lógica predominantemente reativa, em que o aperfeiçoamento normativo sucedia grandes acidentes. Esse processo culminou na consolidação de um modelo regulatório orientado à prevenção, ao monitoramento e à gestão integrada de riscos.

Nesse contexto, a Agência Nacional de Mineração (ANM) passou a desempenhar papel central ao estabelecer requisitos técnicos que ultrapassam a mera conformidade documental. O Plano de Segurança de Barragens (PSB) consolidou-se como o principal instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e aperfeiçoada pela Lei nº 14.066/2020, integrando inspeções, monitoramento geotécnico, manutenção preventiva e planejamento para situações de emergência.

A efetividade desse sistema depende da articulação entre conhecimento técnico e capacidade institucional, exigindo a atuação coordenada de engenheiros, geólogos, hidrólogos, gestores e órgãos fiscalizadores. Assim, o PSB deixa de representar mera exigência normativa para constituir um instrumento de gestão integrada de riscos, voltado à preservação da estabilidade estrutural, da vida humana, do meio ambiente e das comunidades potencialmente atingidas.

2.1. Componentes fundamentais do plano de segurança de barragens

O Plano de Segurança de Barragens estrutura-se a partir das diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens, especialmente pelos arts. 7º, 8º, 9º e 11 da Lei nº 12.334/2010, alterada pela Lei nº 14.066/2020. Esses dispositivos definem os elementos essenciais do plano e atribuem ao empreendedor a responsabilidade pela integridade física e operacional da barragem.

O primeiro componente corresponde à caracterização e classificação da estrutura segundo a Categoria de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA), considerando fatores como características construtivas, estado de conservação, volume armazenado e impactos decorrentes de eventual ruptura. Essa classificação orienta o dimensionamento das ações de monitoramento, fiscalização e controle.

Outro elemento essencial é a instrumentação geotécnica, responsável pelo acompanhamento contínuo de parâmetros como pressão neutra, deslocamentos e deformações por meio de equipamentos específicos, cuja interpretação subsidia a avaliação do comportamento estrutural e a identificação precoce de anomalias.

O PSB também contempla inspeções regulares e auditorias independentes, regulamentadas pela Agência Nacional de Mineração, que permitem verificar as condições operacionais da barragem, validar os pressupostos técnicos do empreendimento e identificar necessidades de intervenção preventiva.

Complementando esse conjunto de instrumentos, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) estabelece procedimentos para resposta a situações críticas, incluindo sistemas de alerta, definição de zonas de autossalvamento, rotas de evacuação e protocolos de atuação dos órgãos competentes. Dessa forma, a segurança de barragens compreende tanto medidas preventivas quanto estratégias de preparação e resposta a eventuais cenários de ruptura.

O aperfeiçoamento promovido pela Lei nº 14.066/2020 reforçou essa abordagem ao ampliar os mecanismos de fiscalização, transparência e responsabilização dos empreendedores, além de restringir métodos construtivos de maior risco, consolidando um modelo regulatório baseado na integração entre engenharia, governança e gestão preventiva de riscos.

2.2. Monitoramento contínuo

O monitoramento contínuo constitui o núcleo operacional do Plano de Segurança de Barragens, viabilizando o acompanhamento permanente das condições de estabilidade das barragens de rejeitos. Considerando a influência de fatores como saturação, carregamentos sucessivos e características geotécnicas dos materiais, a identificação precoce de alterações é essencial para a prevenção de falhas e para a gestão preventiva dos riscos.

Esse processo fundamenta-se na instrumentação geotécnica, por meio de equipamentos como piezômetros, inclinômetros, extensômetros e marcos superficiais, responsáveis pelo monitoramento de pressões internas, deslocamentos e deformações. A análise integrada dessas informações, associada às inspeções periódicas de campo, permite identificar anomalias estruturais, avaliar o desempenho da barragem e subsidiar decisões técnicas voltadas à manutenção de condições seguras de operação.

