

**GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS DE REJEITOS MINERAIS:
EXPLORANDO O POTENCIAL DA RISK BREAKDOWN STRUCTURE**

*RISK MANAGEMENT IN MINERAL TAILINGS DAMS: EXPLORING THE POTENTIAL OF
THE RISK BREAKDOWN STRUCTURE*

GLEDSON BRITO MIRANDA

UFPA

BRUNO RAFAEL DIAS DE LUCENA

UFPA

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS DE REJEITOS MINERAIS: EXPLORANDO O POTENCIAL DA RISK BREAKDOWN STRUCTURE

Objetivo do estudo

O objetivo do estudo é o desenvolvimento e a validação de uma Risk Breakdown Structure (RBS) específica para barragens de rejeitos minerais, visando padronizar a identificação e a comunicação de riscos de uma barragem, no contexto de segurança em barragens de rejeitos.

Relevância/originalidade

A originalidade do estudo reside em adaptar a RBS, ferramenta consolidada em projetos de engenharia, para o contexto específico das barragens de rejeitos minerais. O tema ganha relevância diante das recorrentes rupturas, lacunas nas práticas tradicionais de classificação de risco.

Metodologia/abordagem

A metodologia adotada foi qualitativa, conduzida em três etapas: revisão técnica para embasamento do estudo, identificação preliminar de riscos por análise documental exploratória, e o desenvolvimento da RBS através de um painel de especialistas com a técnica de brainstorming.

Principais resultados

A RBS consolidou 56 riscos distribuídos em 3 áreas e 9 categorias. Destacaram-se os riscos geotécnicos, como instabilização, liquefação, galgamento e erosão interna. Também foram identificados riscos sociais, ambientais e econômicos, muitas vezes negligenciados nas avaliações tradicionais.

Contribuições teóricas/metodológicas

Teoricamente, o estudo amplia o campo da gestão de riscos ao adaptar a RBS para barragens de rejeitos. Metodologicamente, demonstra a aplicabilidade da estrutura como base para futuras análises, validação empírica e integração com métodos multicritério de priorização e tomada de decisão.

Contribuições sociais/para a gestão

O estudo oferece suporte à gestão ao estruturar riscos de forma clara, fortalecendo decisões preventivas. Socialmente, contribui para reduzir desastres, proteger comunidades vulneráveis e minimizar danos ambientais, alinhando às normas internacionais e demandas sociais por maior segurança e transparência.

Palavras-chave: Barragem de rejeito, Estrutura Analítica de Riscos, Gerenciamento de risco

RISK MANAGEMENT IN MINERAL TAILINGS DAMS: EXPLORING THE POTENTIAL OF THE RISK BREAKDOWN STRUCTURE

Study purpose

The objective of the study is to develop and validate a specific Risk Breakdown Structure (RBS) for mineral tailings dams, aiming to standardize the identification and communication of dam risks in the context of tailings dam safety.

Relevance / originality

The originality of the study lies in adapting RBS, a tool consolidated in engineering projects, to the specific context of mineral tailings dams. The topic gains relevance in light of recurring breaches and gaps in traditional risk classification practices.

Methodology / approach

The methodology adopted was qualitative, conducted in three stages: technical review to support the study, preliminary identification of risks through exploratory document analysis, and development of the RBS through a panel of experts using the brainstorming technique.

Main results

RBS consolidated 56 risks distributed across three areas and nine categories. Geotechnical risks stood out, such as instability, liquefaction, overtopping, and internal erosion. Social, environmental, and economic risks were also identified, which are often overlooked in traditional assessments.

Theoretical / methodological contributions

Theoretically, the study broadens the field of risk management by adapting RBS to tailings dams. Methodologically, it demonstrates the applicability of the framework as a basis for future analysis, empirical validation, and integration with multi-criteria prioritization and decision-making methods.

Social / management contributions

The study supports management by clearly structuring risks, strengthening preventive decisions. Socially, it contributes to reducing disasters, protecting vulnerable communities, and minimizing environmental damage, aligning with international standards and social demands for greater safety and transparency.

Keywords: tailings dam, Risk Breakdown Structure, risk management

GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS DE REJEITOS MINERAIS: EXPLORANDO O POTENCIAL DA *RISK BREAKDOWN STRUCTURE*

1. Introdução

As empresas de mineração têm investido na gestão de rejeitos para garantir operações mais verdes, sendo este um dos seus maiores desafios atuais na agenda ESG. Os recentes desastres em Mariana e Brumadinho, no Brasil, comprovaram a necessidade deste investimento e sua relevância para a segurança das barragens de rejeitos. Realmente, a análise destes últimos grandes acidentes com barragens parece indicar que os avanços técnicos talvez não tenham sido acompanhados por avanços correspondentes nos modelos de gestão destas estruturas (IBRAM, 2019).

Nesse contexto, surgiram alguns guias de boas práticas para a gestão de rejeitos, tanto nacionais como internacionais. A nível nacional, destaca-se o “Guia de Boas Práticas de Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos” do IBRAM, que possui o objetivo de reunir conhecimento sobre o tema gestão de barragens de rejeitos e apresentá-lo de forma resumida e adaptada ao contexto brasileiro (IBRAM, 2019). Já a nível internacional, destaca-se o “Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos” (GISTM), que possui o objetivo principal de assegurar a proteção das pessoas e do meio ambiente, buscando evitar qualquer tipo de dano, com uma política de tolerância zero para fatalidades humanas (GTR, 2020).

A gestão de riscos em barragens de rejeitos minerais é uma disciplina crítica para a indústria, dada a complexidade e os potenciais impactos ambientais e sociais envolvidos. Essas estruturas, representam um desafio único devido à grande quantidade de rejeitos produzidos durante o processo de mineração. Os principais riscos estão associados a galgamento de efluente contaminado, contaminação de recursos hídricos e rupturas da estrutura de contenção de rejeitos. A gestão eficaz desses riscos requer a implementação de medidas preventivas, como monitoramento, inspeções regulares, manutenção adequada e planos de resposta a emergências bem elaborados. Além disso, a transparência e o engajamento com as comunidades locais são essenciais para construir confiança e mitigar preocupações em relação à segurança das barragens de rejeitos minerais.

De modo geral, o processo de gestão de risco inclui as etapas de comunicação e consulta, estabelecimento do contexto e avaliação, tratamento, monitoramento, análise crítica, registro e relato de riscos (ABNT NBR ISO 31.000, 2018). Na mineração, a implementação do processo de gestão de riscos para barragens de mineração é obrigatória (ANM, 2022). Esse processo tem como objetivo identificar e analisar os riscos para permitir que eles sejam compreendidos com clareza e gerenciados com eficácia. No Brasil, a ferramenta tradicionalmente empregada na análise de riscos em Barragens é a classificação de riscos adotada pelos órgãos reguladores. Essa classificação considera parâmetros como o Dano Potencial Associado (DPA) e a Categoria de Risco (CRI), permitindo a classificação do nível de risco de um conjunto de barragens. Assim, a classificação de risco busca identificar e categorizar as barragens em diferentes níveis de risco, utilizando uma escala que varia de baixo a alto (Cruz, 2024). Contudo, essa técnica deve ser utilizada apenas como um ponto de partida para o gerenciamento de riscos individual de uma estrutura.

