

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAPHAELA NOGUEIRA CABRAL

**Gestão de Riscos e Desastres para a Segurança de Barragens de Rejeitos de
Mineração: O Caso Brumadinho**

Maringá
2022

RAPHAELA NOGUEIRA CABRAL

Gestão de Riscos e Desastres para a Segurança de Barragens de Rejeitos de Mineração: O Caso Brumadinho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.
Área de concentração: Engenharia de Produção

Orientador(a): Profa. Dra. Márcia Marcondes Altimari Samed

Maringá
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

C117g

Cabral, Raphaela Nogueira

Gestão de riscos e desastres para a segurança de barragens de rejeitos de mineração : o caso Brumadinho / Raphaela Nogueira Cabral. -- Maringá, PR, 2022.
83 f.: il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Marcondes Altimari Samed.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2022.

1. Gestão de riscos e desastres. 2. Segurança de barragens. 3. Análise de causa raiz. I. Samed, Márcia Marcondes Altimari, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

CDD 23.ed. 627.80981

Márcia Regina Paiva - CRB-9/1267

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAPHAELA NOGUEIRA CABRAL

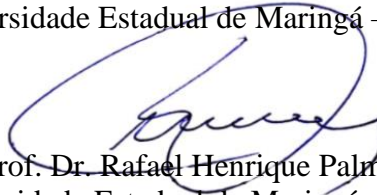
Gestão de Riscos e Desastres para a Segurança de Barragens de Rejeitos de Mineração: O Caso Brumadinho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Banca Examinadora composta pelos membros:

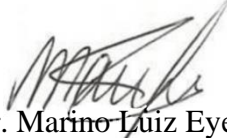
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Márcia Marcondes Altimari Samed
Universidade Estadual de Maringá – PGP/UEM



Prof. Dr. Rafael Henrique Palma Lima
Universidade Estadual de Maringá – PGP /UEM



Prof. Dr. Marino Luiz Eyerkauffer
Universidade do Estado de Santa Catarina – DEP/UEDESC

Aprovada em: 08/09/2022

Local da defesa: Departamento de Engenharia de Produção (DEP – UEM)

AGRADECIMENTOS

Que é difícil todo mundo sabe. Que existem os dias de crises, de medos e ansiedades, também. O que talvez algumas pessoas não saibam é que cada um de nós possui uma força inabalável, luminosa e extraordinária, que nos guia na melhor direção para nós mesmos e nos ampara nos mais variados desafios. Gosto de chamar essa força de Deus. Escrever essa dedicatória teria sido inimaginável dois anos atrás, mas a vontade, o sonho e a dedicação aliados à essa força radiante me empurraram, dia após dia, disciplina após disciplina, capítulo após capítulo, até chegar nesse momento tão gratificante de me tornar mestre. E o mais interessante dessa força é que, muitas vezes, identifico a presença dela na forma das pessoas que mais amo no mundo, que nunca deixaram de me apoiar e me incentivar, nem por um segundo.

Mãe e pai, podem ficar tranquilos, vocês criaram uma boa filha. A pessoa que me tornei hoje é reflexo do amor e do caráter de vocês. Obrigada pela educação que me deram e, principalmente, pelos ensinamentos de vida. Espero que as noites em claro de vinte e cinco anos atrás tenham valido a pena. Vovó e vovô, o lar que vocês criaram é o motivo de eu dormir todos os dias com o coração tranquilo, agradecida pelo privilégio de amar e ser amada na nossa tão pequena e tão querida família. Tio e tia, a paixão e dedicação de vocês à educação é cativante. Sou grata por todos os incentivos que recebi, mas saibam que o maior deles vem da admiração e do exemplo que vocês são. Renata, ser a irmã mais velha me faz ter o cuidado de ser, ou tentar ser, um bom exemplo de pessoa para você. Sua mera existência me motiva a continuar. Aluisio, meu companheiro, se a família que meus avós criaram é o motivo de eu dormir tranquila todas as noites, a família que nós dois criaremos juntos é o motivo de eu acordar feliz e motivada todas as manhãs. Você viveu cada desafio, cada medo e cada conquista ao meu lado, e acreditou mais em mim do que eu mesma. O brilho nos seus olhos ao me ver feliz é o combustível que me impulsiona a ir além. Seu amor é demonstrado genuinamente nas mais singelas atitudes cotidianas, e sou eternamente grata por viver uma vida pura, confortável e risonha ao seu lado.

Agradeço, também, aos professores da minha banca avaliadora, Marino e Rafael, por terem enriquecido meu trabalho com suas valiosas contribuições. E à minha professora orientadora, Márcia: você é um dos motivos da minha inscrição no programa de mestrado. Sua postura, seu conhecimento e sua didática fazem de você uma excelente professora, mas seu cuidado com as pessoas faz de você um excelente ser humano. Humanidade. Não tem palavra mais assertiva para descrever a admiração que sinto por você, tanto no sentido acadêmico quanto no sentido pessoal. Obrigada por ter me apoiado nesse caminho e acreditado em mim do início ao fim.

EPÍGRAFE

“Portanto, não fiquem preocupados com o dia de amanhã, pois o dia de amanhã cuidará de si mesmo. Para cada dia bastam as suas próprias preocupações.”

Mateus 6:34

Gestão de Riscos e Desastres para a Segurança de Barragens de Rejeitos de Mineração: O Caso Brumadinho

RESUMO

O rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Brumadinho, ocorrido em 2019 no estado de Minas Gerais, foi um exemplo de um desastre de grande magnitude decorrente da atividade mineradora, que resultou em extensas perdas humanas, físicas e ambientais. No contexto de barragens de rejeitos de mineração, diversos fatores técnicos precisam ser avaliados para gerir, efetivamente, os riscos de desastres. Por meio do diagnóstico de um caso, a elaboração de uma análise de causa raiz possibilita identificar os principais motivos que levaram à ocorrência do desastre e, posteriormente, implementar ações para prevenir ou mitigar sua recorrência. Nesse sentido, esta pesquisa visa apresentar diretrizes para gestão de riscos e desastres em barragens de rejeitos de mineração, a partir do caso de Brumadinho. O objetivo da pesquisa justifica-se pela existência de outras barragens de rejeitos em situação de emergência, que podem se romper e resultar em outros desastres de grande magnitude. Assim, esta pesquisa apresenta uma abordagem para gestão de riscos e desastres com base no diagnóstico do desastre de Brumadinho, com realização de uma análise de causa raiz, executada por meio do *software* Sologic. O diagnóstico do caso foi elaborado a partir da leitura de relatórios oficiais da investigação do rompimento da barragem. Na análise de causa raiz, foram identificados os principais fatores causais do desastre e, posteriormente, relacionados a diretrizes de prevenção, mitigação e preparação, a fim de evitar a ocorrência do rompimento de outras barragens de rejeitos. Além disso, foram apresentadas as lições aprendidas no pós-desastre a partir das ações de resposta e recuperação ao evento.

Palavras-chave: Gestão de Riscos e Desastres; Segurança de Barragens; Análise de Causa Raiz.

Risk and Disaster Management for the Safety of Mining Tailings Dams: The Brumadinho Case

ABSTRACT

The collapse of the Brumadinho mining tailings dam, which occurred in 2019 in the state of Minas Gerais, was an example of a disaster of great magnitude resulting from mining activity, which generated extensive human, physical and environmental losses. In the context of mining tailings dams, several technical factors need to be evaluated to effectively manage disaster risks. Through the diagnosis of a case, the elaboration of a root cause analysis makes it possible to identify the main reasons that led to the occurrence of the disaster and, subsequently, implement actions to prevent or mitigate its recurrence. In this sense, this research aims to present guidelines for risk and disaster management in mining tailings dams, based on the case of Brumadinho. The objective of the research is justified by the existence of other tailings dams in an emergency situation, which can break and result in other disasters of great magnitude. Thus, this research presents an approach to risk and disaster management based on the diagnosis of the Brumadinho disaster, with a root cause analysis performed using the Sologic software. The diagnosis of the case was elaborated from the reading of official reports of the investigation of the dam rupture. In the root cause analysis, the main causal factors of the disaster were identified and, later, related to prevention, mitigation and preparation guidelines, in order to avoid the occurrence of the failure of other tailings dams. In addition, the lessons learned in the post-disaster from the response and recovery actions to the event were presented.

Keywords: Disasters and Risks Management; Tailings Dam; Root Cause Analysis.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios para a Revisão Bibliográfica Sistemática.....	26
Quadro 2 – Matriz de Conhecimento.....	37
Quadro 3 – Resumo das Causas do Rompimento.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da Pesquisa	25
Figura 2 - Seleção dos artigos.....	29
Figura 3 - Distribuição geográfica das instituições dos autores	33
Figura 4 - Periódicos com maior número de artigos publicados	34
Figura 5 - Ano de publicação dos artigos selecionados.....	34
Figura 6 - Intersecção de temas	36
Figura 7 - Panorama da Mina do Córrego do Feijão.....	42
Figura 8 - Representação da Estrutura da Análise de Causa Raiz.....	44
Figura 9 - Causas diretas para o rompimento da barragem de rejeitos B1.....	45
Figura 10 - Momento do rompimento do talude da barragem.....	46
Figura 11 - Características de risco da barragem.....	46
Figura 12 - Representação de uma barragem construída a montante.....	47
Figura 13 - Causas secundárias dos riscos da barragem.....	47
Figura 14 - Vista aérea da barragem em 2018.....	48
Figura 15 - Causas da liquefação estática da B1.....	49
Figura 16 - Causas do alto nível de água na barragem.....	49
Figura 17 - Causas diretas da perda de resistência dos materiais.....	50
Figura 18 - Causas da perda de resistência nos materiais não-saturados.....	51
Figura 19 - Causas do potencial de perda de resistência rápida e significativa dos materiais..	51
Figura 20 - Representação dos dez alteamentos e o recuo após o terceiro alteamento.....	58
Figura 21 - Diretrizes para Prevenção.....	59
Figura 22 - Diretrizes para Mitigação.....	60
Figura 23 - Zona de Autossalvamento da Mina Córrego do Feijão.....	63
Figura 24 - Diretrizes para Preparação.....	64
Figura 25 - Diretrizes para Gestão de Riscos em Barragens de Rejeitos de Mineração.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos selecionados.....	30
Tabela 2 - Referência dos artigos interseccionados.....	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAF	Árvore de Falhas
ACR	Análise de Causa Raiz
ANM	Agência Nacional de Mineração
CIAEA	Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Apuração
CPI	Comissão Parlamentar de Inquérito
DPA	Dano Potencial Associado
GRD	Gestão de Riscos e Desastres
LSM	<i>Life Safety Model</i>
PAEBM	Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
SEGUR	Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais
SISEMA	Sistema Estadual do Meio Ambiente
UNISDR	Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres
ZAS	Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.1.1. QUESTÃO DE PESQUISA	20
1.1.2. OBJETIVO	21
1.1.3. JUSTIFICATIVA	21
1.1.4. LIMITAÇÃO	23
1.1.5. ESTRUTURAÇÃO	23
1.2. RESUMO DO CAPÍTULO	24
METODOLOGIA	25
2.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	25
2.2. ETAPAS DA PESQUISA	26
REVISÃO SISTEMÁTICA	29
3.1. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	29
3.2. AUTORES.....	33
3.3. PERIÓDICOS.....	34
3.4. ANO DE PUBLICAÇÃO.....	35
3.5. ANÁLISE QUALITATIVA.....	36
3.5.1. INTERSECÇÃO DE TEMAS	36
3.5.2. MATRIZ DE CONHECIMENTOS	38
3.6. RESUMO DO CAPÍTULO	40
DIAGNÓSTICO DO DESASTRE	41
4.1. O ESTUDO DE CASO	41
4.1.1. A CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM.....	41
4.1.2. O ROMPIMENTO DA BARRAGEM	42
4.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA	43
4.2.1. INTRODUÇÃO A ANÁLISE DE CAUSA RAIZ.....	44
4.2.2. ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DO CASO BRUMADINHO	46
4.3. RESUMO DO CAPÍTULO	53
DIRETRIZES PARA GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES	56
5.1. FATORES CAUSAIS	56
5.1.1. DIRETRIZES PARA PREVENÇÃO.....	57
5.1.2. DIRETRIZES PARA MITIGAÇÃO.....	60

5.1.3.	DIRETRIZES PARA PREPARAÇÃO	62
5.2.	O PÓS-DESASTRE	65
5.2.1.	LIÇÕES APRENDIDAS: RESPOSTA.....	65
5.2.2.	LIÇÕES APRENDIDAS: RECUPERAÇÃO.....	67
5.3.	RESUMO DO CAPÍTULO	69
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72

INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade de grande potencial socioeconômico, em que o Brasil possui uma participação de destaque mundial. O minério está presente em diversas utilidades do cotidiano, o que enaltece a importância da atividade mineradora para o desenvolvimento do país. No entanto, a mineração está associada a diversos riscos para o meio em que está inserida, destacando-se o impacto da degradação ambiental e a exposição das comunidades locais à ocorrência de desastres.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os desastres no âmbito da mineração são, na maioria das vezes, decorrentes de rompimentos das barragens de rejeitos, que podem gerar degradação do meio ambiente, extensas perdas humanas e físicas a sua jusante. Desde meados do século XVII, período marcado pelo início das atividades mineradoras no Brasil, existem relatos de ocorrência de episódios trágicos relacionados ao rompimento de barragens de rejeitos no país (LACAZ *et al.*, 2017).

As barragens de rejeitos são aterros utilizados para armazenar resíduos materiais, como rejeitos das operações de mineração (LUMBROSO *et al.*, 2020), e seu investimento é, em média, de 5% a 10% do investimento total da construção de uma mina (ZHENG *et al.*, 2011). Segundo Kossoff *et al.* (2014), as barragens de rejeitos podem chegar a mais de 100 metros de altura, e, por serem infraestruturas de longa duração, há um alto índice de falhas que decorre de regulamentação inadequada de projetos e construções pouco rigorosas e menos supervisionadas

(BOWKER; CHAMBERS, 2017).

De acordo com Zheng *et al.* (2011), o reservatório de rejeitos é um fluxo de lama que permite a existência do risco de rompimento da barragem, gerando uma ameaça à segurança das instalações e aos residentes a jusante da barragem. Zheng *et al.* (2011) ainda afirma que fatores como a composição do material da barragem de rejeitos, seus parâmetros geométricos e suas propriedades físicas e mecânicas afetam a deformação e a estabilidade da barragem. A respeito dos materiais utilizados para a construção de barragens, Lumbroso *et al.* (2019) estabelecem que, frequentemente, são utilizados materiais que estejam prontamente disponíveis e, ao longo de sua vida operacional, são aumentados à medida em que a quantidade de rejeitos armazenados também aumenta.

Segundo Lumbroso *et al.* (2020), há três principais métodos de construção de barragens de rejeitos: montante, jusante e linha central. A construção a montante apresenta o menor custo inicial devido à quantidade mínima de material necessário, e são descritas por Martin e McRoberts (1999) como estruturas implacáveis, com uma combinação inapropriada de projeto, construção e operação, que pode resultar em falhas catastróficas.

A gestão da segurança de uma barragem de rejeitos precisa avaliar não apenas a sua estabilidade, mas também o impacto a jusante do rompimento, para que as devidas medidas de emergência possam ser tomadas, a fim de reduzir as perdas do desastre (ZHENG *et al.*, 2011). Desse modo, faz-se necessária uma pesquisa de avaliação de risco de rompimento da barragem de rejeitos, que embora ainda esteja em fase exploratória e carente de embasamento técnico, deve ser realizada com base na avaliação de probabilidade de rompimento da barragem de rejeitos e suas consequências, com suporte técnico para a avaliação dos riscos e implementação de um plano de emergência (ZHENG *et al.*, 2011).

Neste contexto, a cidade de Brumadinho presenciou um desastre de perdas imensuráveis decorrente do rompimento de uma barragem de rejeitos na mina de minério de ferro do Córrego do Feijão, em janeiro de 2019. De acordo com a Vale S.A. (2021), empresa responsável pela barragem rompida, o desastre resultou em 259 óbitos confirmados e 11 pessoas desaparecidas, além de imensos danos ambientais para as regiões afetadas.

Um desastre, segundo Aven e Zio (2014), é um evento de séria interrupção que gera extensas perdas humanas, de meio ambiente e de instalações físicas, e, de acordo com a Política Nacional de Defesa Civil (2007), é considerado como resultado de eventos adversos, sejam eles naturais ou provocados pelo homem, causando danos em um ecossistema vulnerável e prejuízos sociais e econômicos. A ocorrência de um desastre, ainda, pode gerar danos à infraestrutura de uma cidade e impactar na distribuição logística de alimentos, roupas e demais necessidades da

população afetada (NUGROHO *et al.*, 2019).

De acordo com Cardoso e Feltrin (2011), a interferência do homem na natureza determina os riscos de ocorrência de desastre, e, segundo Callens (2002), o risco é classificado como um evento em potencial, que ainda não ocorreu, mas que pode se transformar em algo prejudicial para os indivíduos de um determinado espaço. Veyret (2007) complementa que, para aqueles que estão expostos, o risco é a percepção do perigo, com a possibilidade de um desastre de grande amplitude. Para uma população em situação de risco, o nível de vulnerabilidade pode ser avaliado por diversos fatores, como a capacidade de compreender a situação de risco ao qual os indivíduos estão inseridos, quais as formas de prevenir a ocorrência de desastres e quais medidas emergenciais podem ser tomadas para minimizar as perdas caso o desastre ocorra (MOURA, 2018).

De acordo com Cicco (2018), a gestão de riscos diz respeito à identificação de potenciais variações para o que se planeja ou se espera, e à gestão dessas variações, para que seja possível maximizar oportunidades, minimizar perdas e melhorar resultados.

A gestão dos riscos de um desastre, por sua vez, se categoriza como um processo complexo que visa reduzir, prevenir e controlar os riscos para a sociedade (LAVELL, 2003). De acordo com Comfort (2005), é necessário seguir o princípio de ampliação dos recursos disponíveis para reduzir tais riscos, reconhecendo as limitações do sistema existente e ampliando os atores, agentes e o conhecimento necessário.