O monitoramento também incorpora variáveis hidrológicas e ambientais, como níveis d'água, vazões e precipitações, cuja influência sobre a estabilidade das estruturas se torna ainda mais relevante diante da intensificação de eventos climáticos extremos. Nesse contexto, a utilização de tecnologias como sensoriamento remoto, interferometria por radar e sistemas automatizados de aquisição de dados ampliou significativamente a capacidade de monitoramento em tempo real e a detecção precoce de comportamentos anômalos.

Assim, o monitoramento contínuo deixa de exercer função exclusivamente fiscalizatória para consolidar-se como instrumento estratégico da gestão de riscos. Ao integrar dados geotécnicos, ambientais e operacionais, fortalece a capacidade de antecipação, prevenção e resposta a potenciais cenários de instabilidade, contribuindo para a efetividade do Plano de Segurança de Barragens.

Gráfico 1 – Relatório de Evolução do Cadastro de Barragem no SNISB



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico/ANA (2026).

2.3. Manutenção preventiva e intervenção

A manutenção preventiva constitui um dos pilares do Plano de Segurança de Barragens (PSB), decorrendo do dever de assegurar a integridade física e operacional das estruturas previsto no art. 9º da Lei nº 12.334/2010. Enquanto o monitoramento contínuo identifica anomalias e tendências de comportamento, a manutenção preventiva compreende as intervenções destinadas a corrigir ou mitigar essas ocorrências antes que comprometam a estabilidade da barragem.

Nesse contexto, o PSB prevê procedimentos sistemáticos para o controle de processos erosivos, infiltrações, surgências e deficiências nos sistemas de drenagem (VICK, 1990). A identificação precoce dessas condições permite a adoção de medidas como reforços estruturais, reconfiguração de taludes e recuperação dos dispositivos de drenagem, preservando os níveis de segurança estabelecidos em projeto. Destaca-se, ainda, o controle da pressão neutra e da linha freática, cuja elevação pode reduzir a resistência ao cisalhamento dos rejeitos e aumentar a suscetibilidade a instabilidades.

Além das intervenções físicas, a manutenção preventiva compreende a atualização contínua dos procedimentos operacionais com base nas informações obtidas pelo monitoramento, pelas inspeções e pelas revisões técnicas. Dessa forma, a gestão da barragem adota uma abordagem dinâmica e adaptativa, fortalecendo a confiabilidade operacional,

reduzindo a probabilidade de falhas estruturais e consolidando o PSB como instrumento essencial da gestão preventiva de riscos.

2.4. O plano de contingência e gestão de emergência

O Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), previsto no art. 11 da Lei nº 12.334/2010, complementa o Plano de Segurança de Barragens ao reconhecer que, mesmo diante de medidas preventivas, o risco de falha não pode ser integralmente eliminado. Dessa forma, a gestão de emergências passa a integrar o sistema de segurança, estabelecendo procedimentos para reduzir os impactos de eventuais acidentes.

O PAEBM define protocolos para comunicação com os órgãos competentes, acionamento de sistemas de alerta, evacuação das comunidades potencialmente atingidas e coordenação entre os agentes responsáveis pela resposta à emergência. Também contempla a delimitação das Zonas de Autossalvamento (ZAS), o planejamento de rotas de evacuação e a realização periódica de treinamentos e exercícios simulados, assegurando a efetividade dos procedimentos previstos.

Além da proteção à vida humana, o plano incorpora medidas voltadas à contenção de rejeitos e à mitigação dos impactos ambientais (MONONEN et al., 2014), evidenciando que a gestão de emergências envolve dimensões técnicas, institucionais, sociais e ambientais. Assim, o PAEBM consolida-se como instrumento estratégico da gestão integrada de riscos, fortalecendo a capacidade de resposta diante de cenários críticos e complementando as ações preventivas previstas no Plano de Segurança de Barragens.

2.5. Impactos e benefícios

A implementação de um Plano de Segurança de Barragens (PSB) produz impactos que ultrapassam a estabilidade estrutural, refletindo nas dimensões social, ambiental, econômica e institucional da atividade minerária. Ao reduzir a probabilidade de falhas, o plano contribui para a proteção da vida humana, a preservação dos ecossistemas e a mitigação dos danos às comunidades potencialmente atingidas.