O objetivo da classificação de risco é gerar um ranqueamento de um conjunto de barragens de mineração, de acordo com o grau de risco que as barragens oferecem, permitindo a priorização da fiscalização pelos órgãos competentes. Entretanto, a classificação de risco avalia os riscos relacionados à segurança dessas estruturas, fornecendo uma categorização em níveis de riscos macro, que, muitas vezes, não auxilia diretamente o gerente a identificar onde concentrar os esforços do gerenciamento de riscos de uma barragem. Sendo necessário a utilização de técnicas complementares pelos gerentes no nível micro, para identificação das

principais fontes de risco, análise e tratamento dos riscos. Uma alternativa é a utilização da *Risk Breakdown Structure* (RBS), para organizar e estruturar as informações sobre os riscos, facilitando assim a compreensão e gerenciamento dos riscos em barragens.

A discussão acima dá origem a seguinte questão de pesquisa: “Como a implementação da *Risk Breakdown Structure* (RBS) pode melhorar a identificação, análise e gestão dos riscos em barragens de rejeitos minerais, considerando as limitações das abordagens tradicionais de classificação de risco?” Responder a esta questão de investigação permite-nos potencializar a utilização da RBS em contextos específicos, como o de barragens de rejeitos minerais.

A RBS é uma ferramenta que fornece meio para agrupar o risco individual em categorias de risco, vinculadas pelas relações pai/filho e forma uma hierarquia (Bepari, Narkhede e Raut, 2022). Assim, a RBS pode ser definida como uma representação hierárquica das possíveis fontes de riscos, de acordo com suas categorias (PMI, 2021). Ela ajuda a equipe a considerar fontes a partir das quais os riscos podem surgir através de um exercício de identificação, onde os participantes podem explorar as diferentes categorias da RBS, o que os incentiva a identificar os riscos em cada categoria dela. Após a identificação os riscos podem ser agrupados com base em sua origem, sendo atribuídos às diferentes categorias da RBS. Essa abordagem facilita a identificação de áreas específicas de concentração de risco dentro da RBS, revelando quais são as fontes de risco mais significativas para a empresa (Hilson, 2003).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e a validação de uma *Risk Breakdown Structure* (RBS) específica para barragens de rejeitos minerais, visando padronizar a identificação e a comunicação de riscos de uma barragem. A RBS é construída por meio de análise documental sistemática e painel estruturado de especialistas, e mapeada a requisitos GISTM/ANM/IBRAM/ISO 31000 para avaliar cobertura e utilidade prática. Além disso, o estudo avalia as vantagens da RBS em relação às classificações de risco tradicionais e propõe melhorias na gestão de riscos, alinhadas às melhores práticas em segurança de barragens de rejeitos.

Na próxima seção, é feita uma revisão da literatura, seguida de seções sobre métodos de pesquisa. A seção de resultados apresenta a RBS desenvolvida junto a especialistas na área de gerenciamento de riscos em barragens de rejeitos minerais. A seção de resultados é seguida de uma discussão e implicações teóricas e práticas. A seção de conclusão resume as principais afirmações, contribuições e limitações do estudo.

2. Referencial Teórico

2.1. Segurança em Barragens de Rejeitos Minerais

A extração e produção de recursos minerais tem vindo a crescer, devido à crescente procura por bens e serviços (Cano et al., 2020). Esse aumento da demanda dos consumidores, aliado ao declínio do teor de minério e do aumento associado de resíduos de minas, sugere que barragens de rejeitos de mineração maiores e de grande volume, continuarão a ser construídas no futuro, para garantir o fornecimento global (Owen et al., 2020). No entanto, o aumento do volume de rejeitos aliado ao rompimento de barragens de rejeitos por diversos motivos, como galgamentos, instabilidade de taludes e terremotos constituem grandes preocupações para a indústria da mineração (Islam e Murakami, 2021).

Há muitos exemplos em que as consequências das falhas nas barragens de rejeitos foram terríveis. O colapso catastrófico da barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, no estado de Minas Gerais, ocorrido em janeiro de 2019, resultou na morte de 270 pessoas, com 3 pessoas ainda desaparecidas, além do derramamento de 12,0 Mm³ de rejeito de minério de ferro, que gerou a destruição de grandes áreas de terras agrícolas. Apenas quatro anos antes, o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, em Mariana, no mesmo estado e

pela mesma empresa, causou 19 vítimas fatais e espalhou 39,2 Mm³ de rejeitos, além de danos às comunidades e ecossistemas vizinhos (Massignan e Sánchez, 2024).

Em resposta a essas falhas nas barragens de rejeitos e em outras ao redor do mundo surgiu o padrão de boas práticas GISTM (Massignan e Sánchez, 2024). Esse padrão requer que as empresas assumam a responsabilidade total e deem máxima prioridade à segurança das barragens de rejeitos em todas as etapas de seu ciclo de vida, incluindo os estágios de fechamento e pós-fechamento (GTR, 2020). Além de exigir a divulgação de informações relevantes que suportem a prestação de contas e responsabilização pública. Significa dizer que uma barragem de rejeitos aderente ao GISTM possui a sua fiscalização, monitoramento geotécnico e a transparência das informações relativas a ela aprimorados. Além da estrutura passar a receber a avaliação contínua de auditorias e inspeções realizadas de forma independente. Entretanto, a adesão ao GISTM não dispensa o cumprimento dos requisitos estabelecidos em estatutos, leis, regulamentos, portarias ou outras orientações governamentais específicas, sejam elas nacionais, estaduais ou locais (GTR, 2020).

Assim, a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) no contexto da legislação brasileira. Esta lei define barragens como estruturas destinadas à acumulação de água, rejeitos ou resíduos industriais, desde que atendam a critérios específicos de dimensão e potencial de risco. É importante ressaltar que o escopo desse trabalho considera apenas barragens utilizadas para disposição de rejeitos de mineração. A lei ao introduzir os conceitos-chave, como segurança de barragem e gestão de risco, destaca-se a importância de garantir a integridade estrutural das barragens e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. A lei também estabelece categorias de dano potencial associado (DPA) e risco (CRI), oferecendo parâmetros para a classificação e monitoramento das barragens. Contudo, é crucial reconhecer os riscos associados a barragens de rejeitos, que podem resultar em acidentes catastróficos com impactos econômicos, ambientais e sociais significativos.