A gestão de riscos e desastres, segundo Lapolli (2013), tem o objetivo de preparar os órgãos e a população, capacitando-os de modo a gerar o mínimo de danos humanos e materiais. Dessa forma, a gestão de riscos e desastres constitui-se de cinco processos: prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação.

i. PREVENÇÃO

A primeira fase da gestão de riscos e desastres denomina-se prevenção, que, segundo Narváez (2009) requer o desenvolvimento de habilidades de planejamento que permitam a aplicação de medidas antecipadas ao aparecimento de novos riscos. De acordo com Castro (2007), a prevenção ao desastre é um conjunto de ações destinadas a reduzir a ocorrência e a intensidade de desastres, por meio da avaliação e redução das ameaças e/ou vulnerabilidades, de modo a minimizar os danos e prejuízos.

ii. MITIGAÇÃO

A segunda fase da gestão dos riscos de um desastre é denominada mitigação, e engloba o conjunto de ações com objetivo de evitar que o desastre aconteça, e, caso aconteça, visa diminuir a intensidade de suas consequências (OLIVEIRA, 2009).

De acordo com Yi e Özdamar (2007), a fase de mitigação inclui o estudo dos riscos aos quais o ambiente está suscetível e as análises estruturais, sendo necessário ter conhecimento da área em vulnerabilidade para que seja possível definir as estratégias de preparação e garantir agilidade e velocidade quando necessário.

iii. PREPARAÇÃO

A ocupação de uma área de risco é, muitas vezes, a única opção de instalação para uma determinada população, o que enaltece a necessidade de adotar medidas que ajudem a enfrentar situações de risco e diminuir a vulnerabilidade de tais habitantes (LOUSADA; FARIAS, 2014). Nesse sentido, a fase de preparação abrange um conjunto de ações que visam melhorar a capacidade da comunidade de atuar frente à ocorrência de um desastre, incluindo indivíduos, organizações governamentais e organizações não-governamentais (OLIVEIRA, 2009).

De acordo com Altay e Green (2006), algumas atividades da fase de preparação são o recrutamento de voluntários, o treinamento da comunidade em zona de vulnerabilidade, a aquisição de veículos e equipamentos de emergência, a compra e o armazenamento de suprimentos e o desenho dos planos de emergência.

iv. RESPOSTA

Segundo Cardoso e Feltrin (2011), a capacidade da comunidade de responder ao evento determina a sua sobrevivência. A etapa de resposta acontece imediatamente após a ocorrência do desastre e abrange as medidas a serem tomadas para o atendimento às vítimas (PERES *et al.*, 2012), com objetivo de reduzir os danos e prejuízos e garantir o funcionamento dos sistemas essenciais da comunidade (OLIVEIRA, 2009).

Os estágios de preparação e resposta possuem uma forte conexão, uma vez que a preparação aborda a estratégia cuja execução é a resposta (DROZINO *et al.*, 2014). Nesse momento, é necessário haver o compartilhamento de conhecimento e informações para garantir a coordenação das ações (SAMEDI; GONÇALVES, 2017). Diante da ocorrência do desastre, os meios de transporte e suas capacidades, o cadastro dos voluntários, as rotas a serem seguidas, a localização dos centros de triagem, coleta e distribuição já devem estar definidos, e destaca-se a importância de voluntários treinados para lidar com a situação (MOURA, 2018).

v. RECUPERAÇÃO

A recuperação ao desastre consiste nas atividades que visam a reconstrução e o retorno à normalidade do cotidiano no ambiente afetado (VALÊNCIO, 2010), considerando-se a minimização de novos desastres (OLIVEIRA, 2009).

De acordo com Rottkemper *et al.* (2011), a transição entre a fase de resposta e a fase de recuperação acontece gradualmente. A recuperação ao desastre é executada a longo prazo, permitindo que a população se estabilize novamente para retornar ao normal.

No caso do desastre da barragem de rejeitos de Brumadinho, embora o risco do rompimento fosse conhecido pelos seus responsáveis, as consequências desse evento evidenciam uma falta de prevenção, mitigação e preparação para evitar a ocorrência do desastre, amenizar o risco do rompimento e para atenuar os danos no período anterior ao evento, respectivamente.

1.1.1. QUESTÃO DE PESQUISA

A Agência Nacional de Mineração (ANM, 2021) apresenta uma série de dados consolidados sobre as barragens de mineração do Brasil. Ao total, existem 877 barragens cadastradas no país, das quais 437 estão enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens e passam por um acompanhamento de criticidade de acordo com a classificação de risco. Atualmente, 47 barragens são consideradas de alto risco, e, dentre essas, 41 barragens estão em situação de emergência declarada.

As consequências do caso de Brumadinho exemplificam a problemática do rompimento de barragens de rejeitos de mineração, evidenciando a ausência de uma gestão de riscos e desastres eficaz. A existência de 41 barragens brasileiras em situação de emergência enaltece a importância do gerenciamento do risco do rompimento de barragens, a fim de não repetir um desastre com perdas de grande magnitude, como as de Brumadinho (ANM, 2021).

Com base no exposto, a questão de pesquisa a ser respondida é: como o diagnóstico do caso de Brumadinho pode auxiliar na prevenção, mitigação e preparação para um possível rompimento de outras barragens?

1.1.2. OBJETIVO

Diante do contexto apresentado, o objetivo geral desta pesquisa consiste em apresentar diretrizes para a gestão de riscos e desastres em barragens de rejeitos de mineração, a partir de uma análise de causa raiz do caso de Brumadinho. Complementarmente, os objetivos específicos da pesquisa são:

- I. Elaborar um diagnóstico do caso sobre o desastre de Brumadinho, com base em documentos oficiais da investigação do rompimento da barragem e dados técnicos;
- II. Elaborar um diagrama de análise de causa raiz para o desastre de Brumadinho, de acordo com o diagnóstico do caso;
- III. Analisar as ações tomadas no caso de Brumadinho e confrontar com as diretrizes propostas para Gestão de Riscos e Desastres.

1.1.3. JUSTIFICATIVA

Na cidade de Mariana, estado de Minas Gerais, ocorreu o rompimento da barragem do Fundão em 2015. O evento foi considerado um desastre de cunho ambiental com causas similares ao desastre de Brumadinho, e resultou na poluição de 668 quilômetros do curso d'água do Rio Doce ao Oceano Atlântico com rejeitos de minério de ferro, além de levar 19 pessoas a óbito (CARMO *et al.*, 2017).

A ocorrência de dois desastres similares e de grande magnitude no Brasil, em um curto período, justifica a necessidade de uma pesquisa voltada ao estudo das ações de prevenção, mitigação e preparação para a ocorrência de rompimentos de barragens, também considerando a existência de outras 41 barragens em situação de emergência. De acordo com a Revisão Bibliográfica Sistemática apresentada nesse estudo, nota-se um aumento dos artigos sobre rompimentos de barragens a partir dos anos 2015 e 2019, quando ocorreram os desastres de Mariana – MG e Brumadinho – MG. No entanto, nessa pesquisa, apenas um artigo aborda o desastre de Brumadinho no contexto de gestão de riscos e desastres em uma visão de análise de causa, o que evidencia a necessidade de ampliar os estudos que envolvam esses temas. Assim, a presente pesquisa está alinhada à necessidade de elaboração de diretrizes para gestão dos riscos e desastres aplicada a barragens de rejeitos de mineração, a partir do diagnóstico do caso de Brumadinho e desenvolvimento de uma Análise de Causa Raiz (ACR).

Segundo Fiuza *et al.* (2020), a Análise de Causa Raiz (ACR) consiste na investigação sistemática de um problema, de modo que seja possível identificar as causas raízes que levaram à sua ocorrência e, então, implementar ações para evitar ou impedir sua recorrência. Diversas

ferramentas da qualidade servem de apoio para a elaboração de uma ACR, como o Ishikawa, e cinco porquês, o que influencia a uma confusão conceitual entre metodologias semelhantes nas organizações, que comumente solucionam seus problemas sem embasamento científico. Nesse sentido, Bohn (2000) relata que, em muitas empresas, a análise e solução de problemas não são efetivas porque o problema não é devidamente resolvido, mas apenas contido ou adiado, pois a causa raiz do problema não é identificada e, conseqüentemente, não há um plano de ação efetivo.

A Análise de Causa Raiz, segundo Rooney e Heuvel (2004), é um processo voltado à investigação e categorização de causas de eventos que impactam a segurança, saúde, meio ambiente, qualidade, confiabilidade ou produção, por meio da identificação do quê, como e por que o evento aconteceu, evitando sua recorrência. Ursprung e Gray (2010), por sua vez, definem a ACR como uma metodologia que visa identificar os fatores básicos ou causais que influenciam na redução do desempenho, analisando o problema após a sua ocorrência para prevenir a ocorrência de eventos futuros a partir da correção das causas.

Rooney e Heuvel (2004) afirmam que a chave para prevenir a recorrência de problemas semelhantes é a ACR. Além disso, uma ACR eficaz possui um benefício adicional, pois, ao longo do tempo, as causas básicas identificadas nas ocorrências podem ser usadas para direcionar grandes oportunidades de melhoria, de modo que os resultados da ACR se estendam para além das ações baseadas nas causas raízes (ROONEY; HEUVEL, 2004). Complementarmente, Fiuza *et al.* (2020) comenta que a ACR resulta na mitigação ou eliminação da fonte dos problemas, de modo que dificulte a recorrência e impacte positivamente na busca pelo alcance das metas organizacionais.

O processo de elaboração de uma ACR envolve quatro etapas, de acordo com Rooney e Heuvel (2004):

- a. Coleta de dados: Etapa em que o evento é compreendido através das informações completas, permitindo a identificação dos fatores causais associados ao evento. Coletar os dados é a etapa que ocupa a maior parte do tempo da ACR, e só deve ser finalizada quando o rigor da investigação se mostrar conclusivo e satisfatório.
- b. Mapeamento do evento e seus fatores causais: Etapa em que é elaborado um gráfico do fator causal, que fornece uma estrutura para organizar e analisar as informações dos dados coletados. O gráfico do fator causal consiste em um diagrama de sequências que descreve os eventos que levaram à ocorrência, junto às condições em que esses eventos estavam expostos.

c. Identificação da causa raiz: Após a identificação dos fatores causais, inicia-se a identificação da causa raiz, em que o investigador determina o porquê de fatores causais específicos terem ocorrido e os motivos pelos quais o evento ocorreu.

d. Elaboração do plano de ação: Após a identificação das causas raízes de um determinado evento, deve-se gerar uma série de recomendações viáveis que sejam eficientes para prevenir a recorrência do problema.

Assim, a elaboração de uma ACR para o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Brumadinho torna-se uma maneira clara e objetiva para apresentar os principais fatores causais do desastre e, conseqüentemente, contribuir para a proposição de diretrizes para gestão de riscos e desastres a partir do estudo de caso em questão.

1.1.4. LIMITAÇÃO

A pesquisa limita-se à utilização de documentos oficiais a respeito do desastre de Brumadinho, emitidos por órgãos do governo federal e pela empresa responsável pelo caso, a mineradora Vale S.A. Nesta pesquisa não houve visita ao local do desastre e nem entrevistas com pessoas afetadas. Os dados coletados são técnicos e qualitativos, obtidos exclusivamente através de relatórios oficiais da investigação do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, com ensaios científicos realizados por especialistas.

1.1.5. ESTRUTURAÇÃO

A estruturação da pesquisa inicia-se pela contextualização e apresentação dos conceitos de gestão de riscos e desastres, de rompimentos de barragens de rejeitos e de análises de causa raiz, no Capítulo 1. Em seguida, no Capítulo 2, é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa. No Capítulo 3, é apresentada a Revisão Bibliográfica Sistemática, onde são evidenciadas as principais publicações relacionadas a esta pesquisa, com o tema em questão. Na sequência, no Capítulo 4, é apresentado o diagnóstico do caso de Brumadinho por meio de uma análise de causa raiz, com a exposição de um diagrama de causas. No Capítulo 5, as causas apontadas no diagnóstico do desastre são confrontadas com as recomendações de diretrizes para gestão de riscos e desastres, com ênfase nos processos de prevenção, mitigação e preparação, e as ações tomadas no pós-desastre são apresentadas de acordo com os processos de resposta e

recuperação ao desastre. Por fim, no Capítulo 6, a pesquisa é concluída com as considerações finais.

1.2. RESUMO DO CAPÍTULO

De acordo com a literatura, é possível afirmar que a construção de barragens de rejeito a montante implica em um baixo custo para a obra e, conseqüentemente, torna-se mais atrativa para as empresas de mineração, como cita McRoberts, (1999). No entanto, o baixo custo inicial da obra pode resultar em conseqüências de grande magnitude caso ocorra o rompimento da barragem, resultando em perdas humanas, físicas e ambientais. Nesse sentido, expressa-se a necessidade da gestão de riscos e desastres para atuar na prevenção, mitigação e preparação ao rompimento das barragens e, em caso de ocorrência de desastre, amenizar os danos para a comunidade local.

Os desastres estão diariamente suscetíveis à ocorrência, e a gestão dos riscos torna-se imprescindível para que os danos humanos, físicos e ambientais sejam evitados ou amenizados. No âmbito empresarial, os responsáveis possuem o dever de agir preventivamente e garantir a segurança de suas operações no aspecto técnico, com reflexo social e ambiental, embora a grande representatividade de desastres advindos de operações industriais evidencie a falta de gestão de riscos por parte das empresas. Dessa forma, o conceito de gestão de riscos e desastres deve ser conhecido não apenas por especialistas e responsáveis técnicos, mas também pela população – que, em caso de situação de vulnerabilidade, necessita de preparação com alarmes, simulados e sistemas de alerta –, pelos órgãos governamentais e órgãos não governamentais.

A partir dos conceitos apresentados, conclui-se que a aplicação da Análise de Causa Raiz permite encontrar as principais causas que levam à ocorrência do evento e, conseqüentemente, viabiliza a elaboração de um plano de ação baseado na raiz do problema. Assim, no contexto do rompimento de barragens de rejeitos, a ACR pode auxiliar a encontrar os gatilhos que levaram à falha, e, conseqüentemente, definir ações assertivas para que desastres semelhantes sejam evitados ou para que a população esteja preparada para a resposta e recuperação.

METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa está estruturada em duas etapas: primeiro, pela sua classificação quanto ao tipo de pesquisa, à abordagem e ao modo como será conduzida; segundo, pelas etapas e descrição das atividades que serão realizadas, incluindo diagnóstico, análise e proposta.

2.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa é caracterizada como qualitativa com abordagem exploratória, conduzida em um estudo de caso referente ao rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, em Minas Gerais, que ocorreu em janeiro de 2019.

Segundo Flick (2009), os métodos se baseiam em um entendimento específico de seu objeto, e a pesquisa qualitativa é fundamentada, acima de tudo, nos textos provenientes das informações coletadas para a pesquisa. Nesse sentido, na pesquisa qualitativa, vários tipos de dados são coletados e analisados para que se entenda a dinâmica do fenômeno, e pode ser conduzida através de diferentes caminhos.

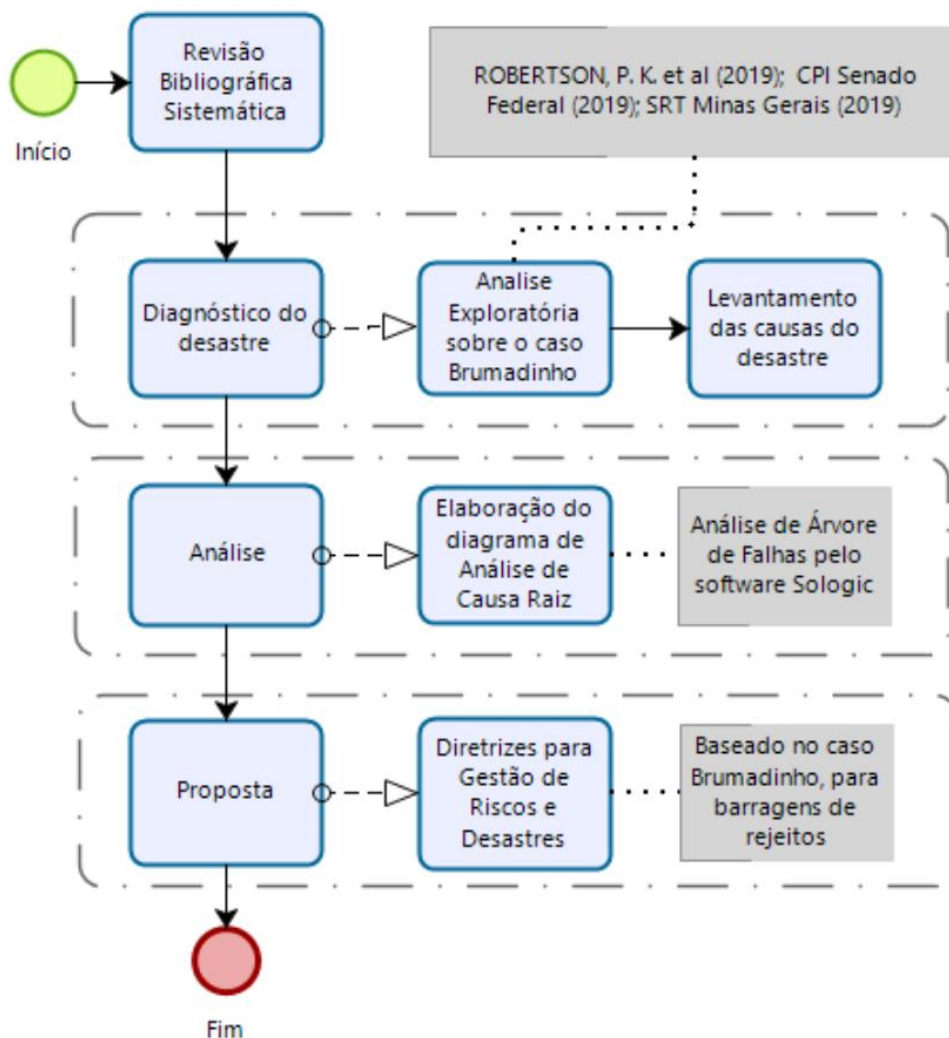
De acordo com Toledo e Shiashi (2009), a pesquisa exploratória permite investigar um problema de forma mais complexa, visto que se utiliza, principalmente, de técnicas de pesquisas qualitativas baseadas em observações e entrevistas. Assim, a pesquisa exploratória proporciona o entendimento geral do problema, provendo ao pesquisador um amplo conhecimento sobre o tema explorado.