Sob a perspectiva econômica e gerencial, o PSB reduz custos associados a acidentes, paralisações operacionais, sanções regulatórias e passivos ambientais, ao mesmo tempo em que fortalece a governança por meio da ampliação da transparência, da rastreabilidade das decisões

e da conformidade regulatória. Paralelamente, a necessidade de monitoramento contínuo impulsiona a adoção de tecnologias como sensoriamento remoto, instrumentação automatizada e modelagem computacional, ampliando a capacidade preditiva da gestão de riscos e promovendo inovação na engenharia geotécnica (USACE, 2014).

Dessa forma, o Plano de Segurança de Barragens consolida-se como um instrumento estratégico de gestão integrada de riscos, articulando desempenho técnico, sustentabilidade ambiental, eficiência operacional e responsabilidade socioambiental no contexto da mineração.

3. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e objetivos exploratórios e descritivos, desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica e documental. O estudo concentra-se na análise dos fundamentos técnicos, normativos e institucionais do Plano de Segurança de Barragens (PSB) aplicado às barragens de rejeitos da mineração brasileira.

O referencial teórico foi constituído por livros, artigos científicos, dissertações, teses e publicações especializadas nas áreas de Engenharia Geotécnica, Segurança de Barragens, Gestão de Riscos e Governança Ambiental. A pesquisa documental compreendeu a análise da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), das alterações introduzidas pela Lei nº 14.066/2020, das resoluções da Agência Nacional de Mineração (ANM), das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e de diretrizes internacionais elaboradas por organismos como a International Commission on Large Dams (ICOLD), a International Organization for Standardization (ISO) e a Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD).

A seleção das fontes considerou critérios de relevância temática, atualidade normativa e reconhecimento técnico-científico, priorizando publicações posteriores aos rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), em razão das mudanças regulatórias e institucionais decorrentes desses eventos. A análise concentrou-se em cinco eixos temáticos: classificação de barragens, monitoramento contínuo, manutenção preventiva, planos de emergência e governança da segurança.

Os dados foram organizados por meio de análise documental e bibliográfica, utilizando-se a análise de conteúdo para identificar convergências e desafios relacionados à implementação

do Plano de Segurança de Barragens. A investigação parte da hipótese de que a efetividade do PSB depende da integração entre monitoramento geotécnico, fiscalização regulatória, qualificação técnica e adoção de tecnologias de monitoramento, constituindo um sistema de gestão capaz de fortalecer a prevenção de acidentes.

Como delimitação metodológica, o estudo restringe-se à análise técnico-normativa e institucional do PSB, não abrangendo investigações de campo, modelagens geotécnicas ou avaliações estruturais de barragens específicas. Ainda assim, a incorporação de estudos de caso, documentos oficiais e literatura especializada confere robustez às análises e permite compreender o Plano de Segurança de Barragens como instrumento est

4. ESTUDO DE CASOS CRÍTICOS

Os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), constituem marcos para a compreensão dos desafios da segurança de barragens no Brasil. Ambos evidenciaram que a prevenção de acidentes depende não apenas da existência de instrumentos técnicos e normativos, mas também da capacidade institucional de interpretar informações, tomar decisões tempestivas e implementar medidas preventivas.

No caso de Mariana, o rompimento da barragem de Fundão revelou fragilidades que extrapolaram o comportamento geotécnico da estrutura (IBAMA, 2022). Embora existissem mecanismos formais de controle, verificaram-se deficiências no monitoramento, na fiscalização e na resposta às situações de risco. O Plano de Segurança de Barragens mostrou-se insuficiente para assegurar uma gestão integrada, resultando em graves impactos humanos, ambientais e socioeconômicos.