2.2. Riscos Típicos de Barragens de Rejeitos Minerais

As barragens de rejeitos compreendem um conjunto de obras de engenharia e seus componentes envolvidos no gerenciamento de rejeitos sólidos ou sedimentos, abrangendo sistemas de distribuição de rejeitos e de tratamento de água, além de barragens, diques, barramentos, cavas com barragens construídas e empilhamentos (IBRAM, 2019). As descobertas sugerem que uma série de fatores simultâneos são causas da maioria dos eventos de falha em barragens de rejeitos, incluindo: fatores externos incontornáveis (clima incomum, eventos sísmicos); fatores técnicos (instabilidade de taludes, afundamentos de fundações, liquefação estática dos rejeitos); e gestão ou outros fatores humanos (Owen et al., 2020). Os riscos também estão associados aos tipos de barragem, classificação de perigo, histórico de estabilidade, impacto a jusante, altura da barragem e volume de rejeitos (Islam e Murakami, 2021).

Os modos de falhas típicos de barragens de rejeitos são: liquefação, instabilização, *piping* e galgamento. A liquefação estática ocorre quando rejeitos saturados perdem resistência ao cisalhamento devido à aplicação de tensões que excedem a resistência de pico em condições de cisalhamento não drenado, levando ao colapso da estrutura e ao deslizamento de rejeitos (Sadrekarimi & Riveros, 2020). A instabilização em barragens de rejeitos pode ser desencadeada por anisotropia induzida por tensões e pela interação de cargas aplicadas com alterações estruturais nas partículas dos rejeitos, resultando em uma perda crítica de resistência ao cisalhamento (Fotovat & Sadrekarimi, 2022). O *piping*, ou erosão interna, ocorre quando fluxos de água formam canais dentro da estrutura da barragem, fragilizando a sua integridade e

contribuindo para rupturas catastróficas (Rourke & Luppnow, 2015). Por fim, o galgamento é caracterizado pelo transbordamento de água ou rejeitos devido à má gestão de volumes de água ou a eventos pluviométricos acima da chuva de projeto, reduzindo a capacidade da estrutura de conter os materiais armazenados e levando ao colapso (Rourke & Luppnow, 2015). Esses modos de falhas evidenciam a complexidade dos riscos que podem gerar falhas nas estruturas, destacando seus efeitos e a criticidade associada, o que reforça a necessidade de abordagens abrangentes para mitigar os riscos e garantir a segurança dessas barragens.

2.3. Gerenciamento de Riscos em Barragens de Rejeitos Minerais

A gestão de riscos é um dos princípios norteadores da gestão de barragens de rejeitos e deve ser estruturada e implementada para garantir a segurança das estruturas e evitar riscos inaceitáveis para pessoas e o meio ambiente ao longo de todo o seu ciclo de vida (IBRAM, 2019). A gestão da segurança de barragens de rejeitos é, em última instância, uma questão de controle de riscos e tomada de decisões sob condições de incertezas. Por isso, uma abordagem estruturada de gestão de riscos é considerada uma boa prática e fornece um modelo robusto no gerenciamento destas estruturas.

O risco societal avalia o impacto de eventos catastróficos em termos de perdas humanas e danos coletivos, sendo especialmente relevante no contexto de barragens de rejeito devido ao potencial de consequências socioambientais severas (Cruz, 2024). Esse conceito vai além da proteção individual, abrangendo a mitigação de consequências amplas e a resiliência das comunidades afetadas (HSE, 2001). É representado graficamente pela curva F-N, que correlaciona a frequência (F) de eventos adversos ao número de fatalidades (N), destacando zonas de risco aceitável, tolerável e inaceitável. Na curva, a ordenada representa a probabilidade anual de um acidente, enquanto a abscissa exibe o número de fatalidades. Conforme os princípios definidos por HSE (2001), essa ferramenta permite avaliar a aceitabilidade do risco com base em critérios estatísticos e socioeconômicos, orientando decisões estratégicas.

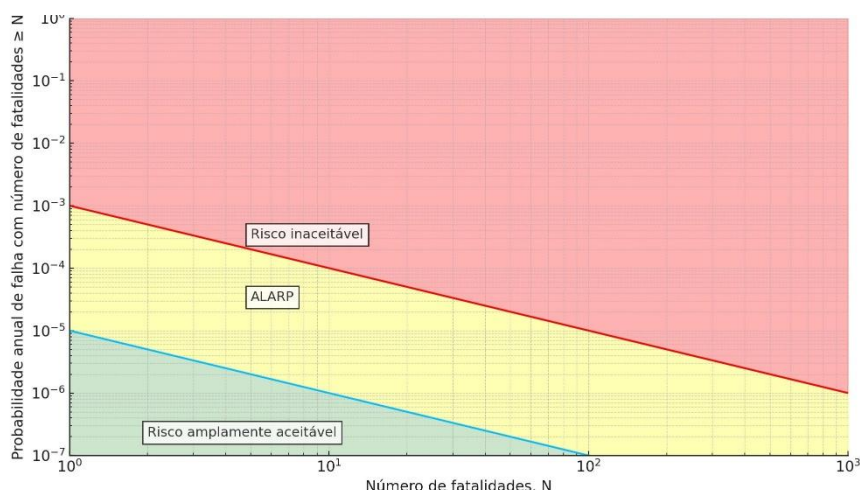


Figura 1 - Análise de Risco Societal em Curva F x N.

Nota. Adaptado de HSE (2001).

Os conceitos de risco aceitável, inaceitável e tolerável são fundamentais na gestão de barragens de rejeito. O risco aceitável refere-se a níveis de exposição suficientemente baixos que não demandam ações adicionais, sendo compatível com os padrões de segurança estabelecidos (Cruz, 2024). O risco inaceitável, por outro lado, representa situações em que o potencial de dano é tão significativo que inviabiliza as operações até que medidas corretivas

sejam implementadas. Entre esses extremos está o risco tolerável, admissível apenas sob condições específicas e desde que seja monitorado e gerido conforme o princípio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), que assegura a proporcionalidade entre os custos de mitigação e os benefícios obtidos (HSE, 2001). Para isso, mais de 30 métodos formais podem ser utilizados, adaptados de outras áreas, que buscam traduzir os riscos em probabilidades e severidades associadas (Eckhoff, 2016).

A aplicação desses métodos, como FTA, HAZOP, FMEA e Bowtie, tem sido essencial para identificar modos de falha, prever consequências e fornecer subsídios para decisões estratégicas. Essas ferramentas qualitativas e quantitativas oferecem flexibilidade para aplicação em diferentes contextos, desde análises preliminares de portfólios até estudos detalhados de barragens individuais. Na literatura, várias ferramentas e técnicas vem sendo utilizadas para a identificação, análise e avaliação do risco em barragens. Owen et al., (2020) apresentaram um método que analisou o risco de desastres situados em barragens de rejeitos, utilizando indicadores Ambientais, Sociais e de Governança (ESG), enquanto Massignan e Sánchez (2024) analisaram como as bases de dados públicas de barragens de rejeitos, ainda ficam aquém da divulgação completa dos riscos. Dong, Deng e Wang (2020) apresentam um mapa conceitual de prevenção de riscos de desastres, controle de desastres e sustentabilidade ambiental para a gestão da segurança, baseados em danos causados pela ruptura de 44 barragens de rejeitos. Islam e Murakami (2021) analisaram os impactos das falhas de barragens de rejeitos a partir de uma perspectiva global, identificando uma taxa de rompimento de 3,45 por ano durante o período de 1915 a 2020. Rotta (2020) avaliou as possíveis causas do rompimento da barragem em brumadinho, indicando que a água acumulada na superfície da barragem aumentou a umidade e acelerou a erosão por infiltração, enfraquecendo a estrutura e levando ao colapso.