O estudo de caso, por sua vez, representa uma investigação empírica e compreende um método abrangente, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados (YIN, 2001). Segundo Godoy (1995), o estudo de caso se caracteriza como um tipo de pesquisa cujo objeto é uma unidade que se analisa profundamente, visando examinar detalhadamente um ambiente, um sujeito ou uma situação em particular.

2.2. ETAPAS DA PESQUISA

A condução da pesquisa está fundamentada em quatro principais etapas: a Revisão Bibliográfica Sistemática, o diagnóstico do desastre, a análise e a proposta. As etapas são sequenciais e complementares, e são constituídas de fases para que possam ser devidamente finalizadas, de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Etapas da Pesquisa



Fonte: Autora (2021)

A Figura 1 apresenta as etapas para o desenvolvimento da pesquisa de acordo com as quatro principais etapas, descritas nos tópicos a seguir.

I. Etapa de Revisão Bibliográfica Sistemática

Os critérios para a elaboração da Revisão Bibliográfica Sistemática estão descritos no Quadro 1. A pesquisa contempla três diferentes bases de dados: *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*, utilizando-se a *string* (“*Disaster Risk Management*” AND “*Cause Analysis*” OR “*Tailings Dam*”), traduzidas, respectivamente, como (“Gestão de Riscos de Desastres” e “Análise de Causa” ou “Rompimento de Barragens”), com a utilização dos operadores *booleanos* para gerar a combinação das palavras-chave essenciais, que são o uso de AND, OR e NOT, traduzidos como E, OU e NÃO.

Quadro 1 - Critérios para a RBS

Objetivo	Bases de dados	String de pesquisa	Critérios de inclusão	Critérios de exclusão	Período
Encontrar artigos que apresentem potencial de contribuição bibliográfica para a pesquisa	<i>Science Direct</i> , <i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i>	("Disaster Risk Management" AND "Cause Analysis" OR "Tailings Dam")	Documentos do tipo artigo, com acesso aberto para visualização completa	Tema principal sem foco em gestão de desastres, análise de causa ou rompimento de barragens	< 2021

Fonte: Autora (2021)

A pesquisa apresenta três restrições: tipo de documento, tipo de acesso ao documento e período de publicação. Estabeleceu-se um filtro para que os resultados encontrados se restrinjam a trabalhos do tipo artigo, e outro filtro para que o resultado apresentasse apenas os artigos que permitissem acesso aberto para visualização do texto completo. Além disso, a pesquisa contemplou as publicações anteriores a 2021.

Do resultado encontrado, foram excluídos os artigos que não retrataram a gestão de desastres, a análise de causa raiz ou rompimentos de barragens de rejeitos como tema principal, que não foram coerentes com o objetivo da presente pesquisa.

II. Etapa de Diagnóstico

O diagnóstico tem como base as causas constatadas pelas investigações do desastre, que foram divulgadas em relatórios oficiais da empresa envolvida (Vale S.A.) e do Governo Federal, devido à expressividade dos danos resultantes do rompimento da barragem de rejeitos.

Exaltando-se os temas Análise de Causa Raiz, Gestão de Riscos e Desastres e o caso de Brumadinho, o relatório técnico oficial do rompimento da barragem de Brumadinho (ROBERTSON *et al.*, 2019) é considerado como base da pesquisa, pois apresenta uma análise técnica completa a respeito dos fatores que levaram à ocorrência do desastre. Os relatórios divulgados pela Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais - SEGUR (2019), pela Comissão Parlamentar de Inquérito do Senado Federal – CPI (2019) e pelo Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Apuração (CIAEA, 2020) também foram analisados no diagnóstico do desastre, como complemento ao relatório técnico oficial para garantir maior confiabilidade aos dados que serão analisados para a posterior elaboração da proposta.

III. Etapa de Análise

Partindo-se do conhecimento de risco de rompimento de barragens de rejeitos e do caso de Brumadinho, propõe-se a utilização de uma Análise de Causa Raiz na condução das causas encontradas na etapa de diagnóstico de pesquisa.

Segundo Fiuza *et al.* (2020), a Análise de Causa Raiz consiste na investigação sistemática do problema e na identificação de suas causas raízes, possibilitando a implementação de ações que impeçam ou reduzam a recorrência do problema. O método pode ser conduzido de acordo com diversas ferramentas e, nessa pesquisa, será utilizada a Análise de Árvore de Falhas (AAF) por meio do *software Sologic®*. De acordo com Scapin (2013), a AAF é uma das melhores técnicas para uma abordagem sistêmica de problemas, tanto quantitativa quanto qualitativa, permitindo a visualização do problema e auxiliando na identificação dos itens que necessitam ter um alto grau de confiabilidade.

IV. Etapa de Desenvolvimento da Proposta

A proposta da pesquisa consiste na elaboração de diretrizes para a gestão de riscos e desastres em barragens de rejeitos, indicando ações de prevenção, mitigação e preparação para a fase pré-desastre, de modo a evitar a possibilidade de rompimento de barragens com características similares à de Brumadinho. Para as fases durante e após o desastre, apresentam-se lições aprendidas com o caso, baseado na forma como as ações de resposta ocorreram instantaneamente após o rompimento da barragem, e em como as ações de recuperação foram e continuam sendo feitas para retomar a normalidade da comunidade em Brumadinho.

REVISÃO SISTEMÁTICA

Segundo Gough *et al.* (2012), as revisões de literatura formam uma base consolidada de informações de extrema relevância, apresentando, segundo Petticrew e Roberts (2006), lacunas e evidências que reforçam o tema da pesquisa. Quando conduzida de forma sistemática, a revisão de literatura contribui para o desenvolvimento de uma base sólida de conhecimento e permite identificar novas oportunidades de pesquisa (WEBSTER; WATSON, 2002).

Nesse sentido, através do protocolo de pesquisa utilizado, a presente Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) apresenta um retrato das pesquisas sobre rompimentos de barragens, análise de causa raiz e gestão de desastres, evidenciando quais são os principais autores, periódicos, países e se há tendência de publicação ao longo dos anos e quais são as lacunas deixadas pelas pesquisas anteriores.

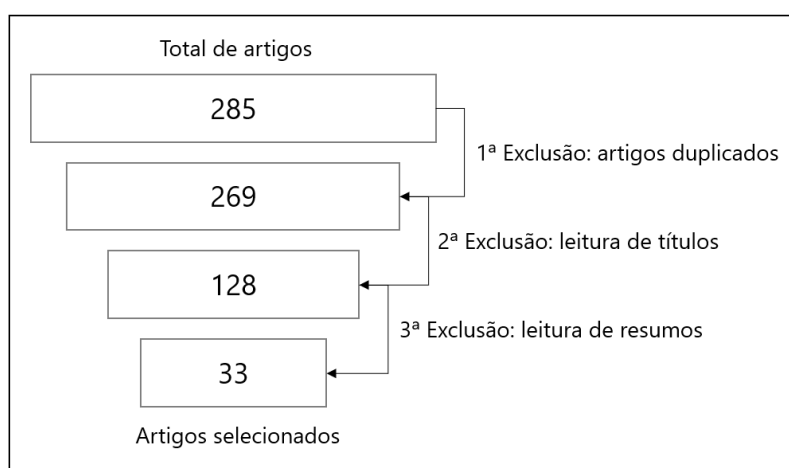
3.1. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A Revisão Bibliográfica Sistemática foi elaborada com as *strings* de pesquisa (“*Disaster Risk Management*” AND “*Cause Analysis*” OR “*Tailings Dam*”), que é uma combinação das palavras-chave que estão alinhadas ao propósito da pesquisa a partir da utilização de operadores *booleanos*. A busca foi realizada por meio das bases *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*, sendo que os resultados foram, exclusivamente, trabalhos do tipo artigo publicados até o ano de 2020, com acesso aberto para leitura completa do conteúdo.

Na base *Science Direct*, foram encontrados 142 artigos disponíveis com visualização completa. Na base *Web of Science*, o resultado foi de 136 artigos e, na base *Scopus*, 7 artigos foram encontrados com as especificações procuradas. No total, a pesquisa resultou em 285 artigos disponíveis para visualização em *download* completos e, desses, 16 estavam repetidos entre as diferentes bases de busca, restando 269 artigos para análise.

Embora os artigos tenham sido encontrados por meio de uma busca com *strings* relacionadas ao tema proposto, o conteúdo total da pesquisa realizada nesses artigos poderia não ser coerente com o desejado. Logo, foi realizada uma seleção dos artigos resultantes, de acordo com a Figura 2.

Figura 2 - Seleção dos artigos



Fonte: Autora (2021)

Conforme a Figura 2, a primeira exclusão foi a dos artigos duplicados, resultando em 269 artigos. Desses, 128 artigos restaram devido ao conteúdo exposto nos títulos, que se assemelham ao conteúdo deste trabalho. Dos 128, foram lidos os resumos, restando 33 artigos selecionados de acordo com a compatibilidade dos temas com este trabalho. Assim, os 33 artigos restantes estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Artigos selecionados

Autores	Título	Periódico
AGURTO-DETZEL, H. et al. (2016)	<i>The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence.</i>	<i>Geophysical Research Letters.</i>
ALMEIDA, I. M.; FILHO, J. M. J.; VILELA, R. A. G. (2019)	Razões para investigar a dimensão organizacional nas origens da catástrofe industrial da Vale em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil.	Cadernos de saúde pública.
ATIF, I.; CAWOOD, F. T.; MAHBOOB, M. A.	<i>Modelling and analysis of the Brumadinho tailings disaster using</i>	<i>Journal of the Southern African</i>

(2020)	<i>advanced geospatial analytics.</i>	<i>Institute of Mining and Metallurgy.</i>
CARMO, F. F. et al. (2017)	<i>Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context.</i>	<i>Perspectives in Ecology and Conservation.</i>
CARMO, F. F.; LANCHOTTI, A. O.; KAMINO, L. H. Y. (2020)	<i>Mining waste challenges: Environmental risks of gigatons of mud, dust and sediment in megadiverse regions in Brazil.</i>	<i>Sustainability (Switzerland).</i>
DE CARVALHO, D. W. (2020)	<i>The Brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: Analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law.</i>	<i>Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito.</i>
EDUVIRGEM, R. V.; SOARES, C. R.; BEIER, E. V. (2020)	<i>Normalized difference vegetation index analysis of the first part impacted with the breaking of the Fundão Dam in Mariana-MG.</i>	<i>Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.</i>
ESPINDOLA, H. S.; NODARI, E. S.; DOS SANTOS, M. A. (2019)	<i>Rio Doce: Risks and uncertainties of the Mariana Disaster (MG).</i>	<i>Revista Brasileira de História.</i>
GAMA, F. F. et al. (2020)	<i>Deformations prior to the Brumadinho dam collapse revealed by sentinel-1 insar data using sbas and psi techniques.</i>	<i>Remote Sensing.</i>
GUANG-JIN, W. et al. (2017)	<i>Study on tailings dam over-topping failure model test and break mechanism under the rainfall condition.</i>	<i>Tehnicki vjesnik - Technical Gazette.</i>
GUEVARA, Y. Z. C. et al. (2018)	<i>Reference values of soil quality for the Rio Doce Basin.</i>	<i>Revista Brasileira de Ciencia do Solo.</i>
MOURA, H. E.; ROCHA E CRUZ, T. B.; CHIROLI, D. M. G. (2020)	<i>A framework proposal to integrate humanitarian logistics practices, disaster management and disaster mutual assistance: A Brazilian case.</i>	<i>Safety Science.</i>
HU, J.; LIU, X. (2011)	<i>Design and implementation of tailings dam security monitoring system.</i>	<i>Procedia Engineering.</i>
KOMLJENOVIC, D. et al. (2020)	<i>A resilience-based approach in managing the closure and abandonment of large mine tailing ponds.</i>	<i>International Journal of Mining Science and Technology.</i>
LUMBROSO, D. et al. (2020)	<i>Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced.</i>	<i>Natural Hazards and Earth System Sciences.</i>
MEI, G. (2011)	<i>Quantitative assessment method study based on weakness theory of dam failure risks in tailings dam.</i>	<i>Procedia Engineering.</i>
MURA, J. C. et al. (2018)	<i>Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in Germano iron mining area after the collapse of the tailings dam of</i>	<i>Remote Sensing.</i>

	<i>Fundão (Mariana-MG, Brazil) using DInSAR techniques with terraSAR-X data.</i>	
NIMBALKAR, S.; ANNAPAREDDY, V. S. R.; PAIN, A. (2018)	<i>A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams.</i>	<i>Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.</i>
OLIVEIRA, T. R. et al. (2019)	<i>Metodologia Para Análise De Danos Ambientais Do Rompimento Da Barragem De Fundão Em Bento Rodrigues (Mg).</i>	<i>Holos.</i>
OWEN, J. R. et al. (2020)	<i>Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure.</i>	<i>International Journal of Disaster Risk Reduction.</i>
PORSANI, J. L.; DE JESUS, F. A. N.; STANGARI, M. C. (2019)	<i>GPR survey on an iron mining area after the collapse of the tailings Dam I at the Córrego do Feijão mine in Brumadinho-MG, Brazil.</i>	<i>Remote Sensing.</i>
CUNHA, R. E. et al. (2020)	<i>Influence of Fundão Tailings Dam Breach on Water Quality in the Doce River Watershed.</i>	<i>Integrated Environmental Assessment and Management.</i>
RICHARD, E. DA C. et al. (2020)	<i>Water and Sediment Quality in the Coastal Zone Around the Mouth of Doce River After the Fundão Tailings Dam Failure.</i>	<i>Integrated Environmental Assessment and Management.</i>
SALVADOR, G. N. et al. (2020)	<i>Mining activity in Brazil and negligence in action.</i>	<i>Perspectives in Ecology and Conservation.</i>
SCHNAID, F.; MELLO, L. G. (2020)	<i>Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams.</i>	<i>Soils and Rocks.</i>
ROTTA, L. H. S. et al. (2020)	<i>The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil.</i>	<i>International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.</i>
SILVA, M. F. (2020)	<i>Análise espacial dos impactos socioambientais provocados pelo rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração: Fundão, na cidade de Mariana e Córrego do Feijão, no município de Brumadinho</i>	<i>Territorium.</i>
SMITH, R. E. W.; VAL, A. L. (2020)	<i>Understanding the Science Surrounding Environmental Consequences and Rehabilitation Actions Stemming from Brazil's Fundão Tailing Dam Rupture.</i>	<i>Integrated Environmental Assessment and Management.</i>
VERGILIO, C. DOS S. et al. (2020)	<i>Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining</i>	<i>Scientific Reports.</i>

<i>disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil).</i>		
VIEIRA, K. I. C. et al. (2020)	<i>Bees and the Environmental Impact of the Rupture of the Fundão Dam.</i>	<i>Integrated Environmental Assessment and Management.</i>
YANG, J. et al. (2020)	<i>A CNN-LSTM Model for Tailings Dam Risk Prediction.</i>	<i>IEEE Access.</i>
YANG, Y.; SUN, W.; LI, S. (2011)	<i>Tailings dam stability analysis of the process of recovery.</i>	<i>Procedia Engineering.</i>
ZHENG, X.; XU, X.; XU, K. (2011)	<i>Study on the risk assessment of the tailings dam break.</i>	<i>Procedia Engineering.</i>

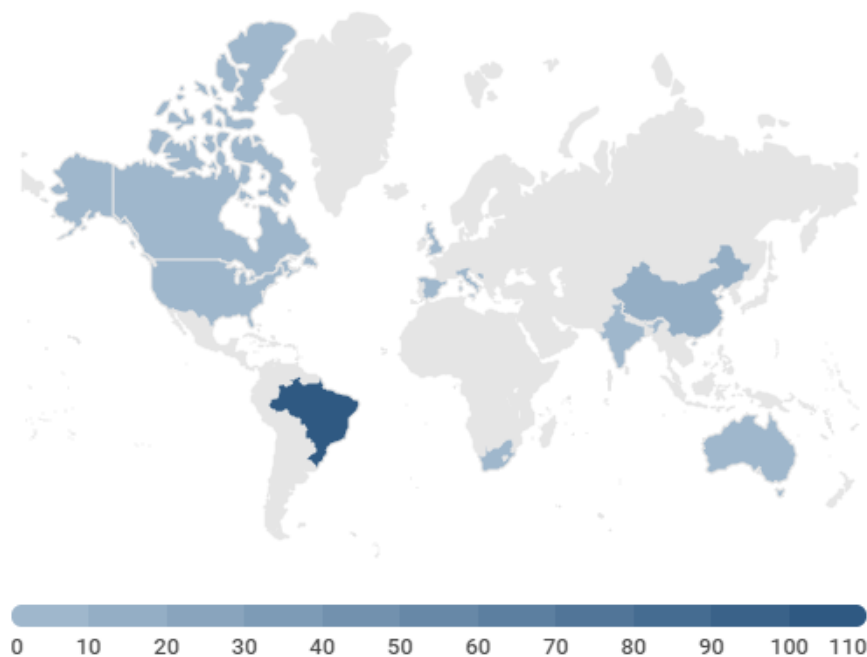
Fonte: Autora (2021)

Os 33 artigos selecionados na Revisão Bibliográfica Sistemática, apresentados na Tabela 1, abordam questões alinhadas e coerentes à pesquisa, possibilitando uma contribuição. Embora nem todos os artigos se aproximem, de maneira conjunta, dos três principais temas propostos (gestão de riscos e desastres, análise de causa raiz e rompimentos de barragens), ao menos um dos temas é tratado de forma específica e com informações que possibilitam a formação de conhecimento alinhado ao propósito da presente pesquisa.

3.2. AUTORES

Dentre os 33 artigos, foi identificado um autor com duas publicações selecionadas para a pesquisa: Richard *et al.* (2020). Esses dois artigos foram publicados no mesmo ano, em 2020. Além disso, a notável participação de autores vinculados às universidades brasileiras pode ser verificada pela Figura 3, que representa a distribuição geográfica das instituições as quais todos os autores envolvidos na publicação dos 33 artigos estão vinculados, em um total de 157 pesquisadores.