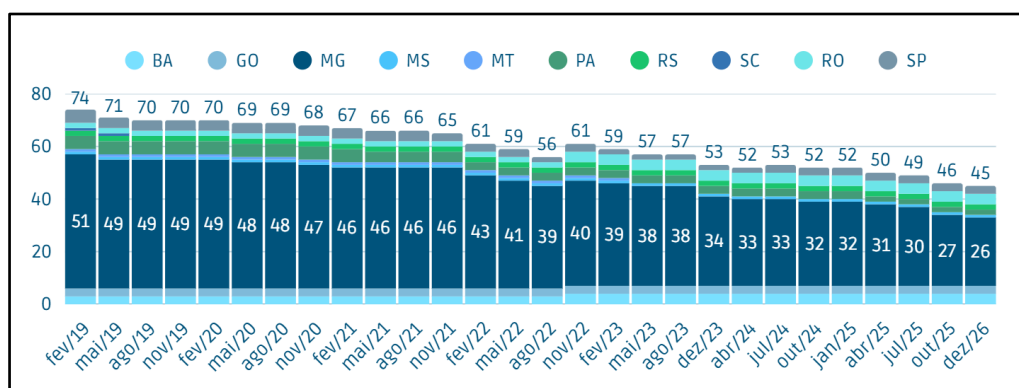
Em Brumadinho, em 2019, a existência de sistemas de monitoramento e registros técnicos não impediu o colapso da estrutura, que ocasionou 270 mortes e extensos danos ambientais (VALE S.A., 2022). O episódio evidenciou limitações na interpretação das informações disponíveis e na adoção de medidas preventivas, demonstrando que a efetividade dos sistemas de segurança depende tanto da qualidade dos dados quanto da governança responsável por sua análise e utilização.

A análise conjunta desses eventos demonstra que o aprimoramento da segurança de barragens exige a integração entre monitoramento geotécnico, fiscalização, governança

institucional e gestão de riscos. Mais do que ampliar exigências regulatórias, torna-se necessário fortalecer os processos de tomada de decisão, a coordenação entre os órgãos envolvidos e a capacidade de resposta diante de indícios de instabilidade.

Nesse contexto, a Política Nacional de Segurança de Barragens passou por importante processo de fortalecimento, especialmente após as alterações promovidas pela Lei nº 14.066/2020 e pelas normas posteriores da Agência Nacional de Mineração. As mudanças ampliaram os mecanismos de fiscalização, transparência e responsabilização, consolidando uma abordagem mais preventiva e integrada da gestão da segurança de barragens no Brasil.

Gráfico 2 - Histórico da distribuição de estruturas a montante inseridas no PNSB em função do tempo



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2026).

Paralelamente, a incorporação de tecnologias emergentes introduz um novo elemento nessa equação. Sistemas de radar interferométrico, sensoriamento remoto por satélite (InSAR) e modelos baseados em inteligência artificial ampliam significativamente a capacidade de detecção de anomalias e de antecipação de comportamentos críticos. Em tese, esses avanços permitiram superar as limitações observadas nos casos analisados, deslocando a gestão de barragens de um paradigma reativo para um modelo preditivo. Contudo, essa promessa carrega uma ambiguidade fundamental. Quanto mais sofisticados os sistemas de monitoramento, maior a dependência de interpretação qualificada. O volume de dados cresce, mas a decisão continua sendo, em última instância, humana.

Dessa forma, a trajetória recente da mineração brasileira sugere que o desafio não está apenas em desenvolver melhores ferramentas, mas em construir estruturas institucionais capazes de utilizá-las de maneira responsável e eficaz. Mariana revelou a ausência de integração;

Brumadinho evidenciou a falha na internalização. Entre ambos, delineia-se um problema mais profundo, que atravessa a engenharia e alcança a própria forma como a sociedade organiza sua relação com o risco.

4.1. Mitigação de riscos e governança

A mitigação de riscos em barragens de rejeitos ultrapassa a dimensão estritamente técnica, envolvendo aspectos organizacionais, regulatórios e institucionais que condicionam a efetividade do Plano de Segurança de Barragens (PSB). Embora a estabilidade estrutural seja requisito fundamental, a prevenção de acidentes depende da integração entre monitoramento, tomada de decisão, fiscalização e governança.

Nesse contexto, a cultura organizacional exerce papel decisivo. A efetividade do PSB está diretamente relacionada à incorporação da gestão de riscos como princípio orientador das operações, evitando que os instrumentos de segurança se restrinjam ao cumprimento formal de exigências regulatórias. Da mesma forma, a autonomia técnica das equipes responsáveis pelas avaliações e auditorias constitui elemento essencial para assegurar a interpretação independente dos dados e a adoção tempestiva de medidas preventivas.