A *Risk Breakdown Structure* (RBS) é uma ferramenta bastante utilizada no gerenciamento de riscos em projetos, sendo uma representação hierárquica de potenciais fontes de riscos (PMI, 2021). Ela pode ser utilizada para estruturar as informações e facilitar a compreensão dos riscos enfrentados por barragens de rejeitos. Ela fornece um meio para agrupar riscos individuais em categorias de risco (CR), vinculadas por relações pai/filho, e eventos de risco (ER), formando a hierarquia. ER é definido como um evento ou condição incerta que, se ocorrer, provocará um efeito positivo ou negativo em um ou mais objetivos (PMI, 2021). Cada CR consolida vários ER e, portanto, a RBS consiste em um número de micro árvores (MT). MT é o 'nó pai' de CR e possíveis subcategorias no nível imediato da RBS (Bepari, Narkhede e Raut, 2022).

A ferramenta vem sendo utilizada com sucesso em projetos, como projetos de construção comercial na Índia (Bepari, Narkhede e Raut, 2022), projetos de construção de rodovias em contextos de infraestrutura limitada (Beardmore e Molenaar, 2023), projetos de construção na Coreia do sul, em uma abordagem integrando a estrutura analítica de trabalho e a estrutura analítica de riscos, (Jeong J. e Jeong J., 2021), em proposta de um método integrando os dados de risco, como a RBS, e o BIM (Zou et al., 2018) e em projetos de construção em empresas públicas brasileiras, integrando a RBS ao método Fuzzy AHP (Leandro M. P. Beltrão e Michele T. M. Carvalho, 2019). Entretanto, não foram encontrados na literatura estudos utilizando a RBS no gerenciamento de riscos de barragens de rejeitos. Sendo necessário que qualquer área específica que deseje usar a RBS como auxílio ao seu gerenciamento de riscos desenvolva sua própria RBS.

3. Metodologia

Conforme discutido acima, a RBS vem sendo utilizada pelos pesquisadores no gerenciamento de riscos em projetos, enquanto no gerenciamento de riscos de barragens de rejeitos são utilizadas outras ferramentas e técnicas. Entretanto, essas ferramentas, como classificação de riscos realizam uma análise preliminar de um portfólio de barragens de rejeitos, precisando ser complementadas pela análise individual da estrutura, devido a várias desvantagens, como: determinar somente o nível de risco da estrutura, não estruturar os riscos que impactam a estrutura e na falta de uma compreensão geral dos riscos.

Para resolver esses problemas, a metodologia de pesquisa usada neste trabalho consistiu em três etapas resumidas: (i) estudos técnicos (ii) identificação preliminar de riscos e (iii) desenvolvimento da RBS junto a especialistas (Figura 2).

Adotamos um desenho qualitativo de desenvolvimento metodológico (artefato: RBS). A identificação preliminar dos riscos foi feita por análise documental exploratória de normas, legislações, guias técnicos e literatura acadêmica. Em seguida, foi realizado um painel de especialistas com técnica de brainstorming em três rodadas, envolvendo profissionais com mais de 5 anos de experiência em gestão de riscos e geotecnia, para validação e organização dos riscos em uma estrutura hierárquica.

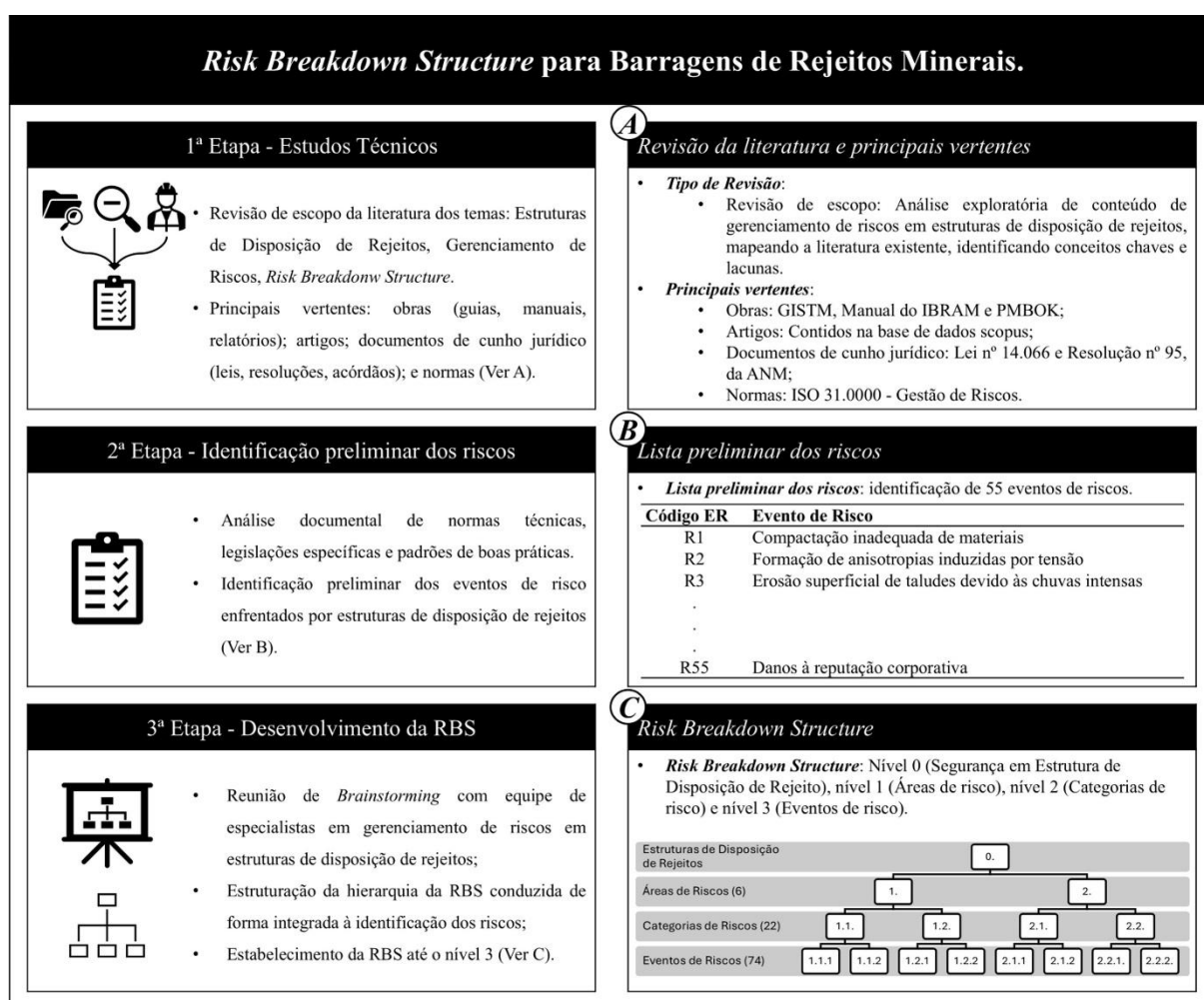


Figura 2 - Etapas de pesquisa.