Figura 3 - Distribuição geográfica das instituições dos autores



Fonte: Autora (2021)

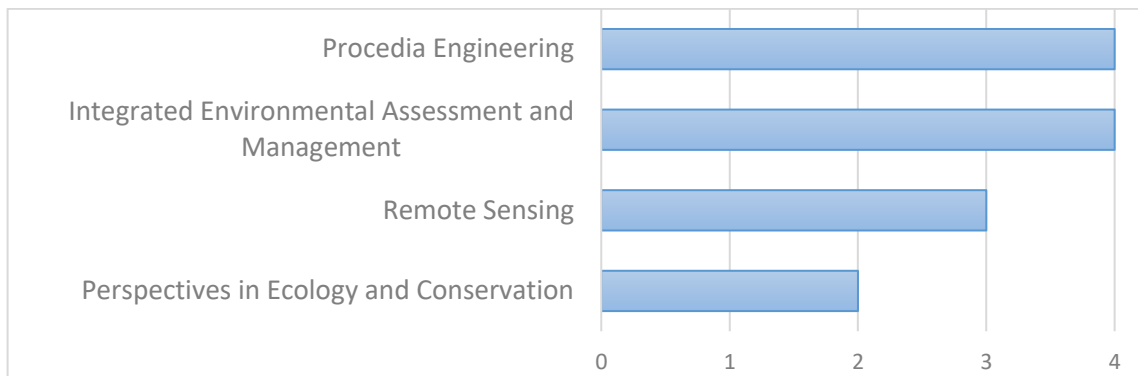
A participação de pesquisadores brasileiros dentre os artigos selecionados pode ser explicada pelos rompimentos de barragens de minério ocorridas no Brasil, que foram representados por dois eventos mundialmente conhecidos: O caso de Brumadinho – MG (2019) e o caso de Mariana – MG (2015).

Com 106 autores de instituições brasileiras, o Brasil ocupou o primeiro lugar no número de países em que os autores estão vinculados. O segundo país com maior presença de pesquisadores é a China, com 19 autores, que contribuiu, em sua maioria, com pesquisas de modelos e sistemas de monitoramento de risco de rompimento de barragens. Na sequência, verifica-se a presença de 9 pesquisadores vinculados a instituições da Austrália e 5 pesquisadores de instituições canadenses. O Reino Unido e os Estados Unidos são representados por 4 autores vinculados às instituições locais, e, em seguida, 3 pesquisadores representam a África do Sul. Bósnia e Herzegovina, Espanha e Itália possuem, cada um, 2 autores ligados às suas instituições. Por fim, 1 autor é vinculado a uma instituição indiana.

3.3. PERIÓDICOS

Os artigos selecionados foram publicados em 24 periódicos diferentes, majoritariamente voltados para engenharia, ciência do solo e mineração, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Periódicos com maior número de artigos publicados



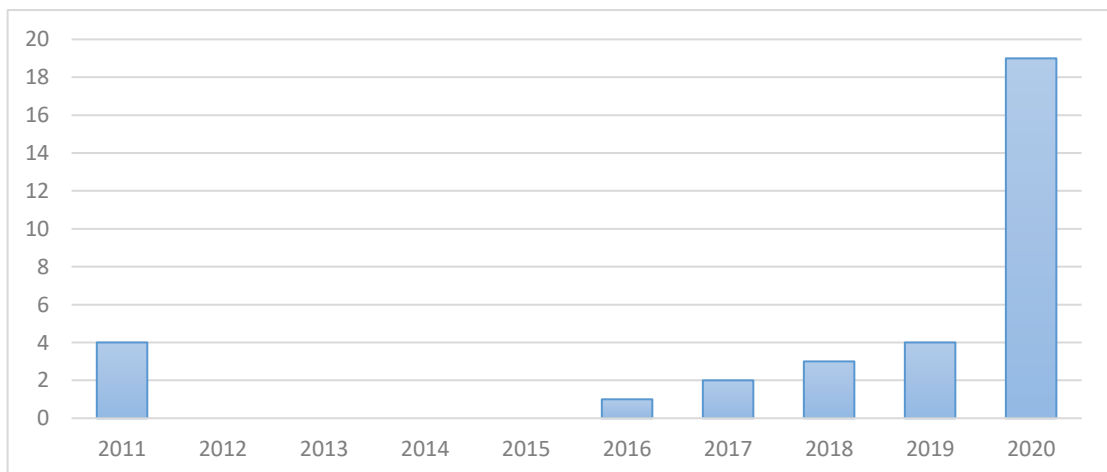
Fonte: Autora (2021)

Os periódicos com maior número de publicações são a *Integrated Environmental Assessment and Management* e a *Procedia Engineering*, representadas por quatro artigos cada. Em seguida, o *Remote Sensing* e o *Perspectives in Ecology and Conservation* aparecem com três e dois artigos publicados, respectivamente. Os demais periódicos são representados por um artigo dentre os 33 selecionados, e podem ser verificados através da Tabela 1.

3.4. ANO DE PUBLICAÇÃO

A Revisão Bibliográfica Sistemática foi conduzida sem a restrição de um determinado período, pois verificou-se que, com a *string* (“*Disaster Risk Management*” AND “*Cause Analysis*” OR “*Tailings Dam*”), os artigos resultantes foram publicados em datas relativamente recentes, conforme exposto na Figura 5, que apresenta os anos de publicação dos artigos resultantes.

Figura 5 - Ano de publicação dos artigos selecionados



Fonte: Autora (2021)

A Figura 5 deixa evidente o crescente volume de pesquisas publicadas a partir do ano de 2016, aumentando gradativamente até o ano de 2019. Em seguida, em 2020, foram publicados 19 artigos dentre os 33 selecionados, o que representa 57,58% do total, evidenciando que o tema chegou ao ápice de sua popularidade desde as primeiras publicações registradas. Tal aumento expressivo de publicações sobre gestão de riscos e desastres, análises de causa raiz e rompimentos de barragens pode estar relacionada aos principais eventos ocorridos nos últimos anos: o desastre de Mariana – MG (2015) e de Brumadinho – MG (2019), também considerando que o maior número de pesquisas provém de autores vinculados a instituições brasileiras, país onde ocorreu tais desastres.

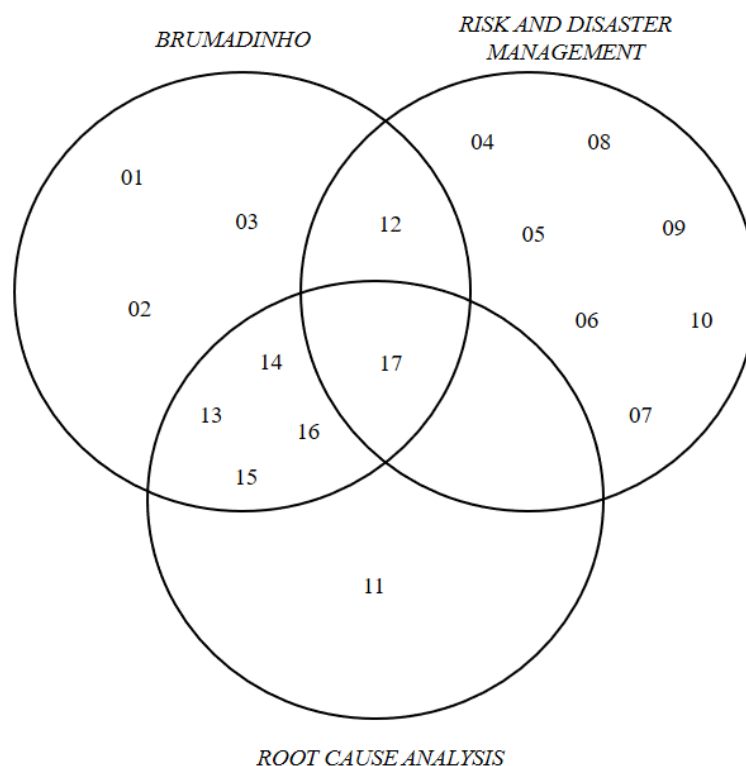
3.5. ANÁLISE QUALITATIVA

Os artigos selecionados na Revisão Bibliográfica Sistemática apresentam contribuições sólidas para a presente pesquisa. Nesse sentido, foi analisada a relação entre eles diante dos três principais temas (gestão de riscos e desastres, análise de causa raiz e rompimento de barragens) e discorrido a respeito dos principais tópicos do artigo considerado base da pesquisa.

3.5.1. INTERSECÇÃO DE TEMAS

Há três importantes temas que permeiam a presente pesquisa: a gestão de riscos e desastres, a análise de causa raiz e, particularmente, o caso do rompimento da barragem de Brumadinho. Nesse sentido, alguns dos 33 artigos selecionados apresentam pesquisas bastante aprofundadas a respeito de cada uma dessas questões. Especificamente em alguns casos, inclusive, esses assuntos se relacionaram na mesma pesquisa, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Intersecção de temas



Fonte: Autora (2021)

Os 17 artigos apresentados na Figura 6 estão dispostos na Tabela 2, sequenciados pelo número associado a eles.

Tabela 2 - Referência dos artigos interseccionados

Número	Referência
1	GAMA, F. F. <i>et al.</i> (2020)
2	PORSANI, J. L.; DE JESUS, F. A. N.; STANGARI, M. C. (2019)
3	VERGILIO, C. S. <i>et al.</i> (2020)
4	MOURA, H. E.; ROCHA E CRUZ, B. T.; CHIROLI, D. M. G. (2020)
5	ESPINDOLA, H. S.; NODARI, E. S.; DOS SANTOS, M. A. (2019)
6	CARMO, F. F.; LANCHOTTI, A. O.; KAMINO, L. H. Y. (2020)
7	ZHENG, X.; XU, X.; XU, K. (2011)
8	OWEN, J. R. <i>et al.</i> (2020)
9	YANG, J. <i>et al.</i> (2020)
10	MEI, G. (2011)
11	GUANG-JIN, W. <i>et al.</i> (2017)
12	CARVALHO, D. W. (2020)
13	SILVA, M. F. D. (2020)
14	ATIF, I.; CAWOOD, F. T.; MAHBOOB, M. A. (2020)
15	ROTTA, L. H. S. <i>et al.</i> (2020)

16	ALMEIDA, I. M.; FILHO, J. M. J.; VILELA, R. A. G. (2019)
17	LUMBROSO, D. <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autora (2021)

De acordo com a Figura 6, é possível categorizar determinados artigos conforme suas contribuições e temas abordados nas pesquisas. Na categoria *Root Cause Analysis* foram identificados 6 artigos. A categoria Brumadinho, por sua vez, foi representada por 9 artigos, que foi a mesma quantidade de artigos da categoria *Risk and Disaster Management*. Alguns dos artigos em questão demonstravam uma intersecção entre os temas: Ora entre *Root Cause Analysis* e Brumadinho, ora entre *Risk and Disaster Management* e Brumadinho, ou, no caso do artigo de Lumbroso *et al.* (2020), entre os três temas.

Nota-se que, nas intersecções, a maior concentração de artigos está entre Brumadinho e *Root Cause Analysis*, com quatro publicações, demonstrando que o tema proposto pela presente pesquisa já foi abordado por outros autores, embora seja representado por um baixo número de artigos. Similarmente, foi identificada uma publicação com intersecção entre os temas Brumadinho e *Risk and Disaster Management*, evidenciando que esse não é um segmento totalmente inexplorado – mas com oportunidades de pesquisa.

3.5.2. MATRIZ DE CONHECIMENTOS

Dentre os 33 artigos selecionados, verificou-se que o estudo de Lumbroso *et al.* (2020) atendia a todos os temas principais da presente pesquisa de maneira focada e alinhada, que possibilitou uma grande contribuição de conteúdo e aprendizado. Assim, o artigo em questão foi particularmente analisado em uma matriz de conhecimentos, expressada pelo Quadro 2.

Quadro 2 - Matriz de Conhecimentos

Lumbroso et al. (2020)

<i>Contexto</i>	O contexto da pesquisa refere-se ao rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, que fez com que centenas de pessoas perdessem suas vidas e gerou grandes prejuízos ao ambiente, e como tais danos poderiam ter sido amenizados
<i>Objetivo</i>	Destacar o uso de um modelo baseado em agentes e outras ferramentas de modelagem para estimar o risco para as pessoas a jusante da barragem de rejeitos de Brumadinho; avaliar se o número de

	<p>fatalidades poderia ter sido reduzido se um aviso tivesse sido recebido antes ou no momento do rompimento da barragem, embora com um prazo de execução curto; demonstrar como essas ferramentas de modelagem podem ajudar a informar os planos de emergência para barragens de rejeitos.</p>
<p><i>Contribuições</i></p>	<p>O artigo detalha o uso de um modelo baseado em agente, conhecido como Modelo de Segurança de Vida (LSM), para estimar o risco para as pessoas a jusante da barragem de rejeitos de Brumadinho e avaliar se o número de fatalidades poderia ter sido reduzido se um aviso tivesse sido recebido antes ou no momento do rompimento da barragem.</p>
<p><i>Limitações</i></p>	<p>O estudo limita-se à análise do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho através de um Modelo de Segurança de Vida que considera rotas de fuga a pé ou em veículo.</p>

Fonte: Autora (2021)

A pesquisa de Lumbroso *et al.* (2020), apresenta o uso de um modelo baseado em agentes, o *Life Safety Model* (LSM), considerando diferentes cenários de evacuação para um desastre de rompimento de barragem de rejeitos. Diante das variáveis adotadas, os autores dissertam que, para o caso estudado, se um aviso for recebido no momento exato em que a barragem racha e, assumindo que as pessoas sabem para onde evacuar e que elas levam 1 minuto para reagir, o número de fatalidades pode reduzir até 34%. Desse modo, o estudo conclui que os planos de emergência eficazes podem ajudar a reduzir os riscos apresentados por falhas em barragens de rejeitos, sendo que a eficácia de um plano de emergência depende dos cenários estudados e de quão bem disseminado é o plano. A respeito do modelo LSM, os autores acreditam que, no futuro, para barragens de rejeitos de alto risco, será recomendado que modelos baseados em agentes, como o LSM, sejam usados para obter uma melhor compreensão de como os perigos representados por essas instalações para as comunidades a jusante podem ser reduzidos.

3.6.RESUMO DO CAPÍTULO

A Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), segundo Webster e Watson (2002), contribui para o desenvolvimento de uma base sólida de conhecimento e permite identificar novas oportunidades de pesquisa. Nesse sentido, Petticrew e Roberts (2006) comentam que a RBS apresenta lacunas e evidências que reforçam o tema da pesquisa. Neste trabalho, a RBS abordou os temas de gestão de riscos e desastres (GRD), rompimento de barragens de mineração e análise de causa raiz (ACR), que formam, juntos, a abordagem da pesquisa (GRD), o contexto do estudo de caso (rompimento de barragens de mineração) e a ferramenta de análise (ACR).

Os resultados da RBS mostram que, de todos os países de onde as publicações foram divulgadas, o Brasil é o que possui maior representatividade de quantidade de autores. A disparidade entre o Brasil e o segundo país com maior número de autores com artigos publicados possivelmente deve-se à ocorrência de desastres bastante representativos mundialmente, como o de Mariana (2016) e de Brumadinho (2019), evidenciando o impacto dos pesquisadores nacionais diante de eventos que ocorreram no Brasil. Ainda diante dos eventos de Mariana e Brumadinho, é possível analisar o crescente número de artigos publicados a cada ano: um aumento gradativo a partir de 2016, ano em que ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana, em Minas Gerais, e um aumento abrupto em 2019, ano que ocorreu o rompimento de rejeitos da barragem de Brumadinho, Minas Gerais. Logo, infere-se que a ocorrência de eventos de grande magnitude desperta a necessidade de pesquisas no contexto de gestão de riscos e desastres.

A quantidade de artigos resultantes da pesquisa evidencia uma área ainda pouco explorada no meio acadêmico. A RBS ainda apresenta que, dentre os temas pesquisados, há uma carência de publicações relacionadas à análise de causa raiz, e, dos artigos avaliados, apenas um deles retratou a ACR em conjunto com a gestão de riscos de desastres, o que se mostra uma boa oportunidade para pesquisas futuras.

DIAGNÓSTICO DO DESASTRE

No dia 25 de janeiro de 2019, às 12:28, ocorreu o rompimento repentino da barragem de rejeitos B-I na mina de minério de ferro do Córrego do Feijão da empresa Vale S.A., localizada no município de Brumadinho, em Minas Gerais – Brasil. As causas desse desastre serão abordadas ao longo do presente capítulo, a partir de uma Análise de Causa Raiz baseada no relatório de investigação dos especialistas Robertson *et al.* (2019).

4.1. O ESTUDO DE CASO

A implementação da barragem de rejeitos B1 iniciou no ano de 1976 e foi adquirida pela Vale S.A. em 2001, perdurando a operação de disposição de rejeitos até julho de 2016, dois anos e seis meses antes do rompimento (CIAEA, 2020).

4.1.1. A CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM

Segundo Robertson *et al.* (2019), a barragem B1 havia sido construída pelo método a montante, em um período de 37 anos e em 10 alteamentos, sendo que não foram construídos novos alteamentos após 2013. A barragem continha cerca de 11,3 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, 86 metros de altura, com crista na elevação aos 942 metros e comprimento de 720 metros (CIAEA, 2020).

De acordo com Kossoff *et al.* (2014), a construção da barragem pelo método a montante

é feita através do acúmulo vertical de deposições sucessivas em aclave sobre o próprio rejeito, e o custo de seu reenchimento é menor devido ao fato de que uma compactação moderada com menos quantidade de material é o suficiente. Além disso, a estabilidade das represas de rejeitos diminui substancialmente quando as operações cessam (MARTIN E MCROBERTS, 1999), e depende da resistência do aterro ou rejeito utilizado para a construção, das características dos rejeitos e da manutenção da lagoa de rejeitos a uma distância segura da zona de estrutura (CAMBRIDGEAND; SHAW, 2019). Dessa forma, as barragens construídas pelo método a montante estão atreladas a um maior risco de rompimento (KOSSOFF *et al.*, 2014).

De acordo com Thomé e Lago (2017), uma análise dos acidentes com barragens de rejeitos ocorridos entre o século XX e o início do século XXI apresentou que 40% deles ocorreram em barragens construídas pelo método a montante. Atualmente, 36% das barragens interditadas no Brasil por risco de rompimento foram construídas pelo método a montante (ANM, 2020).