A governança também pressupõe comunicação eficiente com as comunidades potencialmente atingidas e articulação entre empreendedores, órgãos reguladores e instituições de defesa civil. Planos de emergência somente alcançam sua finalidade quando os procedimentos de alerta, evacuação e resposta são amplamente conhecidos e operacionalmente viáveis, reduzindo a vulnerabilidade das populações expostas (ISO, 2018).

Assim, a mitigação de riscos resulta da integração entre engenharia, governança e gestão institucional. Mais do que um conjunto de procedimentos técnicos, o Plano de Segurança de Barragens constitui um instrumento de coordenação entre diferentes atores e responsabilidades, fortalecendo a capacidade preventiva do sistema e contribuindo para uma mineração mais segura, transparente e socialmente responsável.

5. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS NA GESTÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS

Apesar dos avanços promovidos pela Política Nacional de Segurança de Barragens e pelo fortalecimento da atuação regulatória da Agência Nacional de Mineração, a efetividade do Plano de Segurança de Barragens (PSB) ainda depende da consolidação de práticas técnicas e

institucionais capazes de assegurar monitoramento contínuo, tomada de decisão tempestiva e fiscalização eficiente. A existência de instrumentos normativos, por si só, não garante a redução dos riscos, exigindo sua efetiva incorporação à gestão operacional das barragens.

Entre os principais desafios destaca-se a formação de profissionais especializados em Engenharia Geotécnica, cuja atuação é fundamental para a interpretação dos dados de monitoramento, identificação precoce de anomalias e definição de medidas preventivas. A crescente incorporação de tecnologias, como sensoriamento remoto, modelagem numérica e sistemas automatizados de aquisição de dados, amplia a capacidade de monitoramento, mas também demanda elevado grau de qualificação técnica para transformar informações em decisões confiáveis.

Outro aspecto estratégico refere-se ao fortalecimento da governança da segurança de barragens. A integração entre empreendedores, órgãos reguladores, equipes técnicas, defesa civil e comunidades potencialmente afetadas é indispensável para aprimorar a comunicação de riscos, a execução dos planos de emergência e a capacidade de resposta diante de situações críticas. Paralelamente, investimentos em centros integrados de monitoramento, bases de dados geotécnicos e inovação tecnológica podem ampliar a eficiência dos mecanismos de fiscalização e prevenção.

A evolução do Plano de Segurança de Barragens após os desastres de Mariana e Brumadinho evidencia um processo de aprendizagem institucional que resultou no fortalecimento do marco regulatório brasileiro. Contudo, a consolidação de um modelo efetivamente preventivo depende da integração entre engenharia, tecnologia, fiscalização e governança, orientada por uma cultura permanente de gestão de riscos.

Nesse contexto, o futuro da segurança de barragens está associado não apenas ao aperfeiçoamento dos instrumentos técnicos e normativos, mas à capacidade das instituições de promover decisões fundamentadas na prevenção, na responsabilidade socioambiental e na sustentabilidade da atividade minerária. O Plano de Segurança de Barragens reafirma-se, assim, como instrumento estratégico para reduzir riscos, proteger vidas e fortalecer a segurança operacional das estruturas de rejeitos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da literatura, da legislação e dos estudos de caso indica que o Plano de Segurança de Barragens (PSB) constitui o principal instrumento de gestão de riscos aplicado às barragens de rejeitos no Brasil. Sua efetividade depende da integração entre monitoramento geotécnico contínuo, manutenção preventiva, fiscalização regulatória e governança institucional capaz de converter dados técnicos em decisões operacionais tempestivas.

A evolução normativa posterior aos rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidencia o fortalecimento do marco regulatório, com destaque para a ampliação das competências da Agência Nacional de Mineração (ANM), o endurecimento das exigências relativas aos Planos de Ação de Emergência e a restrição de métodos construtivos de maior risco, como o alteamento a montante. Esses avanços indicam uma transição progressiva para um modelo mais preventivo de gestão de segurança.