3.1. Estudos Técnicos

Iniciou-se a primeira etapa do método, a qual compreendeu uma análise exploratória do corpo de conhecimento atual garantindo o embasamento e respaldo técnico-científico necessário. Para tanto, realizou-se uma revisão de escopo da literatura, por meio de referências nacionais e internacionais relevantes às áreas do conhecimento de: Barragens de rejeitos, Gerenciamento de Riscos, *Risk Breakdown Structure*.

Dentre os referenciais, destacam-se quatro principais vertentes: obras (guias, manuais, relatórios); artigos; documentos de cunho jurídico (leis, resoluções, acórdãos); e normas. Para isso, utilizaram-se duas principais fontes de pesquisa: Portal de periódicos Capes/MEC; e Material disponível, gratuitamente, em sites de pesquisa na rede de internet.

Em relação as obras foram dadas prioridade a materiais consagrados nacionalmente e internacionalmente nas quatro áreas de conhecimentos, como as obras: Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos GISTM (GTR, 2020), Guia de Boas Práticas de Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos do IBRAM (IBRAM, 2019) e Manual de boas práticas em Gerenciamento de Projetos PMBOK (PMI, 2021). Neste caso, buscaram-se as últimas edições, sem restrições quanto ao ano de publicação.

No que diz respeito às normas, realizou-se um levantamento por meio do catálogo da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) no site: www.abntcatalogo.com.br. Foram identificadas as normas da família ISO 31000, que têm como foco a gestão de riscos. A série 31000 da International Organization for Standardization (ISO) foi amplamente utilizada ao longo do desenvolvimento do trabalho, por ser a norma internacionalmente reconhecida para a gestão de riscos.

Referente a documentos de cunho jurídico, foram realizados levantamentos no Portal da Legislação - Planalto, através do site www.gov.br/planalto/pt-br. Identificando a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), considerado um marco do avanço jurídico na segurança de barragens. Além de levantamentos no site da Agência Nacional de Mineração, através do site www.gov.br/anm/pt-br. Identificando a Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, que define como obrigatório o processo de gestão de riscos para barragens de mineração (PGRBM) que atendam a definição da Lei nº 14.066, bem como fornece as diretrizes necessárias para implementação do processo.

No que se refere aos artigos, priorizaram-se aqueles publicados e mais citados nos últimos dez anos contidos na base de dados Scopus. A busca foi segmentada em duas linhas, a primeira linha focada em trabalhos de gerenciamento de riscos em barragens de rejeitos, exemplos desses artigos são: Owen et al. (2020), Rotta (2020), Islam e Murakami (2021), Massignan e Sánchez (2024) e Dong, Deng e Wang (2020). A segunda linha foi focada na utilização da RBS no contexto de projetos, exemplos desses artigos são: Bepari, Narkhede e Raut, (2022), Beardmore e Molenaar, (2023), Jeong J. e Jeong J., (2021), Zou et al., (2018) e Leandro M. P. Beltrão e Michele T. M. Carvalho, (2019). As palavras-chave para a busca são listadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Palavras-chave utilizadas na busca por artigos.

Português	Inglês
Barragem de rejeitos	Tailings dam
Gerenciamento de Risco	Risk Management

Risco
Estrutura Analítica de Risco
Gerenciamento de Projetos

Risk
Risk Breakdown Structure
Project Management

É importante salientar que as referências mencionadas acima, assim como os métodos de pesquisa, não representam a totalidade da revisão do referencial teórico realizada, visto que consultas adicionais também foram feitas com base nos referenciais selecionados. Todos os materiais citados ao longo do trabalho estão listados nas Referências.

3.2. Identificação Preliminar dos Riscos

Verificou-se que a maioria dos estudos sobre riscos em barragens de rejeitos realiza a identificação de eventos de risco por meio de abordagens empíricas, utilizando bases de dados públicas, levantamentos geográficos e observações diretas nas estruturas (Owen et al., 2020; Rotta, 2020; Islam e Murakami, 2021; Massignan e Sánchez, 2024; Dong, Deng e Wang, 2020).

Complementarmente, também se destaca a análise documental como uma abordagem que pode ser empregada na identificação de riscos, especialmente por meio da análise de normas técnicas, legislações específicas e padrões de boas práticas (Brasil, 2020; ANM, 2022; GTR, 2020; IBRAM, 2029). De fato, esse procedimento não é usual nos estudos de revisão sobre a gestão de riscos em barragens de rejeitos. Porém, este trabalho adotou a análise documental, permitindo a identificação de riscos preliminares extraídos de documentos técnicos e regulatórios.

Para isso, o autor realizou uma revisão de escopo do corpo de conhecimento atual, conduzindo uma análise exploratória sobre a extensão e natureza do conteúdo. Essa etapa permitiu a identificação dos principais eventos de risco enfrentados por barragens de rejeitos minerais.

3.3. Desenvolvimento da RBS com Especialistas

A terceira etapa, teve como objetivo o desenvolvimento da *Risk Breakdown Structure*. A RBS foi então desenvolvida utilizando a técnica de *brainstorming*, com um time de especialistas em gerenciamento de riscos em barragens de rejeitos, procedimentos sugeridos pelo Anexo B da ISO (2018). Sessões com pequenos grupos, chamadas de entrevistas avançadas de elicitación de riscos, provaram ser o procedimento mais produtivo para a elicitación de riscos (Cretu et al. 2011).

A escolha dos especialistas foi focada em duas características: alto grau de conhecimento e elevada experiência prática. Estabelecendo como requisito um limite mínimo de 5 anos de atuação em gerenciamento de riscos em barragens de rejeitos ou na área de geotecnia. Portanto, três especialistas foram escolhidos entre empresas de mineração e instituições fiscalizadoras como membros do painel de *brainstorming*, para dar suas opiniões nos riscos identificados e estabelecer a RBS.

A preparação prévia dos participantes ocorreu através de reuniões individuais entre o facilitador e o especialista. Nessas reuniões, foram apresentados e esclarecidos os aspectos relevantes da pesquisa para o sucesso da reunião de *brainstorming*, como tema, objetivos e método. Cada participante recebeu um documento contendo: um quadro para identificação do perfil do participante; o tema da dissertação; os objetivos do *brainstorming*; reflexões a serem consideradas previamente à reunião com todos os participantes; e a Lista Preliminar de Riscos Identificados resultante da etapa 3.2 (Tabela 2).