Os demais métodos de construção, com alteamento em linha central e com alteamento a jusante, representam um menor risco de rompimento pois possibilitam maior controle sobre os materiais empregados na barragem, mas, em contrapartida, equivalem a um custo de até três vezes o custo do alteamento a montante, visto que demandam maior volume de material e mais tempo de construção (CPI BRUMADINHO, 2019).

4.1.2. O ROMPIMENTO DA BARRAGEM

O rompimento da barragem de rejeitos B1 resultou em um fluxo de lama intenso que se deslocou rapidamente a jusante, alcançando cerca de 80 quilômetros por hora (SEGUR, 2019). De acordo com Robertson *et al.* (2019), em menos de 5 minutos, cerca de 75% dos rejeitos armazenados na barragem se esvaíram, o que equivale a 9,7 milhões de metros cúbicos de material.

O desastre de Brumadinho deixou 259 óbitos confirmados e 11 pessoas desaparecidas, segundo o acompanhamento realizado pela Vale S.A. (2021). Além das vidas perdidas, o desastre também gerou danos ambientais e físicos, como a destruição de parte do distrito de Córrego do Feijão, uma pousada local, um viaduto de linha férrea e várias propriedades rurais, além do impacto no fornecimento de água para Brumadinho, Pará de Minas e Belo Horizonte devido à chegada dos rejeitos ao Rio Paraopeba (SEGUR, 2019). A Figura 7 apresenta um panorama da mina do Córrego do Feijão que exemplifica a localização da Barragem I, que se rompeu, do Rio Paraopeba, de Brumadinho e de outros locais importantes ao redor da barragem.

Figura 7 - Panorama da Mina do Córrego do Feijão



Fonte: ROBERTSON *et al.* (2019)

Segundo a CIAEA (2020) o rompimento da barragem B1 ocorreu por conta de uma instabilidade estrutural com liquefação, sendo que o vazamento a jusante foi causado pela liquefação do material depositado na barragem somado com a falta de capacidade estrutural da barragem para conter o material liquefeito. De acordo com as análises geotécnicas da CIAEA (2020), a maior parte dos rejeitos da B1 possuía natureza contrátil, o que significa que, quando submetidos a tensões cisalhantes elevadas, tendiam à contração e diminuição de seu volume, apresentando suscetibilidade à liquefação quando saturado. A condição da saturação resultou do sistema de drenagem inadequado, sendo que a barragem inicial possuía características que impediam a drenagem da água através do pé da barragem, e durante a construção dos alteamentos posteriores não foi instalada nenhuma drenagem interna significativa (ROBERTSON *et al.*, 2019).

O laudo técnico apresentado por Robertson *et al.* (2019) afirma que partes significativas da barragem estavam sob carregamentos muito elevados devido à inclinação da barragem, ao alto peso dos rejeitos e ao alto nível de água, resultando na súbita perda de resistência dos rejeitos depositados na barragem, que se tornaram um líquido pesado que esvaiu rapidamente a jusante.

4.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA

Ao tratar-se de um evento da dimensão de Brumadinho, são inúmeros os elementos geotécnicos relacionados à causa e ao histórico da barragem. Embora a presente pesquisa não possua teor técnico, é inevitável comentar sobre as falhas e condições que contribuíram para o rompimento

da B1, para que seja possível se aprofundar na gestão do risco e do desastre do caso de Brumadinho.

4.2.1. INTRODUÇÃO A ANÁLISE DE CAUSA RAIZ

A árvore de falhas apresentada no diagrama de Análise de Causa Raiz (ACR) representa os principais fatores que levaram à ocorrência do rompimento da barragem de rejeitos B1 do Córrego do Feijão, retratando os principais tópicos, de maneira resumida e objetiva.

4.2.1.1. ELABORAÇÃO DO DIAGRAMA DE ANÁLISE DE CAUSA RAIZ

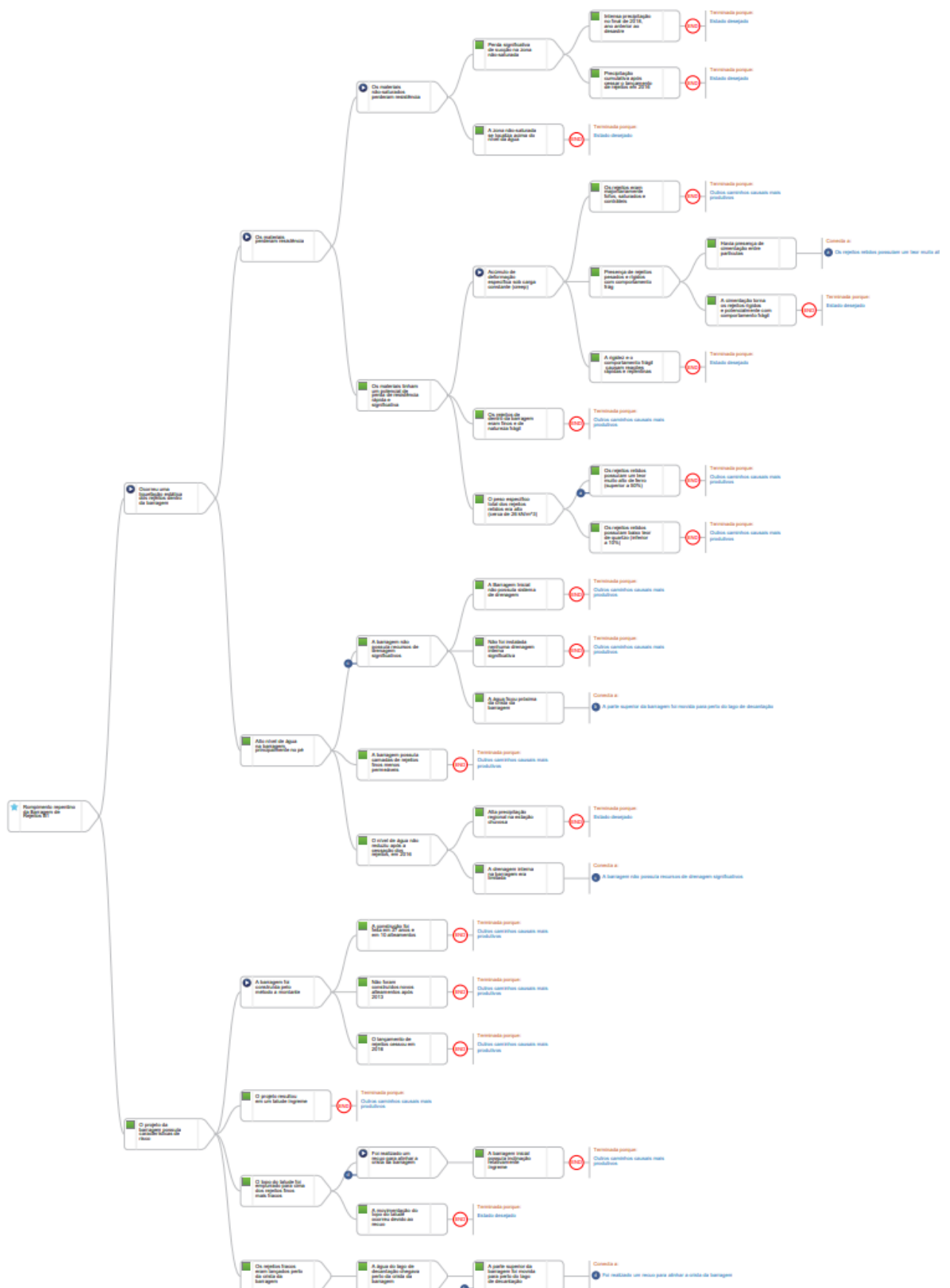
Para elaborar um diagrama de ACR, é necessário conhecer o evento que está sendo analisado. Nesse caso, o evento analisado foi o rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, e o conhecimento dos fatores relacionados ao desastre é proveniente da leitura de relatórios oficiais de investigação:

- Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão, por Peter K. Robertson, Lucas de Melo, David J. Williams e G. Ward Wilson, em dezembro de 2019 (ROBERTSON *et al.*, 2019);
- Rompimento da Barragem de Brumadinho – Comissão Parlamentar de Inquérito, por Júlio Delgado (presidente) e Rogério Correia (relator), em outubro de 2019 (CPI BRUMADINHO, 2019);
- Relatório de Análise de Acidente de Trabalho – Rompimento da barragem BI da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019, por Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais - Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador (SEGUR), em setembro de 2019 (SEGUR, 2019).

As informações da investigação oficial são dispostas em formato de texto, em um relatório, e foram resumidas em fatores causais no diagrama, levando-se em consideração as principais causas do desastre. A organização do diagrama e a relação entre uma causa e outra são constatações feitas pelo autor da Análise de Causa Raiz. Logo, a partir do conhecimento geral sobre o evento, o autor da ACR a elabora de acordo com a sua interpretação e organização, o que torna cada ACR única.

Nesta pesquisa, o diagrama de ACR foi elaborado com o uso do *software* Sologic®, exclusivo para essa finalidade. A escolha do *software* foi feita devido à facilidade de manuseio e objetividade dos elementos disponíveis para criar uma ACR. A Figura 8 representa a estrutura do diagrama, e a estratificação das causas é abordada ao longo do capítulo.

Figura 8 - Representação da Estrutura da Análise de Causa Raiz



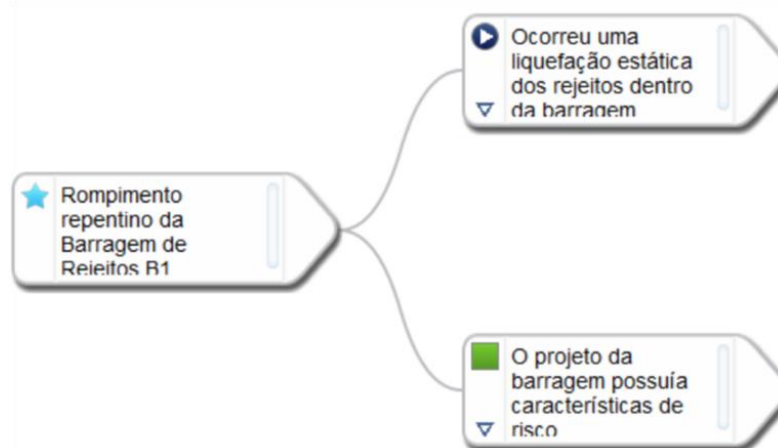
Fonte: Autora (2021)

A Figura 8 é a representação do diagrama de Análise de Causa Raiz completo, e será abordado por partes ao longo do capítulo.

4.2.2. ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DO CASO BRUMADINHO

A leitura e interpretação do diagrama de Análise de Causa Raiz é feita da esquerda para a direita, partindo-se de um ponto focal, que nesse caso é o rompimento repentino da barragem de rejeitos B1. A partir de então, retratam-se as principais ações (representadas pelo triângulo dentro do círculo azul) e condições (representadas pelo quadrado verde) que contribuíram para gerar o evento, que se localiza à esquerda no diagrama. Desse modo, a Figura 9 representa os dois principais fatores que desencadearam o rompimento da barragem de rejeitos: a liquefação estática somada às características de risco que a barragem já apresentava.

Figura 9 - Causas diretas para o rompimento da barragem de rejeitos B1



Fonte: Autora (2021)

A ocorrência da liquefação estática dos rejeitos dentro da barragem e as características de risco que o projeto da barragem possuía levaram ao rompimento repentino da barragem de rejeitos. De acordo com os especialistas, Robertson *et al.* (2019), o rompimento foi considerado como um evento único e repentino, pois aconteceu de uma só vez, sem sinais prévios. Os autores constataram que a barragem estava sob diferentes monitoramentos, como marcos topográficos ao longo da crista da barragem, medições de deformações internas, monitoramento das deformações de superfície da face da barragem e medições de mudanças no nível de água, sendo que não houve detecção de deformações significativas. A Figura 10 mostra o momento exato do rompimento completo do talude da barragem, que ocorreu após 6,7 segundos após a primeira deformação observada na crista.

Figura 10 - Momento do rompimento do talude da barragem

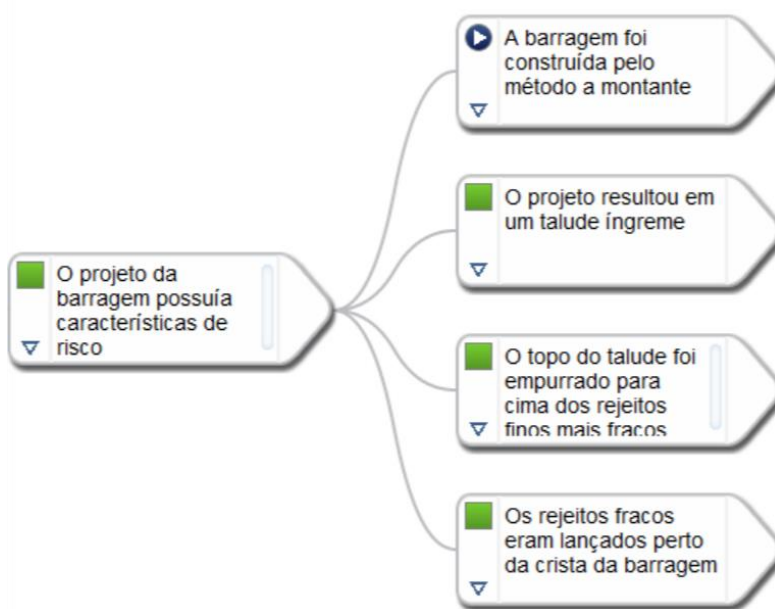


Fonte: ROBERTSON *et al.* (2019)

As alterações detectadas foram pequenas, lentas e contínuas, como a deformação de 36mm/ano na face da barragem e as deformações horizontais de 10mm a 30mm, ambas em 2018, mas insuficientes para que, sozinhas, fossem consideradas como um indicativo de um precursor do rompimento (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Uma condição que propiciou a ocorrência do rompimento foi o próprio projeto da barragem, que possuía características de risco. A Figura 11 apresenta a parte do Diagrama de Análise de Causa Raiz que exemplifica os motivos pelos quais essa constatação pode ser afirmada.

Figura 11 - Características de risco da barragem

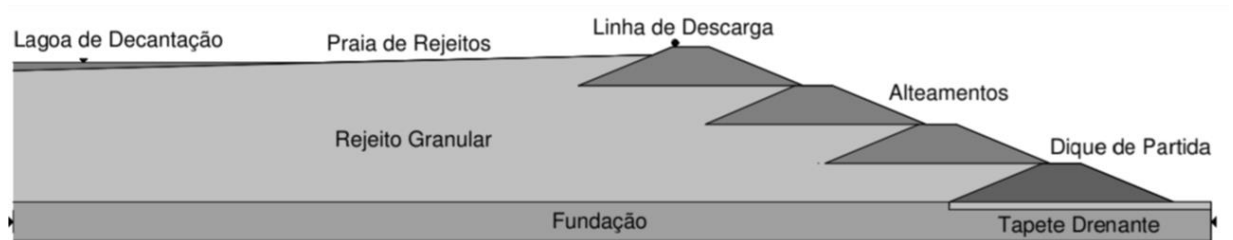


Fonte: Autora (2021)

Primeiramente, o fato de ser uma barragem construída pelo método a montante é um indicativo de maior propensão ao rompimento, pois o agravamento da adoção desse método se deve ao fato de que os alteamentos são realizados sobre rejeitos depositados em curto intervalo de tempo, e conseqüentemente pouco consolidados, sendo que, sob condição saturada e estado

de compacidade fofo (caso da barragem B1), os rejeitos apresentam uma tendência à baixa resistência ao cisalhamento e ficam suscetíveis à liquefação sob carregamentos dinâmicos ou estáticos (ALBUQUERQUE FILHO, 2004). A Figura 12 apresenta um esquema representativo do método de construção a montante.

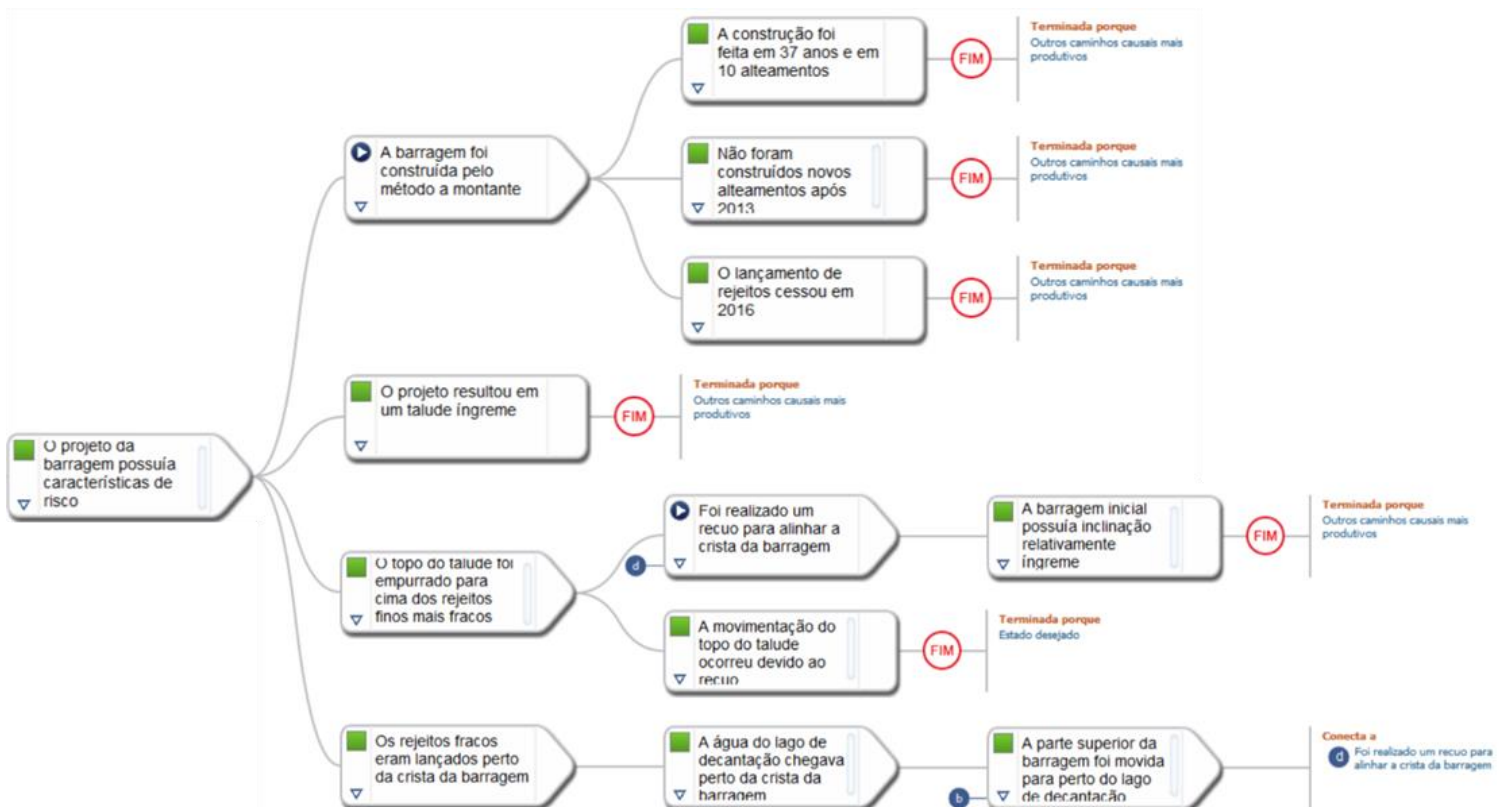
Figura 12 - Representação de uma barragem construída a montante



Fonte: ALBUQUERQUE FILHO (2004)

O projeto da barragem resultou na formação de um talude íngreme construído a montante, e após um recuo de projeto, as partes superiores do talude foram empurradas para cima dos rejeitos finos mais fracos. A Figura 13 representa as causas secundárias relacionadas aos riscos da barragem, de acordo com o diagrama de Análise de Causa Raiz.