Do ponto de vista técnico, a incorporação de tecnologias de monitoramento em tempo real, como radar interferométrico, sensoriamento remoto e sistemas automatizados de aquisição de dados, amplia a capacidade de detecção precoce de instabilidades e reduz o tempo de resposta a eventos críticos. Esse avanço, contudo, reforça a dependência de capacidade interpretativa qualificada, uma vez que a eficácia do sistema depende da tradução adequada dos dados em decisões operacionais.

No plano operacional e institucional, os resultados indicam que a efetividade do PSB está mais relacionada à qualidade da governança e à capacidade organizacional de interpretação dos dados do que à simples disponibilidade de instrumentos técnicos. Nesse sentido, a qualificação profissional e a autonomia técnica das equipes responsáveis pela segurança constituem fatores determinantes para a prevenção de falhas.

Com base nessas evidências, identificam-se quatro direções principais para o aprimoramento do PSB: (i) ampliação da automação do monitoramento geotécnico; (ii) fortalecimento de auditorias independentes e revisões periódicas de segurança; (iii) integração de bases de dados geotécnicas, ambientais e meteorológicas; e (iv) intensificação de treinamentos, comunicação de risco e simulações de emergência junto às comunidades expostas.

A articulação dessas medidas tende a elevar a capacidade preditiva dos sistemas de segurança e a fortalecer a governança da mineração, reduzindo a probabilidade de falhas e

ampliando a efetividade do Plano de Segurança de Barragens como instrumento de gestão de riscos.

7. SIMULAÇÕES DO ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de avaliar os efeitos potenciais do aprimoramento dos mecanismos previstos no Plano de Segurança de Barragens (PSB), realizou-se uma simulação comparativa entre os cenários observados nos casos de Mariana e Brumadinho e um cenário hipotético com implementação integral das medidas propostas.

A simulação possui caráter qualitativo e não busca reproduzir os eventos ocorridos, mas evidenciar como diferentes níveis de monitoramento, governança e resposta institucional influenciam a gestão do risco em barragens de rejeitos.

Tabela 1 – Comparação entre cenários de gestão da segurança

Aspecto Avaliado	Cenário Observado (Mariana e Brumadinho)	Cenário com PSB Aprimorado
Monitoramento instrumental	Parcialmente automatizado	Monitoramento integral em tempo real
Integração de dados	Limitada	Plataforma integrada de gestão
Identificação de anomalias	Reativa	Preditiva
Auditorias independentes	Periódicas	Frequentes e integradas
Comunicação com comunidades	Restrita	Permanente e participativa
Simulados de emergência	Limitados	Regulares e obrigatórios
Tempo de resposta a emergências	Elevado	Reduzido

Nível de governança	Moderado	Elevado
---------------------	----------	---------

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A análise comparativa indica que sistemas automatizados de monitoramento ampliam a capacidade de detecção precoce de deslocamentos, deformações e variações nos níveis piezométricos das estruturas. De forma complementar, a integração entre dados geotécnicos, hidrológicos e meteorológicos permite antecipar cenários de maior vulnerabilidade operacional, especialmente em períodos de chuvas intensas ou eventos climáticos extremos.

No que se refere à comunicação de risco, a realização sistemática de treinamentos e exercícios de evacuação em comunidades situadas em zonas de autossalvamento contribui para a redução do tempo de resposta em situações de emergência, aumentando a efetividade dos protocolos previstos no PAEBM. Adicionalmente, a intensificação de auditorias independentes e o fortalecimento dos mecanismos de fiscalização elevam a confiabilidade dos diagnósticos de segurança, mitigando a influência de fatores organizacionais associados à subestimação de riscos.

Os resultados da simulação indicam que a articulação entre tecnologia, capacitação profissional e governança institucional possui elevado potencial para aprimorar a segurança operacional das barragens de rejeitos. Embora não seja possível eliminar integralmente o risco, a implementação das medidas propostas reduz a probabilidade de falhas e os impactos associados a eventuais situações de emergência.