Durante a reunião de brainstorming, os primeiros minutos foram destinados à apresentação das diretrizes do encontro, bem como dos conceitos, aplicações e exemplos da RBS, conduzida pelo facilitador, com o objetivo de nivelar o conhecimento dos especialistas sobre a ferramenta. Em seguida, cada participante apresentou individualmente suas ideias, com mínima interferência para comentários ou críticas, visando coletar o maior número possível de opiniões. Por fim, o facilitador incentivou o debate entre os participantes, buscando alcançar um consenso sobre a lista final de riscos identificados e a estrutura da RBS mais adequada ao desenvolvimento da pesquisa.

A estruturação da hierarquia da RBS foi conduzida de forma integrada à identificação dos riscos, iniciando-se pela definição do Nível 1, correspondente aos Riscos Geotécnicos, e sua posterior decomposição em categorias (Nível 2), como: liquefação, instabilização, erosão e galgamento. Em seguida, foram identificados os eventos de risco associados a cada categoria (Nível 3), conforme exemplificado na Tabela 2, que apresenta os riscos relacionados à liquefação. Durante o desenvolvimento da estrutura, observou-se uma condição de contorno relevante: a necessidade de que, para o adequado funcionamento de um processo de análise hierárquica, os elementos pertencentes a um mesmo nível sejam mutuamente independentes, embora comparáveis. Em outras palavras, a hierarquia deve preservar o máximo possível de independência entre os elementos que compartilham o mesmo nível estrutural.

4. Análise dos resultados e Discussões

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se na utilização da *Risk Breakdown Structure* (RBS), ferramenta que apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais fundamentados em matrizes de risco, como a Classificação de Riscos ou FMEA. Diferente dessas abordagens convencionais, que frequentemente resultam na classificação em níveis ou em listas extensas e pouco estruturadas, dificultando a compreensão sistêmica dos riscos e a identificação de áreas prioritárias, a RBS organiza as fontes de risco em uma estrutura hierárquica clara, permitindo identificar rapidamente temas recorrentes, concentrações de riscos (Hillson, 2003). Essa estruturação hierárquica favorece uma compreensão mais abrangente e objetiva da exposição total ao risco, facilita o processo de comunicação entre as equipes técnicas e gerenciais, e proporciona uma base robusta para ações eficazes de gestão dos riscos identificados. Nesse trabalho a RBS foi aplicada no contexto de segurança em barragens de rejeitos minerais, permitindo uma visão integrada e detalhada dos principais riscos enfrentados nessas estruturas (Figura 3).

A RBS desenvolvida para barragens de rejeitos minerais compreende 56 riscos identificados por consenso de especialistas, distribuídos em 9 categorias e agrupados em 3 áreas principais (Figura 3). A primeira área, denominada "Riscos Geotécnicos", concentra a maior parte dos riscos identificados, divididos em quatro categorias: Erosão, Galgamento, Instabilização e Liquefação. Essas categorias são os modos de falha típicos de barragens de rejeitos, caracterizados como eventos indesejados (falhas) que podem levar à ruptura da estrutura em caso de concretização dos riscos associados. Logo, os riscos identificados são eventos iniciais (mecanismos) que levam a falha da estrutura.

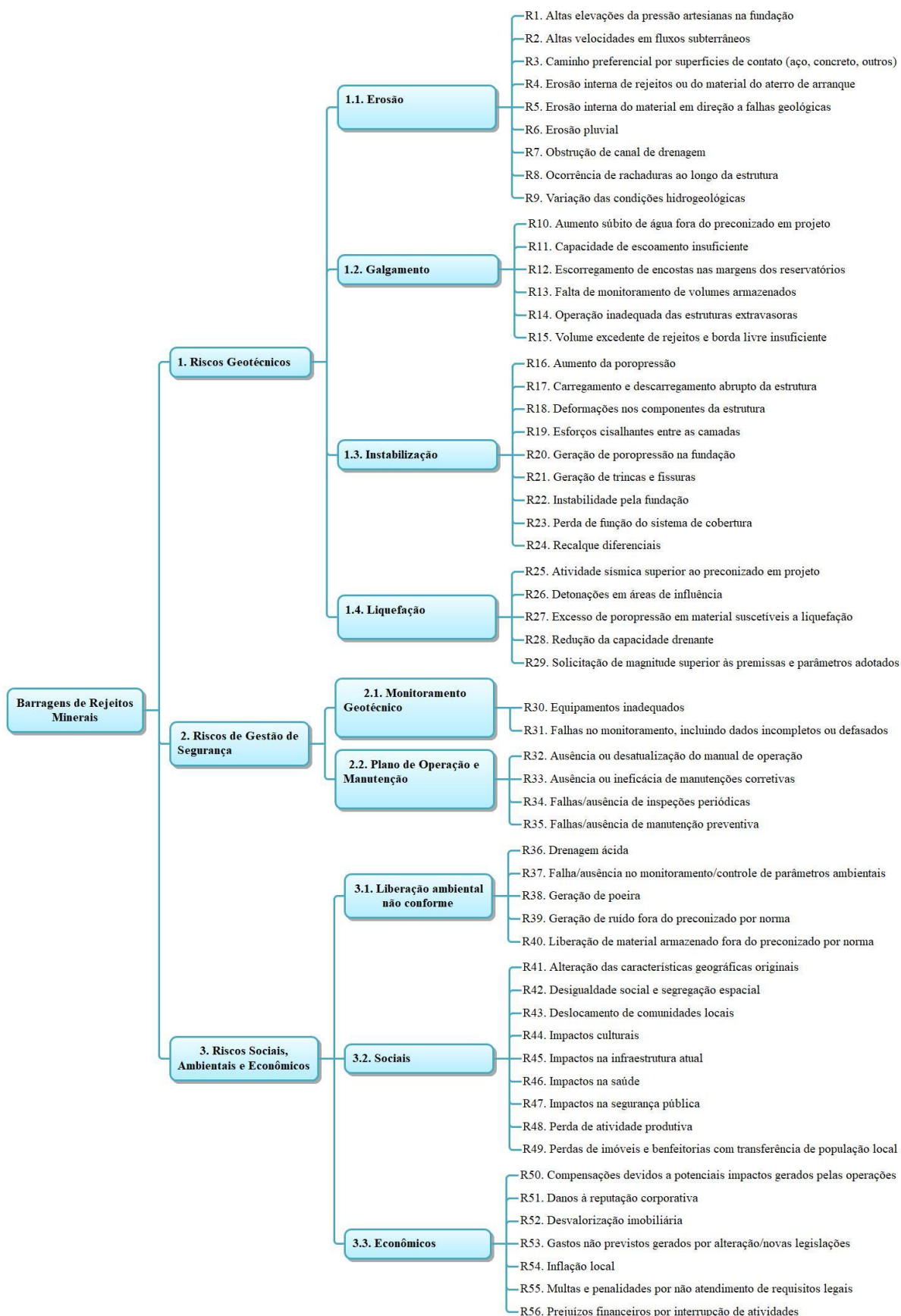


Figura 3 - Risk Breakdown Structure para Barragens de Rejeitos Minerais.