Figura 13 - Causas secundárias dos riscos da barragem



Fonte: Autora (2021)

Segundo Robertson *et al.* (2019), o recuo do projeto foi realizado com intuito de alinhar a crista da barragem, e sua realização reduziu a inclinação geral da barragem. No entanto, o recuo fez com que a parte superior da barragem movesse para mais perto do lago de decantação e do futuro nível interno de água, o que resultou na movimentação dos rejeitos fracos para próximo da crista, enquanto camadas intercaladas de rejeitos finos e grossos ficaram retidos pela barragem.

No caso da barragem B1, a construção a montante foi feita em 10 alteamentos, em um período de 37 anos, sendo que após o ano de 2013 não foram construídos novos alteamentos, e o lançamento de rejeitos foi cessado no ano de 2016. A Figura 14 apresenta uma vista aérea ao norte, retirada em 07 de julho de 2018 com o auxílio do Google *Earth* 3D.

Figura 14 - Vista aérea da barragem em 2018



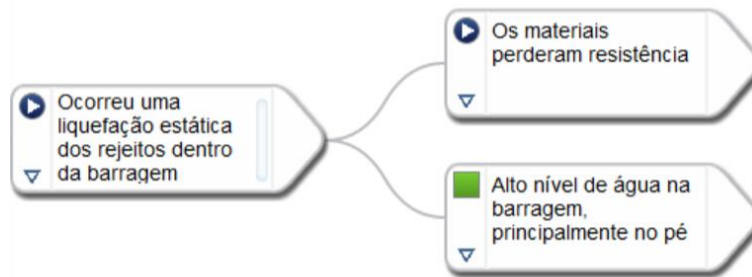
Fonte: ROBERTSON *et al.* (2019)

Após a análise de dados técnicos, histórico da barragem, histórico de ocorrências nos últimos dias ao rompimento e realização de testes, os especialistas constataram que o desencadeador do desastre foi a liquefação estática dos rejeitos dentro da barragem. Segundo Mendes (2019), a liquefação é um fenômeno que consiste na súbita queda da resistência ao cisalhamento do solo, sob carregamentos estáticos ou dinâmicos a volume constante, devendo o solo apresentar comportamento contrátil sob carregamento com variação de volume para que a liquefação possa ocorrer, de modo que a resistência do solo é diminuída sob o carregamento a volume constante, aumentando a poro-pressão.

Na barragem B1, a liquefação estática ocorreu por dois fatores essenciais para a

conclusão da Análise de Causa Raiz na investigação: pela perda de resistência dos materiais pelo alto nível de água na barragem (Figura 15).

Figura 15 - Causas da liquefação estática da B1



Fonte: Autora (2021)

A presença da água em grande quantidade na barragem é um fator importante no que tange a liquefação, pois, para que esse fenômeno ocorra, o solo não precisa estar completamente saturado, mas sim com um grau de saturação suficiente para que a contração resulte em expulsão de água ao invés de ar (AUBERTIN *et al.*, 2003), causando o rompimento da barragem.

As causas do alto nível da água na barragem são apresentadas na Figura 16, que representa parte do Diagrama de Análise de Causa Raiz.

Figura 16 - Causas do alto nível de água na barragem

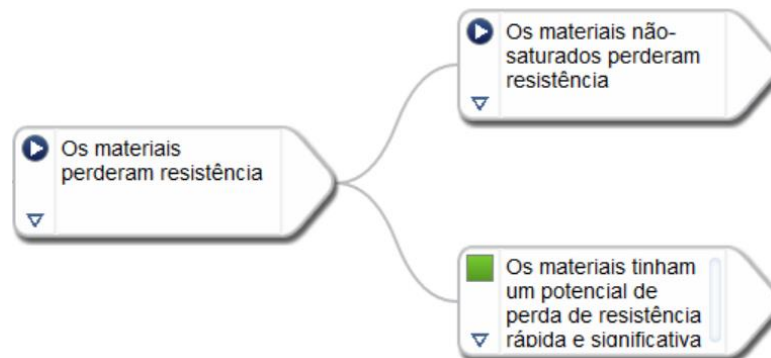


Fonte: Autora (2021)

O alto nível de água na barragem deve-se, principalmente, ao fato de que a barragem não possuía recursos de drenagem significativos, e possuía camadas de rejeitos finos menos permeáveis. Tais rejeitos foram depositados perto dos locais próximos das cristas, resultando em camadas de rejeitos finos sob a barragem. Nos ensaios de penetração de cone realizados, foi constatado que os rejeitos finos são essencialmente não drenados, o que, somado à falta de recursos significativos de drenagem na barragem, resulta no alto nível de água. Além disso, o nível de água não reduziu após a cessação dos rejeitos em 2016, pois há uma alta precipitação regional na estação chuvosa, que se tornou um agravante devido à limitação da drenagem interna na barragem.

Somado ao alto nível de água na barragem, a perda de resistência dos materiais foi um fator essencial para a ocorrência da liquefação estática, que levou ao rompimento da B1. A Figura 17 representa a parte do Diagrama de Análise de Causa Raiz que aborda os motivos pelos quais os materiais perderam resistência.

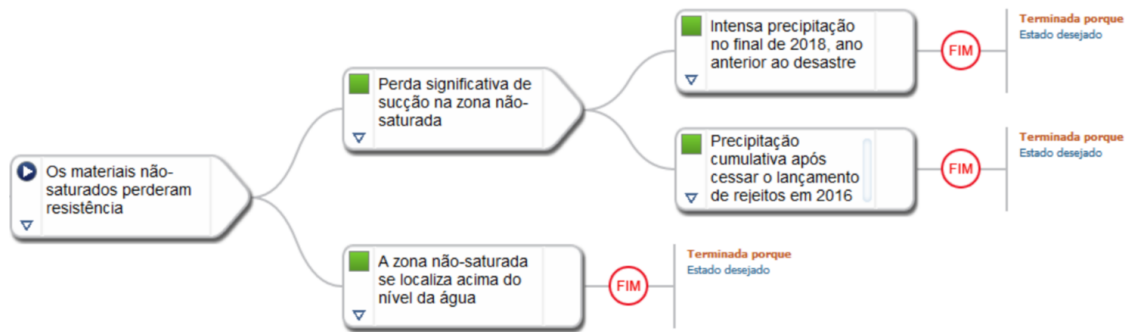
Figura 17 - Causas diretas da perda de resistência dos materiais



Fonte: Autora (2021)

Um dos fatores relacionados à perda de resistência diz respeito aos materiais não-saturados, e as razões para essa ocorrência estão apresentadas na Figura 18, retirada do Diagrama de Análise de Causa Raiz.

Figura 18 - Causas da perda de resistência nos materiais não-saturados



Fonte: Autora (2021)

Os materiais não-saturados perderam resistência por conta de uma perda significativa de sucção na zona não-saturada, que se localiza acima do nível da água. A perda de sucção é explicada pela intensa precipitação no final de 2018, ano anterior ao desastre, e pela precipitação cumulativa após cessar o lançamento de rejeitos em 2016.

Ainda, a segunda causa apresentada na Figura 17 para a perda de resistência dos materiais é o potencial de perda de resistência rápida e significativa que eles possuíam, explicada na Figura 19.

Figura 19 - Causas do potencial de perda de resistência rápida e significativa dos materiais



Fonte: Autora (2021)

É sabido que os materiais depositados possuíam um potencial de perda de resistência rápida e significativa, visto que os rejeitos de dentro da barragem eram finos e de natureza frágil, e o peso específico total dos rejeitos retidos era alto (cerca de 26 kN/m³). O peso específico alto se dá pelo fato de que os rejeitos retidos possuíam um teor muito alto de ferro (superior a 50%) e um teor baixo de quartzo (inferior a 10%). Além disso, um fator crucial para a análise foi o acúmulo de deformação específica sob carga constante, também chamado de *creep*.

O *creep* ocorreu porque os rejeitos eram majoritariamente fofos, saturados, contráteis e pesados, com comportamento potencialmente frágil. O que causou a rigidez e o comportamento frágil foi a presença de cimentação entre partículas, devido à oxidação do ferro que estava presente em grande quantidade nos rejeitos retidos pela barragem. A rigidez e o comportamento frágil causam reações rápidas e repentinas, o que explica a falta de indícios de deformações antes do rompimento.

O fato de os rejeitos serem majoritariamente fofos, saturados, contráteis, pesados e com comportamento potencialmente frágil, juntamente com as altas tensões de cisalhamento no talude a jusante, fez com que uma barragem estivesse próxima ao rompimento em condições não drenadas. De acordo com Robertson *et al.* (2019), nos casos em que os solos são saturados com água, quanto maior a pressão da água, menor a resistência ao cisalhamento, e quanto mais íngreme o talude e mais pesados os solos dentro dele, maior a tensão de cisalhamento.

Assim, o acúmulo de deformações específicas internas (*creep*) e a perda de resistência na zona não-saturada alcançaram um nível crítico, crucial para a ocorrência do rompimento da barragem B1 no dia 25 de janeiro de 2019.

4.3. RESUMO DO CAPÍTULO

O desastre de Brumadinho consistiu no rompimento súbito da barragem de rejeitos de mineração B1, da mina do Córrego do Feijão. A principal investigação geotécnica sobre a ocorrência do desastre foi conduzida pelos especialistas Robertson *et al.* (2019), cujos materiais foram utilizados em análises do Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Apuração (CIAEA, 2020), da Comissão Parlamentar de Inquérito de Brumadinho (CPI BRUMADINHO, 2019) e da Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais (SEGUR, 2019).

Dessa forma, foi elaborada uma Análise de Causa Raiz com base na investigação geotécnica dos especialistas, para que as causas do rompimento da barragem fossem

evidenciadas e, assim, tornasse possível a elaboração de diretrizes para uma gestão de riscos e desastres efetiva em barragens de rejeitos de mineração, baseado nos aprendizados que o caso de Brumadinho proporcionou. Ressalta-se, ainda, que o presente trabalho não possui cunho geotécnico, mas é imprescindível que as causas do desastre sejam conhecidas e relatadas, de maneira resumida e objetiva, para que os gatilhos do rompimento da barragem B1 contribuam para a elaboração das diretrizes de gestão de riscos e desastres em barragens de rejeitos de mineração.

Na Análise de Causa Raiz, de maneira resumida (Quadro 3), evidenciam-se duas causas primárias para o rompimento, que são a liquefação estática nos rejeitos e o projeto da barragem, que possuía características de risco. Os riscos associados ao projeto da barragem são, principalmente, a construção a montante e a formação de um talude íngreme. Já a liquefação estática está diretamente relacionada à perda de resistência dos rejeitos aliada ao alto nível de água na barragem. A perda de resistência dos rejeitos deu-se, resumidamente, pelo acúmulo de deformação específica sob carga constante, sendo que os rejeitos eram finos e de natureza frágil, e houve uma perda significativa de sucção na zona não saturada devido à intensa precipitação em 2018. O alto nível de água na barragem, por sua vez, foi devido à falta de recursos de drenagem significativos na barragem.

Quadro 3 - Resumo das Causas do Rompimento

Ocorrência	Causas primárias	Causas secundárias	Causas terciárias
Rompimento repentino da barragem de rejeitos B1	Projeto da barragem com características de risco	Construção a montante	
		Talude íngreme	Recuo de projeto
	Liquefação estática nos rejeitos da barragem	Alto nível de água na barragem	Falta de recursos de drenagem significativos
		Perda de resistência dos rejeitos da barragem	Acúmulo de deformação específica sob carga constante
			Rejeitos finos e de natureza frágil
			Perda significativa de sucção na zona não saturada

Fonte: Adaptado de Robertson *et al.* (2019)

Os especialistas Robertson *et al.* (2019) relatam que, em resumo, a instabilidade da barragem B1 foi gerada pela soma de diversos fatores: o talude íngreme a montante; o recuo no projeto que empurrou as partes superiores do talude para cima dos rejeitos finos e fracos; a deficiência na drenagem interna que resultou em um alto nível de água na barragem; o alto teor

de ferro nos rejeitos, resultando em rejeitos pesados com cimentação entre partículas, consequentemente rígidos e com comportamento potencialmente muito frágil; o lançamento de rejeitos fracos perto da crista da barragem; e a precipitação alta e intensa na estação chuvosa.

Assim, foi constatado que o fato de a barragem ter sido construída a montante, ter um talude íngreme, estar com alto nível de água e com rejeitos finos e fracos em seu interior gerou as condições para o rompimento (ROBERTSON *et al.*, 2019), e o conhecimento de tais causas permite identificar as ações necessárias para constituírem diretrizes que evitem futuros desastres semelhantes, de acordo com os processos da gestão de riscos e desastres.

DIRETRIZES PARA GESTÃO DE RISCOS E DESASTRES

A Gestão de Riscos e Desastres (GRD), segundo Eyerkauffer (2017), é um instrumento de gestão que permite, de forma interinstitucional, eliminar ou reduzir os fatores de riscos, administrar os eventos quando eles atuam em um cenário vulnerável e, ainda, recuperar este cenário. De acordo com a Lei 12.608/2012 do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, o cenário anterior ao evento requer a gestão dos riscos, com atuação das fases de prevenção, mitigação e preparação; enquanto o cenário durante e pós evento requer a gestão de desastres, com atuação das fases de resposta e de recuperação.

Dessa forma, o capítulo 5 está estruturado com base nas fases da Gestão de Riscos (prevenção, mitigação e preparação) e Gestão de Desastres (resposta e recuperação). Para a primeira, apresentam-se diretrizes para atenuar a possibilidade de ocorrência de novos acidentes, diante dos principais fatores que levaram ao rompimento da barragem de Brumadinho; e para a segunda, apresentam-se lições aprendidas após a ocorrência do desastre.

5.1. FATORES CAUSAIS

Os eventos que resultaram no rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho podem ser classificados de acordo com fatores que englobam várias das causas constatadas:

- I. Água na barragem
 - Falta de recursos de drenagem significativos;

- Limitação da drenagem interna.
- II. Projeto da barragem
- Barragem construída pelo método à montante;
 - Topo do talude empurrado para cima dos rejeitos finos mais fracos, devido ao recuo realizado para alinhar a crista da barragem, visto que a barragem inicial possuía inclinação relativamente íngreme;
 - Rejeitos fracos lançados perto da crista da barragem, pois a água do lago de decantação chegava perto da crista, visto que a parte superior da barragem foi movida para perto do lago de decantação em decorrência do recuo realizado para alinhar a crista da barragem.
- III. Características dos materiais
- Os materiais tinham um potencial de perda de resistência rápida e significativa, pois os rejeitos de dentro da barragem eram finos e de natureza frágil, com peso específico considerado alto;
 - Ocorrência de um acúmulo de deformação específica sob carga constante, pois havia cimentação entre as partículas com alto teor de ferro nos rejeitos, que eram majoritariamente fofos, saturados e contráteis.
- IV. Fatores externos
- Intensa precipitação no final de 2018, ano anterior ao desastre;
 - Precipitação cumulativa após cessar o lançamento de rejeitos em 2016.

Todas as causas agrupadas de acordo com os quatro fatores (água na barragem, projeto da barragem, características dos materiais e fatores externos) estão presentes no diagrama de Análise de Causa Raiz elaborado com base no relatório oficial de investigação de Robertson *et al.* (2019).

Partindo-se do princípio das cinco fases da Gestão de Riscos e Desastres, é possível analisar que o cenário do rompimento da barragem de Brumadinho não está efetivamente alinhado aos processos de prevenção, mitigação e preparação, devido à ocorrência e à magnitude das consequências do desastre.

5.1.1. DIRETRIZES PARA PREVENÇÃO

Na Gestão de Riscos e Desastres, a etapa de prevenção consiste em um conjunto de medidas

tomadas a partir da antecipação de situações que possam causar danos aos cidadãos, à sociedade, aos bens materiais e ao ambiente (TRAJBER *et al.*, 2017). Assim, a Estratégia Internacional para a Redução do Risco de Desastres (UNISDR, 2012) dita que a prevenção é necessária para evitar totalmente ou parcialmente (se inevitável) os potenciais danos dos riscos de desastres. De acordo com Kobiyama *et al.* (2004), as medidas preventivas básicas enquadram-se em dois tipos: as estruturais, que envolvem obras de engenharia, e as não-estruturais, que geralmente envolvem ações de planejamento e gerenciamento.