16

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que o Plano de Segurança de Barragens (PSB), quando efetivamente implementado, transcende sua função normativa e assume o papel de um instrumento estruturante da gestão de riscos na mineração. Sua efetividade depende da articulação entre monitoramento contínuo, capacidade técnica, governança institucional e incorporação sistemática de medidas preventivas.

A análise evidenciou, contudo, que a segurança de barragens não pode ser compreendida como resultado exclusivo do aperfeiçoamento tecnológico ou normativo. Trata-se de um campo atravessado por incertezas técnicas e condicionantes institucionais, no qual a forma de

interpretação e uso das informações disponíveis é tão relevante quanto a existência dos próprios instrumentos de controle.

Os casos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) ilustram de forma inequívoca que falhas de governança e fragilidades na cultura de segurança podem comprometer sistemas tecnicamente estruturados. Esses eventos reforçam a necessidade de fortalecimento não apenas dos mecanismos regulatórios, mas também da capacidade institucional de tomada de decisão em contextos de risco.

Nesse sentido, o aprimoramento do PSB deve ser compreendido como um processo contínuo de evolução institucional, envolvendo tecnologias de monitoramento, qualificação profissional, auditorias independentes e fortalecimento da fiscalização. Contudo, tais elementos somente produzem efeitos consistentes quando inseridos em uma cultura organizacional orientada pela prevenção e pela responsabilidade socioambiental.

Conclui-se que a segurança de barragens não se traduz em um estado definitivo de controle, mas em um processo permanente de gestão do risco. Nesse contexto, a engenharia geotécnica opera necessariamente sob condições de incerteza, o que exige não a busca por eliminação absoluta do risco, mas sua administração responsável, informada por critérios técnicos e compromissos éticos com a preservação da vida e do meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Relatórios Anuais de Segurança de Barragens**. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-2> >.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 95/2022. Dispõe sobre segurança de barragens de mineração**. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf> >.
3. ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Relatórios técnicos sobre segurança de barragens**. Disponível em: < https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/109328?returnUrl=/sophia_web/Home/Index&guid=1753747207284 >.
4. ANCOLD (AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS). **Guidelines on Tailings Dams**. 2019. Disponível em: < https://www.ancold.org.au/wp-content/uploads/2019/10/Tailings-Guideline-Addendum-July-2019_v2.pdf >.

5. AZAM, S.; LI, Q. **Tailings dam failures: A review of the last 100 years.** Geotechnical News, 2010. Disponível em: < <https://ksmpjproject.com/wp-content/uploads/2017/08/Tailings-Dam-Failures-Last-100-years-Azam2010.pdf> >.
6. BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm >.
7. BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Atualiza a Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm >.
8. ESA (EUROPEAN SPACE AGENCY). **Remote Sensing for Dam Monitoring.** Disponível em: < https://www-esaint.translate.google.com/About_Us/Law_at_ESA/Intellectual_Property_Rights/Remote_sensing_data?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc >
9. GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
10. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Relatório de Impacto Ambiental – Rompimento da Barragem de Fundão (Mariana).** Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/> >.
11. ISO. **ISO 31000: Risk Management – Guidelines.** Geneva, 2018. Disponível em: < https://www-iso.org.translate.google.com/standard/65694.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc >.
12. MONONEN, T. et al. **Social and environmental impacts of mining activities in the EU.** Resources Policy, 2014. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/361601567_Social_and_environmental_impacts_of_mining_activities_in_the_EU >.
13. OECD. **Due Diligence Guidance for Responsible Mineral Supply Chains.** Disponível em: < https://www.oecd.org/en/publications/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-supply-chains-of-minerals-from-conflict-affected-and-high-risk-areas_9789264252479-en.html >.
14. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS (SNISB). **Confira e entenda as classificações existentes para as barragens.** Disponível em: < <https://www.snisb.gov.br/entenda-as-classificacoes/> >.
15. VALE S.A. **Relatórios sobre o rompimento da barragem de Brumadinho.** 2019. Disponível em: <https://vale.com/> >.
16. VICK, S. G. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams.** Colorado: BiTech, 1990. Disponível em: < https://damfailures.org/sites/default/files/wp-pdf/Vick_Steven_Planning_Design_Analysis_Tailings_Dams_1990-1.pdf >.