Destacam-se nessa categoria os riscos relacionados à ocorrência de **Erosão** (piping) associada às condições hidrogeológicas (R9), altas velocidades de escoamento (R2) e Erosão interna de rejeitos ou do material do aterro de arranque (R4). Um exemplo ilustrativo desse contexto foi a ruptura da barragem de Teton (EUA, 1976), que sofreu falha catastrófica durante o primeiro enchimento devido à erosão interna, causando 14 mortes e danos materiais significativos.

Também se destacam os riscos relacionados à ocorrência **Galgamento**, como o aumento súbito do nível de água fora do preconizado em projeto (R10), operação inadequada das estruturas extravasoras (R14) e escorregamento de encostas nas margens dos reservatórios (R12). Um caso emblemático relacionado ao galgamento ocorreu na Barragem de Vajont, Itália (1963), quando um deslizamento de terra envolvendo aproximadamente 260 milhões de m³ no Monte Toc provocou uma onda que ultrapassou a barragem, destruindo vilarejos adjacentes e causando cerca de 2.000 mortes.

No âmbito da categoria **Instabilização**, destacam-se os riscos associados ao carregamento e descarregamento abrupto da estrutura (R25), aos esforços cisalhantes entre camadas (R19) e ao recalque diferencial (R29). Um exemplo emblemático ocorreu em 1966, com o desastre de Aberfan, no País de Gales, quando o colapso de uma pilha de rejeitos de carvão resultou no escorregamento repentino de material instável sobre a vila local. O evento ocasionou a destruição parcial de edificações, incluindo uma escola primária, e vitimou 144 pessoas, das quais 116 eram crianças, evidenciando de forma trágica as consequências geotécnicas e sociais decorrentes da perda de estabilidade nessas estruturas.

Enquanto na categoria **Liquefação**, destacam-se riscos associados ao excesso de propressão em estruturas com materiais suscetíveis à liquefação (R27), redução da capacidade drenante (R28) e atividade sísmica superior ao preconizado em projeto (R25). Um exemplo relacionado à liquefação ocorreu em Brumadinho, Brasil (2018), quando uma ruptura devido à liquefação da barragem B1, da Mina Córrego do Feijão, resultou no rápido espalhamento de rejeitos, causando 270 mortes, destruição ambiental extensa e impactos socioeconômicos profundos (Massignan e Sánchez, 2024).

A segunda área, "Riscos de Gestão de Segurança", compreende duas categorias (Monitoramento Geotécnico e Plano de Manutenção) que destacam falhas críticas relacionadas à ausência ou ineficácia de manutenções preventivas e corretivas (R42 e R43), bem como o uso de equipamentos inadequados para o monitoramento (R39). Por fim, a terceira área, "Riscos Sociais, Ambientais e Econômicos", estruturada em três categorias, aponta riscos significativos de deslocamento de comunidades locais (R49), impactos na infraestrutura atual (R50), prejuízos financeiros decorrentes da interrupção de atividades (R59) e danos à reputação corporativa (R65), refletindo os potenciais efeitos adversos nas comunidades e na imagem organizacional caso esses riscos venham a se concretizar.

A aplicação da RBS no contexto específico de barragens de rejeitos permitiu identificar claramente os principais riscos e modos de falha dessas estruturas. Dentre os resultados obtidos, destacam-se riscos geotécnicos com potencial significativo para provocar falhas estruturais catastróficas. O consenso entre especialistas revelou que os modos de falha mais críticos são erosão interna (piping), galgamento, instabilização e liquefação, corroborando os achados relatados por (Schafer, Beier, & Macciotta, 2021; Fernandes, Sieira, & Menezes Filho, 2022).

Os resultados encontrados neste estudo alinham-se com a literatura às diretrizes estabelecidas na literatura técnica recente. A identificação dos riscos mais críticos - erosão interna, galgamento, instabilização e liquefação - está em consonância com as recomendações do GISTM (GTR, 2020) e do Guia de Boas Práticas do IBRAM (IBRAM, 2019), que reconhecem esses mecanismos como causas históricas recorrentes de falhas em barragens de rejeitos. Além dos aspectos técnicos, a RBS também incorpora riscos de gestão de segurança e

impactos socioambientais, reforçando a abordagem multidisciplinar defendida por essas referências. Assim, a estrutura proposta não apenas sistematiza os principais modos de falha, como também contribui para uma visão integrada de gerenciamento de riscos, em conformidade com as boas práticas internacionais e nacionais de segurança em barragens de rejeitos.

A adoção da RBS auxilia gestores e decisores ao prover um panorama abrangente e detalhado dos riscos, permitindo decisões informadas e ágeis. O detalhamento hierárquico dos riscos viabiliza a priorização objetiva e facilita a comunicação efetiva entre equipes multidisciplinares. Além disso, promove a implementação de práticas padronizadas, auxiliando na redução significativa da probabilidade de falhas e suas consequências desastrosas. A utilização da RBS como ferramenta institucionalizada nas práticas de gestão de segurança em barragens de rejeitos pode aumentar significativamente a eficácia do gerenciamento de riscos nesses contextos.

5. Conclusões/Considerações finais

O estudo aplicou com sucesso a Risk Breakdown Structure (RBS), identificando e estruturando 56 riscos distribuídos em 9 categorias agrupadas em três áreas principais: Riscos Geotécnicos, Riscos de Gestão de Segurança e Riscos Sociais, Ambientais e Econômicos. A pesquisa confirmou a importância dos modos de falha erosão interna, galgamento, instabilização e liquefação, ilustrando esses eventos com casos históricos reais. A RBS demonstrou ser uma ferramenta robusta e eficaz em comparação com métodos tradicionais baseados em matrizes de risco. Além disso, o mapeamento hierárquico dos riscos facilita a implementação dos princípios de gestão propostos pelo GISTM, a busca contínua pela redução dos riscos até níveis tão baixos quanto razoavelmente praticáveis (ALARP), a priorização de ações corretivas para riscos inaceitáveis e a adoção de práticas de gestão baseadas em desempenho.

Entre as limitações, destacam-se a subjetividade inerente à identificação qualitativa dos riscos pelos especialistas e a necessidade de estudos quantitativos complementares para validação probabilística dos resultados obtidos. Além disso, embora os especialistas tenham reconhecida experiência técnica, a diversidade limitada do grupo pode restringir generalizações para contextos geográficos diferentes.

Recomenda-se, em estudos futuros, a aplicação de métodos quantitativos complementares, como análise quantitativa de riscos (e.g., Simulação de Monte Carlo) e métodos multicritério (Topsis, AHP, AHP-Fuzzy), para fortalecer e validar os resultados obtidos qualitativamente. Além disso, estudos comparativos aplicando a RBS em diferentes contextos geográficos seriam importantes para ampliar a generalização e robustez da metodologia proposta. Por fim, recomenda-se a realização de estudos longitudinais sobre a eficácia prática das ações recomendadas após a implantação da RBS em contextos operacionais reais, podendo incorporar os efeitos de mudanças climáticas e alterações em padrões regulatórios.