Assim, é possível constatar que algumas das causas do rompimento da barragem de rejeitos poderiam ter sido evitadas, pois há riscos conhecidos que, se fossem prevenidos, poderiam ter evitado o desastre. No caso de Brumadinho, esses riscos passíveis de prevenção são, primordialmente, os que se associam ao projeto da barragem: o talude íngreme construído à montante, o recuo de projeto que empurrou as partes superiores do talude para cima dos rejeitos finos mais fracos e a ausência de drenagem interna significativa.

As barragens construídas a montante, segundo Peixoto (2012), tendem a ser potencialmente críticas e, quando se rompem, a liberação descontrolada dos rejeitos implica em graves consequências para a vizinhança e para o meio-ambiente. Nesse sentido, os desastres ocorridos em barragens de rejeitos cujas estruturas foram construídas pelo método à montante motivaram a proibição desse método construtivo, de acordo com a atual Resolução ANM nº 13/2019 (ANM, 2021):

“Art. 8º Com vistas a minimizar o risco de rompimento, em especial por liquefação, das barragens alteadas pelo método a montante ou por método declarado como desconhecido, o empreendedor deverá:

I - até 15 de dezembro de 2019, concluir a elaboração de projeto técnico executivo de descaracterização da estrutura, que deverá contemplar, no mínimo, sistemas de estabilização da barragem existente ou a construção de nova estrutura de contenção situada à jusante, ambos conforme definição técnica do projetista, com vistas a minimizar o risco de rompimento por liquefação ou reduzir o dano potencial associado, tendo como balizador a segurança e obedecendo a todos os critérios de segurança descritos na Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 e na norma ABNT NBR 13.028 e ou normativos que venham a sucedê-las;

II - Até 15 de setembro de 2021, concluir as obras do sistema de estabilização da barragem existente ou a construção de nova estrutura de contenção situada à jusante, conforme definição técnica do projetista;

III - concluir a descaracterização da barragem nos seguintes prazos:

i. Até 15 de setembro de 2022, para barragens com volume < 12 milhões de metros cúbicos, conforme Cadastro Nacional de Barragens de Mineração do SIGBM;

ii. Até 15 de setembro de 2025, para barragens com volume entre 12 milhões e 30

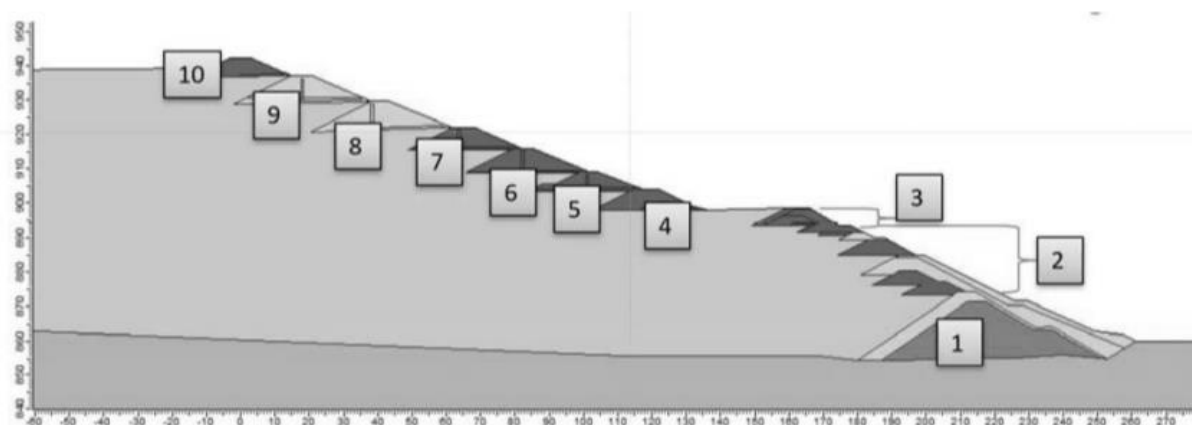
milhões de metros cúbicos, conforme Cadastro Nacional de Barragens de Mineração do SIGBM; e

iii. Até 15 de setembro de 2027, para barragens com volume > 30 milhões de metros cúbicos, conforme Cadastro Nacional de Barragens de Mineração do SIGBM.”

O caso de Brumadinho simbolizou o estopim dos rompimentos de barragens a montante no país, e somente após presenciar todas as consequências desse desastre humanitário foi imposta a descaracterização das barragens a montante, mesmo que o grande risco desse método já fosse amplamente conhecido. A partir da Resolução ANM n° 13/2019, a prevenção na Gestão de Riscos e Desastres passa a ser válida para que outras barragens a montante não gerem outros desastres humanitários e ambientais a partir de seus rompimentos.

Um outro risco associado ao próprio projeto da barragem B1 foi a construção de um recuo após o terceiro alteamento (Figura 20), feito para alinhar a crista da barragem. De acordo com o relatório apresentado por Robertson *et al.* (2019), o recuo reduziu a inclinação geral que o projeto inicial da barragem possuía, mas com isso a parte superior da barragem foi movida para mais perto do lago de decantação e do futuro nível interno da água, o que levou os rejeitos fracos para perto da crista, com camadas intercaladas de rejeitos finos e grossos retidos pela barragem, e movendo a parte superior da barragem para cima dos rejeitos fracos e finos.

Figura 20 - Representação dos dez alteamentos e o recuo após o terceiro alteamento



Fonte: Robertson *et al.* (2019)

Dessa forma, a presença de camadas de rejeitos finos menos permeáveis dentro da barragem somada à falta de recursos de drenagem significativos resultou em um nível de água alto dentro da barragem (ROBERTSON *et al.*, 2019), o que se mostrou um fator crucial para a ocorrência da liquefação estática não drenada e consequente rompimento da barragem. A drenagem insuficiente, por sua vez, é outra característica do projeto da barragem que teve grande influência nas causas do desastre, considerando que os primeiros alteamentos foram

construídos sem drenagem interna (CPI BRUMADINHO, 2019).

Diante do exposto, alguns fatores causais do rompimento da barragem B1 poderiam ter sido evitados com o processo de prevenção. Na Figura 21, esses fatores causais são relacionados à diretrizes de maneira simples, resumida e objetiva, alinhado ao conceito da definição do processo de prevenção na gestão de riscos e desastres e baseado nas recomendações técnicas para barragens de rejeitos de mineração.

Figura 21 - Diretrizes para Prevenção

PREVENÇÃO	
Evitar totalmente ou parcialmente (se inevitável) os potenciais danos dos riscos de desastres (UNISDR, 2012).	
Fatores Causais	Diretrizes
Talude íngreme à montante, recuo de projeto e ausência de sistema de drenagem significativo (primeiros alteamentos construídos sem drenagem interna).	Descaracterização de barragens à montante (ANM, 2021) e construção de sistema de drenagem eficiente desde a fase de projeto.

Fonte: Autora (2022)

Os fatores relacionados ao projeto inicial de construção da barragem representam riscos irrefutáveis, que aumentam a possibilidade de falhas no futuro e diminuem a eficácia de ações tardias. Logo, ao se tratar da fase de projeto, ações de identificação, mapeamento e monitoramento do risco são essenciais para executar a etapa de prevenção na gestão de riscos e desastres (TRAJBER *et al.*, 2017).

5.1.2. DIRETRIZES PARA MITIGAÇÃO

A mitigação dos riscos existentes visa estabelecer e aplicar medidas corretivas de controle para reduzir, antecipadamente, os possíveis efeitos da ocorrência que tais riscos podem culminar (LOPES, 2017). No caso da barragem de rejeitos, a drenagem interna e os materiais depositados possuíam características de risco que contribuíram para o rompimento da B1. Por serem características conhecidas previamente, a Gestão de Riscos e Desastres poderia se fazer presente para que houvesse a mitigação dos riscos existentes.

A liquefação é um processo de ruptura que ocorre em solos não coesivos, saturados e em condições de carregamento não drenado (SOUZA, 2018). Em Brumadinho, os materiais eram majoritariamente fofos, saturados, contráteis, pesados e com comportamento potencialmente frágil, o que, juntamente com as altas tensões de cisalhamento no talude a jusante, fez com que a barragem estivesse próxima ao rompimento dentro das condições não

drenadas às quais ela se enquadrava (ROBERTSON *et al.*, 2019). Assim, sabendo-se que a liquefação estática não drenada pode ocorrer em barragens que possuem acúmulo de água em seu interior e que retêm rejeitos com potencial de perda de resistência súbita, é essencial que seja feita uma análise de riscos e que estes sejam mitigados.

Uma vez que a drenagem interna da barragem B1 esteve ausente desde os primeiros alteamentos, constata-se que a fase de prevenção não foi efetivamente executada. No entanto, a mitigação dos riscos torna-se uma alternativa válida para reduzi-los. Isso se deve ao fato de que, para que seja possível mitigar os riscos existentes, é necessário que haja informações e avaliações sobre eles, indicando a probabilidade de sua ocorrência, área a ser afetada, recorrência e efeitos finais, junto de ferramentas para planejamento e execução de ações para redução dos riscos (NARVAÉZ *et al.*, 2009), o que se adequa ao caso dos riscos relacionados às deficiências já conhecidas sobre a barragem B1.

De acordo com Ersoy e Haselsteiner (2018), a drenagem interna é um dos fatores responsáveis pela percolação na barragem, desde a sua construção até o seu estado de funcionamento total; assim, toda a água que flui deve ser drenada com máxima eficiência, pois, caso contrário, a poropressão (pressão de água que preenche os espaços vazios entre as partículas sólidas) poderá afetar a estabilidade da estrutura. No caso da barragem B1 de Brumadinho, foram construídos drenos de pé e tapetes drenantes em grande parte dos alteamentos, mas no geral a drenagem interna era insuficiente porque, além de a construção inicial da barragem não ter tido a drenagem necessária e adequada, as bermas a montante foram construídas com materiais de baixa permeabilidade (ROBERTSON *et al.*, 2019). Além disso, Brumadinho presenciou uma precipitação cumulativa após o fim do lançamento dos rejeitos em 2016, e intensificada no ano de 2018, o que foi considerado como um fator agravante para a drenagem ineficiente da barragem.

Para barragens construídas a montante, Soares (2010) cita alguns dos cuidados necessários para melhorar a segurança e desempenho da obra:

- Evitar retenções de água próximo à crista ou em áreas confinadas, através de um plano de lançamento de rejeitos e de manobras da tubulação do lançamento;
- Os rejeitos devem ter fração arenosa e devem ser lançados com uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem, para que a drenagem seja favorecida;
- O nível de água do reservatório deve ficar afastado da crista da barragem, por meio da adoção de sistemas para esgotamento das águas de chuva;

- A baixa segregação dos rejeitos e a baixa permeabilidade normalmente elevam o nível freático do corpo da barragem;
- À medida que a barragem é alteada, o talude de jusante deve ser tratado contra erosões provocadas pelas chuvas, conduzindo a água por meio de canaletas e caixas de passagem.

De modo geral, a ineficiência do sistema de drenagem e as características dos rejeitos depositados são fatores causais que podem ser mitigados, de acordo com recomendações técnicas para reduzir os riscos associados, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Diretrizes para Mitigação

MITIGAÇÃO	
Reduzir, antecipadamente, os possíveis efeitos da ocorrência dos riscos de desastres (LOPES, 2017).	
Fatores Causais	Diretrizes
Drenagem interna e materiais depositados com características de risco (majoritariamente fofos, saturados, contráteis, pesados e com comportamento potencialmente frágil).	Os rejeitos devem ter fração arenosa e devem ser lançados com uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem, para que a drenagem seja favorecida (SOARES, 2010).

Fonte: Autora (2022)

Nesse contexto, verifica-se que muitas características listadas como causas, diretas ou indiretas, do desastre de Brumadinho estão relacionadas a medidas que visam mitigar os riscos para barragens de rejeitos construídas a montante, conforme citado por Soares (2010). Além disso, Soares (2010) afirma que a barragem deve ser monitorada durante todo o período de alteamento e após a fase de desativação, de modo contínuo.

5.1.3. DIRETRIZES PARA PREPARAÇÃO

A etapa de preparação, segundo Narváez *et al.*, (2009), consiste em desenvolver capacidades, instrumentos e mecanismos para responder adequadamente ante à eminência da ocorrência de desastres. Para Rodrigues *et al.*, (2020), a etapa de preparação consiste em atividades com objetivo de minimizar as perdas humanas e materiais de um evento eminente, melhorando, segundo Vazquez (2018), a capacidade da comunidade e das instituições para atuar em caso de desastre.

Conhecido como PAEBM, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, é um documento técnico e de fácil entendimento elaborado pelo empreendedor que

possui a concessão de exploração de uma barragem, no qual estão identificadas as situações de emergência em potencial da barragem, estabelecidas as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados, com objetivo de minimizar danos sociais, materiais e econômicos da população a jusante do empreendimento (SEGUR, 2019). De acordo com o art. 12º da Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010), o PAEBM deve contemplar, no mínimo:

- i) Identificação e análise de possíveis situações de emergência;
- ii) Métodos para identificação e notificação de falha ou de condições potenciais de ruptura da barragem;
- iii) Procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em casos de emergência, indicando o responsável pela ação; e
- iv) Estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em caso de emergência.

A elaboração do PAEBM é obrigatória em três casos: primeiro, para barragens de mineração classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) alto; segundo, para barragens de DPA médio, mas com ocupação permanente de pessoas na área de risco ou com grande potencial de impacto ambiental; e terceiro, para barragens que armazenem substâncias classificadas como perigosas (SEGUR, 2019.) A barragem B1 de Brumadinho é classificada como Dano Potencial Alto, portanto, por obrigatoriedade, possuía um Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.

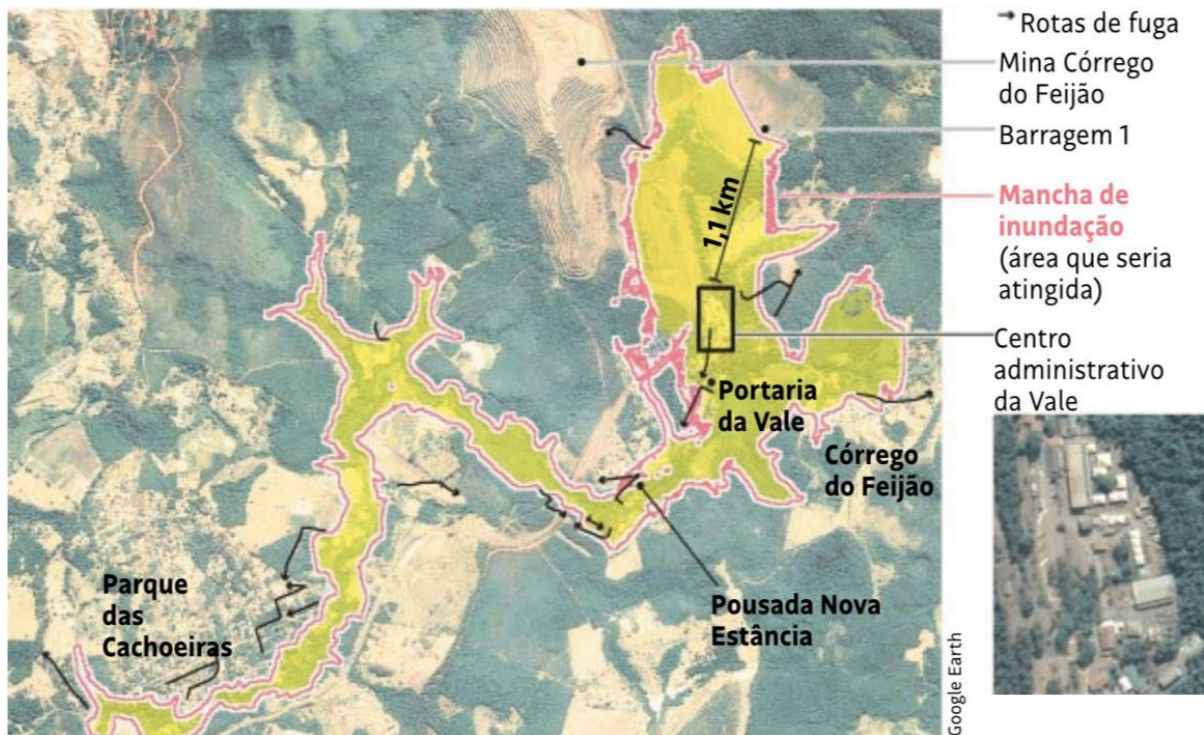
Segundo o relatório de investigação apresentado pela CPI de Brumadinho (2019), o Plano de Ação de Emergência da B1 mostrava que a lama chegaria no primeiro trecho afetado em até 60 segundos. No entanto, quando o desastre ocorreu, o fluxo de lama chegou em 34 segundos. Ainda, calculava-se que as pessoas sairiam pela rota de fuga entre 5 a 10 minutos, evidenciando que a estruturação do Plano de Ação de Emergência não foi eficaz para o cenário real do rompimento da barragem.

Um outro item relacionado à fase de preparação na Gestão de Riscos e Desastres em barragens de rejeitos de mineração é o conceito de Zona de Autossalvamento (ZAS). Segundo Rocha (2017), a ZAS é a região do vale a jusante da barragem onde deve haver avisos de alerta à população frente à eminência de um desastre, sendo que a responsabilidade por tais alertas é do empreendedor, visto que não há tempo suficiente para uma intervenção de autoridades competentes em situações de emergência nessa área.

De acordo com o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, a notificação da ZAS é feita com o uso de diferentes mecanismos de comunicação, com uso de acionamentos sonoros, comunicação direta com deslocamento imediato a áreas e contatos para

telefones cadastrados da comunidade e demais agentes públicos (SEGUR, 2019). A Figura 23 apresenta o esquema da Zona de Autossalvamento da Mina Córrego do Feijão, onde se localiza a barragem B1.

Figura 23 - Zona de Autossalvamento da Mina Córrego do Feijão



Fonte: SEGUR (2019)

Até então, a zona de autossalvamento era delimitada pela menor das seguintes distâncias: 10 quilômetros ou a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos (VISEU, 2008). Em 15 de fevereiro de 2019, foi elaborada a Resolução nº 4 Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), que estabeleceu uma previsão de retirada de todas as instalações com ocupação humana existentes na zona de autossalvamento (ZAS), de modo a reduzir significativamente o dano potencial associado às barragens.