Referências

ABNT. (2018). Gestão de riscos — Diretrizes. *ABNT NBR ISO 31000:2018*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Agência Nacional de Mineração. (2022). *Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022*. Diário Oficial da União, Brasília. Recuperado de <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>

- Beardmore, D. C., & Molenaar, K. R. (2023). Roadway design and construction in infrastructure limited contexts: A risk breakdown structure. *International Journal of Construction Management*, 23(10), 1675-1683. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1999768>
- Beltrão, L. M. P., & Carvalho, M. T. M. (2019). Prioritizing construction risks using fuzzy AHP in Brazilian public enterprises. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2), 05018018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001606](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001606)
- Bepari, M., Narkhede, B. E., & Raut, R. D. (2022). A comparative study of project risk management with risk breakdown structure (RBS): A case of commercial construction in India. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2124657>
- Brasil. (2020). *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e outras providências. Diário Oficial da União, Brasília. Recuperado de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm
- Cretu, O., Stewart, R. B., & Berends, T. (2011). *Risk management for design and construction*. RSMans.
- Derakhshanfar, H., Ochoa, J. J., Kirytopoulos, K., Mayer, W., & Tam, V. W. Y. (2019). Construction delay risk taxonomy, associations, and regional contexts: A systematic review and meta-analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(10), 2364-2388. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2018-0307>
- Dong, L., Deng, S., & Wang, F. (2020). Some developments and new insights for environmental sustainability and disaster control of tailings dam. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122270>
- Fernandes, R. B., Sieira, A. C. C. F., & Menezes Filho, A. P. (2022). Methodology for risk management in dams from the event tree and FMEA analysis. *Soils and Rocks*, 45(3), e2022070221. <https://doi.org/10.28927/SR.2022.070221>
- Fotovvat, A., & Sadrekarimi, A. (2022). Instability of a gold mine tailings subjected to different stress paths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(5), 04022020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002780](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002780)
- Global Tailings Review. (2020). Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos. *Global Tailings Review*. <https://globaltailingsreview.org/>
- Hillson, D. (2003). Using a risk breakdown structure in project management. *Journal of Facilities Management*, 2(1), 85-97.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). (2019). *Guia de Boas Práticas de Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos*. Instituto Brasileiro de Mineração.
- Islam, K., & Murakami, S. (2021). Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*, 70, 102361. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.102007>

- Jeong, J., & Jeong, J. (2021). Novel approach of the integrated work & risk breakdown structure for identifying the hierarchy of fatal incidents in the construction industry. *Journal of Building Engineering*, 41, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102406>
- Khodeir, L. M., & Nabawy, M. (2019). Identifying key risks in infrastructure projects – Case study of Cairo Festival City project in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 613-621. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.11.003>
- Kusumo, E., Arifuddin, R., & Latief, R. U. (2020). Activity-based – risk breakdown structure as an initial stage in formulating OHS unit cost analysis in the construction project. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 419(1), 012143. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/419/1/012143>
- Lee, S. Determination of Priority Weights under Multiattribute Decision-Making Situations: AHP versus Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 141(2): 05014015. 2015.
- Li, F. ; Phoon, K. K. ; Du, X; Zhang, M. Improved AHP Method and Its Application in Risk Identification. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 139(3), p. 312-320. 2013.
- Lv, H., Wang, L., Liu, G., Lou, Z., Pang, L., & Cai, B. (2021). Risk assessment on the CCUS project using risk breakdown structure methodology: A case study on Jilin oilfield CO₂-EOR Hei-79 block. *Greenhouse Gas Science and Technology*, 11(4), 750-763. <https://doi.org/10.1002/ghg.2077>
- Massignan, R. S., & Sánchez, L. E. (2024). Public databases of tailings storage facilities fall short of full risk disclosure. *The Extractive Industries and Society*, 17, 101420. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101420>
- Mojtahedi, S. M. H., Mousavi, S. M., & Makui, A. (2010). Project risk identification and assessment simultaneously using multi-attribute group decision making technique. *Safety Science*, 48(5), 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.12.016>
- Moon, H., Kim, B., Lee, J., Cho, H., Hwang, S., & Ahn, Y. (2020). Developing risk breakdown structure for nuclear power plant decommissioning projects in Korea focusing on radioactive concrete dismantle. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 11(4), 269-280. <https://doi.org/10.22712/susb.20200021>
- Nabawy, M., & Mohamed, A. G. (2022). Risks assessment in the construction of infrastructure projects using artificial neural networks. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2156902>
- Owen, J. R., Kemp, D., Lèbre, É., Svobodova, K., & Pérez Murillo, G. (2020). Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101361>
- Project Management Institute (Ed.). (2021). *Guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK®) – Sétima Edição*. Project Management Institute, Inc.

Rotta, L. H. S., Alcântara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., Mendes, T. S. G., & Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>

Rourke, H., & Luppnow, D. (2015). The risks of excess water on tailings facilities and its application to dam-break studies. *Tailings and Mine Waste Management for the 21st Century*. Sydney, NSW.

Sadrekarami, A., & Riveros, G. A. (2020). Static liquefaction analysis of the Fundão dam failure. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(6), 6431–6446. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01446-8>

Sato, H., Tanimoto, S., & Kanai, A. (2020). Risk breakdown structure and security space for security management. *2020 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, 1-9. <https://doi.org/10.1109/SOSE49046.2020.00009>

Schafer, H. L., Beier, N. A., & Macciotta, R. (2021). A failure modes and effects analysis framework for assessing geotechnical risks of tailings dam closure. *Minerals*, 11(11), 1234. <https://doi.org/10.3390/min11111234>

Tah, J. H. M., & Carr, V. (2000). A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic. *Construction Management & Economics*, 18(4), 491-500. <https://doi.org/10.1080/01446190050024905>

Tah, J. H. M., & Carr, V. (2001). A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: Construction project risk management system. *Advances in Engineering Software*, 32(10-11), 847-857. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(01\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(01)00036-9)

Thompson, F., Oliveira, B. C., Cordeiro, M. C., Masi, B. P., Rangel, T. P., Paz, P., Freitas, T., Lopes, G., Silva, B. S., Cabral, A. S., Soares, M., Lacerda, D., Vergilio, C. S., Lopes-Ferreira, M., Lima, C., Thompson, C., & Rezende, C. E. (2020). Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*, 705, 135914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>

Tribunal de Inquérito sobre Aberfan. (1967). *Report of the Tribunal appointed to inquire into the disaster at Aberfan on October 21st, 1966*. London: Her Majesty's Stationery Office.

Zhao, Z.-Y., & Zhao, X.-J. (2009). Towards a framework for project risk knowledge management in the construction supply chain. *International Journal of Project Management*, 27(1), 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.02.005>

Zou, Y., Kiviniemi, A., Jones, S. W., & Walsh, J. (2019). Risk information management for bridges by integrating risk breakdown structure into 3D/4D BIM. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2), 467-480. <https://doi.org/10>