De modo geral, a falha no planejamento e elaboração do PAEBM e a falta de avisos sonoros na zona de autossalvamento são fatores que poderiam ter minimizado os danos do desastre se o processo de preparação tivesse sido corretamente seguido, de acordo com diretrizes de recomendações técnicas, conforme apresenta a Figura 24.

Figura 24 - Diretrizes para Preparação

PREPARAÇÃO	
Minimizar as perdas humanas e materiais de um evento eminente (RODRIGUES <i>et al.</i> , 2020).	
Fatores Causais	Diretrizes
Falha no PAEBM (falta de treinamento para a comunidade e falha nos procedimentos a serem adotados em caso de ruptura). Falta de aviso sonoro na zona de autossalvamento.	No PAEBM, indicar procedimentos para casos de emergência e a estratégia de meio de divulgação e alerta para as comunidades em caso de emergência, entre outros (BRASIL, 2010). Retirar todas as instalações com ocupação humana existentes em ZAS (ANM, 2019).

Fonte: Autora (2022)

As falhas no planejamento, elaboração e divulgação das informações do PAEBM demonstram um fator crítico para o processo de preparação. As devidas indicações de procedimentos e estratégias no PAEBM são essenciais para que a comunidade tenha conhecimento e habilidades para se organizar frente à eminência de um desastre. Ainda, a ocupação humana em zonas de autossalvamento é uma grande exposição aos riscos de rompimento de barragens, e sua desocupação passou a ser um direcionamento difundido para que as pessoas que habitam outras ZAS não estejam diante de tais riscos.

5.2. O PÓS-DESASTRE

A Gestão de Riscos e Desastres atua com três diferentes âmbitos: a gestão para evitar novos riscos, a gestão para reduzir o risco existente e a gestão para atender às emergências decorrentes do desastre (CIF-OIT, 2012). Nesse sentido, o atendimento às emergências enquadra-se nas fases de Resposta e Recuperação, que são ações realizadas durante e após o desastre, vinculadas às lições aprendidas com o evento, e serão apresentadas neste tópico com base no caso de Brumadinho.

5.2.1. LIÇÕES APRENDIDAS: RESPOSTA

A fase de resposta na Gestão de Riscos e Desastres, segundo Narváez *et al.* (2009), consiste na execução de medidas necessárias para salvar vidas, resgatar bens e regularizar a operação dos serviços, baseado nos planos de emergência e de contingência. De acordo com a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC, 2017), a resposta ao desastre deve ocorrer imediatamente após o evento, e normalmente segue uma sequência lógica de ações: socorro aos

afetados, assistência às vítimas e reestabelecimento de serviços essenciais, que podem ser descritas como:

- Ações de socorro: visam preservar a vida das pessoas com integridade física ameaçada devido ao desastre, e para isso destaca-se, entre outras ações, a busca, salvamento e remoção de vítimas; os primeiros socorros; o atendimento pré-hospitalar; a assistência médica para a população afetada; a orientação e informação à população; desocupação da população atingida; etc.;
- Ações de assistência às vítimas: visam manter a integridade física e restaurar as condições de uma vida digna até o retorno da normalidade, sendo necessário instalar abrigos, oferecer assistência psicossocial e psicológica, distribuir água potável, cestas de alimentos, colchões e demais necessidades básicas;
- Ações de reestabelecimento de serviços essenciais: visam garantir o funcionamento dos serviços essenciais que foram afetados pelo desastre, como o reestabelecimento de energia elétrica, de água potável e de serviços de saúde, a remoção dos escombros e desobstrução de vias de acesso, reestabelecimento de sistemas de comunicação, sepultamento de vítimas, limpeza e desinfecção dos cenários de desastres e afins.

A Comissão Parlamentar de Inquérito da Assembleia Legislativa de Minas Gerais (CPI ALMG, 2021), apresenta algumas das ações de resposta ao desastre de Brumadinho: após o rompimento da barragem, as forças municipais, estaduais e nacionais de resgate foram mobilizadas, junto ao Exército brasileiro e Israelense, que deslocou 130 oficiais e soldados com equipamentos de salvamento e permaneceu no Brasil durante quatro dias de busca. Uma rede hospitalar foi colocada de prontidão para atendimento às vítimas e ambulâncias dos municípios vizinhos se deslocaram até Brumadinho. Roupas, alimentos e remédios começaram a chegar em forma de doações, em grande quantidade, sendo suficiente para atender às demandas das pessoas atingidas. No aspecto ambiental, órgãos e entidades do SISEMA deram início ao atendimento às demandas ambientais decorrentes do desastre.

De acordo com a CPI de Brumadinho (2019), os familiares dos desaparecidos relataram que as sirenes de segurança na zona de auto salvamento não foram acionadas, e, além disso, comentaram a respeito da falta de informações sobre as buscas. Na pesquisa de Melo e Guimarães (2021), constata-se a falta de conhecimento da população a respeito do risco de rompimento da barragem B1, assim como a ausência de quaisquer sistemas de respostas compartilhados entre o Estado, a empresa responsável e a comunidade local, demonstrando a falta de acesso a um plano de emergência.

Nesse contexto, a ineficiência nos processos de prevenção, mitigação e preparação afetaram o processo de resposta ao desastre, prejudicando a atuação de órgãos como a Defesa Civil, visto que o cenário imediatamente após o rompimento da barragem apresentava desorganização e despreparação.

A falta de um sistema de resposta e de planos com as responsabilidades e funções definidas, somada à falta de clareza das instituições envolvidas, resultaram em uma mobilização intensa e desordenada na população, o que gerou a criação de redes de comunicação entre a população, remetendo ao conceito de resiliência (MELO; GUIMARÃES, 2021). Definida como a "capacidade de um sistema, comunidade ou sociedade exposto a riscos de resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se dos efeitos de um perigo de maneira tempestiva e eficiente, através, por exemplo, da preservação e restauração de suas estruturas básicas e funções essenciais" pelo UNISDR (2009), a rede de comunicação criada pela população demonstra a capacidade de adaptação para a criação de um sistema de resposta diante de suas limitações, com instinto de preservação da vida.

5.2.2. LIÇÕES APRENDIDAS: RECUPERAÇÃO

De acordo com Narváez *et al.* (2009), a fase de recuperação consiste em reestabelecer as condições aceitáveis e sustentáveis de desenvolvimento econômico e social da comunidade afetada, com reabilitação permanente, recuperação da infraestrutura local e de bens e serviços. No caso de Brumadinho, a recuperação no cenário pós desastre envolve aspectos sociais, econômicos e ambientais não só da comunidade afetada, mas também de cidades vizinhas abastecidas pelo Rio Paraopeba, que foi contaminado pelos rejeitos de mineração e levou a lama tóxica até o município de Pará de Minas, a 40 quilômetros do local do rompimento (CPI ALMG, 2021).

O Novo Código Brasileiro de Mineração, que foi instituído em 12 de junho de 2018, visa regular a atividade mineradora em conjunto com a Agência Nacional de Mineração, que é o órgão responsável pelo controle, licenciamento e autorização da exploração dos minérios (BRASIL, 2018). Devido ao alto potencial de degradação para o meio ambiente, o Decreto nº 97.632/89 determina que as medidas de recuperação do meio degradado devem ser previstas e assumidas, sendo obrigatória a apresentação de um plano de recuperação da área afetada (TRENNEPOHL, 2019). Dessa forma, o Novo Código Brasileiro de Mineração dita que o minerador possui a responsabilidade de recuperar as áreas degradadas (BRASIL, 2018).

De acordo com o Governo de Minas Gerais (2021), em 04 de fevereiro de 2021 foi

realizado um Acordo Judicial de Reparação entre a empresa mineradora e o Ministério Público de Minas Gerais, o Ministério Público Federal e a Defensoria Pública de Minas Gerais, em um documento que garante a responsabilização da Vale S.A. pelos danos causados às regiões atingidas, com objetivo de reparar os danos decorrentes do desastre de Brumadinho.

O Acordo Judicial garante medidas reparatórias ao Estado, com foco principal na região atingida, e inclui projetos de demanda das comunidades atingidas, programa de transferência de renda à população atingida, projetos para Brumadinho e demais municípios da Bacia do Paraopeba, e disponibilização de recursos para execução, pelo governo do Estado de Minas Gerais, do Programa de Mobilidade Urbana e do Programa de Fortalecimento do Serviço Público, com um valor inicial total de R\$37.689.767.329,00 (GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2021). Além disso, o acordo estabelece as diretrizes e governança para execução, pela Vale, do Plano de Reparação, bem como projetos a serem implementados para a compensação dos danos ambientais já conhecidos e projetos destinados à segurança hídrica da região impactada (VALE S.A., 2021).

O Programa de Reparação Socioeconômica, segundo o Governo do Estado de Minas Gerais (2021), “deve respeitar os modos de vida locais, a autonomia das pessoas atingidas e o fortalecimento dos serviços públicos”, abrangendo Brumadinho e outros 25 municípios considerados atingidos pelo desastre. O Programa divide-se em quatro macro áreas: projetos de demandas das comunidades atingidas, programa de transferência de renda à população atingida, projetos para a Bacia do Paraopeba e Projetos para Brumadinho.

O segundo programa de reparação apresentado pelo Governo do Estado de Minas Gerais (2021), intitulado Programa de Reparação Socioambiental, “visa à reparação dos municípios e das comunidades atingidas, com intervenções de recuperação do meio ambiente e de compensação dos danos que foram considerados irreversíveis”, e divide-se em: recuperação socioambiental, compensação socioambiental dos danos já conhecidos e projetos de segurança hídrica.

Em seguida, foi criado o Programa de Mobilidade, descrito pelo Governo do Estado de Minas Gerais (2021) como uma forma de reparação e compensação aos impactos provocados em decorrência do desastre, através de projetos que visam proporcionar melhoria da qualidade de vida das pessoas, aprimoramento logístico das regiões, atração de investimentos, emprego e elevação da renda. O Programa de Fortalecimento do Serviço Público prevê melhorias em áreas do setor público, como saúde, trabalho, economia, tecnologia e segurança, através de conclusão de obras nos hospitais regionais, construção de bacias de contenção de água da chuva, aquisição de equipamentos para forças de segurança e outros.

Por fim, o Governo do Estado de Minas Gerais (2021) destaca que parte do Acordo Judicial é destinado a projetos emergenciais, com atuação das forças de segurança na operação de buscas, identificação das vítimas e remoção das pessoas em condição de risco, além de projetos prioritários em caráter emergencial, relacionados ao corpo de bombeiros, à defesa civil e outros.

A necessidade de criação de diversos programas de reparação deve-se à magnitude das perdas humanas, físicas e ambientais decorrentes do desastre. Diante disso, uma série de ações foram tomadas no pós-desastre devido às suas consequências: após o rompimento da barragem B1, a Agência Nacional de Mineração emitiu a Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, que proibiu a construção de barragens pelo método a montante devido ao alto risco atrelado a essas construções, que são muito utilizadas pelas mineradoras por conta do baixo custo (BRASIL, 2019).

Ainda, Spezia (2021) comenta que em outubro de 2019 instaurou-se a Nova Política Nacional de Segurança de Barragens, através da Lei nº 14.066/2020, que impõe alterações na fiscalização, nas infrações administrativas e na segurança das barragens, com apresentação de medidas de prevenção mais rígidas e mais obrigações às mineradoras e aos órgãos fiscalizadores. Em 2020, após o desastre de Brumadinho, a Nova Política alterou a definição de dano potencial associado à barragem, caracterizando-o como independente da probabilidade de ocorrência, e relacionando-o com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais, definindo o significado de categoria de risco, zona de autossalvamento, zona de segurança secundária, mapa de inundação, acidente, incidente, desastre e barragem descaracterizada (BRASIL, 2020).

Além disso, a Nova Política incluiu um artigo que proíbe o alteamento de barragens pelo método a montante, e impõe às mineradoras que essas barragens devem ser descaracterizadas até 25 de fevereiro de 2022, considerando as soluções técnicas exigidas pelos órgãos reguladores e fiscalizadores, podendo esse prazo ser prorrogado (BRASIL, 2020).

5.3.RESUMO DO CAPÍTULO

As causas do rompimento de uma barragem de rejeitos são os fatores que, juntos, resultaram no desastre. Nessa dissertação, foram consideradas apenas as principais causas relatadas na investigação oficial de Robertson *et al.* (2019), visto que, ao contrário do cunho estritamente geotécnico de barragens de rejeitos, a pesquisa visa apresentar o estudo de caso de Brumadinho a partir da visão da Gestão de Riscos e Desastres. Então, este capítulo apresenta os eventos que

de fato aconteceram antes do desastre, e complementa-os com a apresentação das recomendações feitas para prevenir e mitigar os riscos, além de se preparar para a eminente ocorrência do desastre. Em resumo, é apresentado o conflito entre o que de fato ocorreu e o que, de acordo com a Gestão de Riscos e Desastres, seria o indicado a se realizar.

De maneira geral, as principais deficiências da barragem de rejeitos de mineração de Brumadinho que levaram ao desastre estão relacionadas a fatores construtivos e fatores gerenciais. As ações que antecedem ao evento fazem parte da Gestão de Riscos e compreendem os processos de prevenção, mitigação e preparação. Nesse trabalho, os acontecimentos do caso Brumadinho foram apresentados em contraste com recomendações da GRD, gerando diretrizes que apresentam as principais falhas e as principais recomendações, para que casos de barragens semelhantes não resultem em futuros desastres. As diretrizes baseadas nas principais deficiências do caso Brumadinho são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 - Diretrizes para Gestão de Riscos em Barragens de Rejeitos de Mineração

Evitar totalmente ou parcialmente (se inevitável) os potenciais danos dos riscos de desastres (UNISDR, 2012).		
Prevenção	Fatores Causais	Diretrizes
		Talude íngreme à montante, recuo de projeto e ausência de sistema de drenagem significativo (primeiros alteamentos construídos sem drenagem interna).
Reduzir, antecipadamente, os possíveis efeitos da ocorrência dos riscos de desastres (LOPES, 2017).		
Mitigação	Fatores Causais	Diretrizes
		Drenagem interna e materiais depositados com características de risco (majoritariamente fofos, saturados, contráteis, pesados e com comportamento potencialmente frágil).
Minimizar as perdas humanas e materiais de um evento eminente (RODRIGUES <i>et al.</i> , 2020).		
Preparação	Fatores Causais	Diretrizes
		Falha no PAEBM (falta de treinamento para a comunidade e falha nos procedimentos a serem adotados em caso de ruptura). Falta de aviso sonoro na zona de autossalvamento.

Fonte: Autora (2022)

A primeira fase da Gestão de Riscos e Desastres, a prevenção, visa reduzir os riscos por meio da atuação sobre as ameaças e vulnerabilidades identificadas e priorizadas na análise de risco, e embora alguns fatores do caso de Brumadinho tenham sido listados nessa pesquisa como passíveis de prevenção, como a escolha do método de construção da barragem, a

execução do recuo do projeto e a estrutura de drenagem interna, as ações cabíveis para a redução ou eliminação dos riscos dependem da interpretação, dos recursos e da priorização feita pela empresa responsável pela barragem de rejeitos.

A segunda fase, a mitigação, diz respeito à identificação e redução dos riscos existentes e, uma vez ciente das condições estruturais, de drenagem e dos materiais retidos na barragem, as recomendações de mitigação dos riscos se fazem necessárias para que a possibilidade de ocorrência de liquefação estática diminua. A terceira fase, por sua vez, é a de preparação para a eminência de um desastre. Nesse caso, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração mostra-se um documento muito importante para garantir que todos os envolvidos estejam preparados diante de uma possível ruptura de barragem. Em Brumadinho, o PAEBM apresentou algumas deficiências que invalidaram a sua eficácia.

A falta de informação, como um todo, evidencia o impacto negativo sobre o nível de preparação da população frente à eminência de um desastre. Em Brumadinho, a comunidade local respondeu ao desastre de maneira intuitiva para a preservação da vida, com ausência de conhecimento e capacitação, aumentando as consequências do desastre.

O processo de resposta ao desastre, ainda, foi afetado pelas falhas nas fases anteriores da Gestão de Riscos e Desastres: prevenção e mitigação falhas, por parte da empresa responsável pela barragem; e preparação inadequada, evidenciada principalmente pela ineficácia do Plano de Atendimento a Emergências. Tais falhas prejudicaram a atuação de órgãos que auxiliam na resposta aos desastres, como a Defesa Civil, visto que o cenário imediatamente após o rompimento da barragem apresentava desorganização e despreparação. Dessa forma, o processo de recuperação ao desastre foi, e está sendo, bastante intenso. Os projetos de reparação para a população afetada envolvem uma série de recursos e, mesmo que exista uma boa estruturação dos projetos e um bom apoio financeiro para sua execução, os danos para a população local permanecem na história e o tempo até que a vida se reestabeleça normalmente pode ser imensurável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O caso de Brumadinho exemplifica um desastre de extensa magnitude, tanto devido às perdas humanas e físicas quanto ao impacto ambiental, que se mantém presente no solo e na água por um longo período, aumentando a gama de pessoas atingidas pelos danos conforme o tempo. O desastre de Brumadinho resulta da soma de uma intensa atividade mineradora a uma deficiente gestão de riscos e desastres, e suas consequências demonstram a gravidade a qual essa junção pode chegar.

Os danos continuam a ser reparados e, mesmo com diversos projetos e investimentos, há uma série de barreiras que dificultam a recuperação da vida local, entre elas o tempo e tudo o que já foi perdido devido ao desastre. No entanto, as grandes dificuldades enfrentadas após um evento de tamanha magnitude trazem consigo grandes lições, e cabe às empresas mineradoras, aos órgãos fiscalizadores, aos pesquisadores e à população em geral entendê-las, gerar informações de qualidade e aprender com elas.

Nesse sentido, esta pesquisa foi elaborada a fim de responder a um questionamento: como o diagnóstico do caso de Brumadinho pode auxiliar na prevenção, mitigação e preparação para um possível rompimento de outras barragens? E, diante dessa questão, o desastre de Brumadinho foi analisado pelo aspecto técnico, para que pudesse ser um contribuinte no aspecto gerencial, especificamente no âmbito da gestão de riscos e desastres. Dessa forma, os relatórios oficiais da investigação do rompimento da barragem foram lidos para elaborar um diagnóstico do caso. O diagnóstico, por sua vez, foi apresentado por meio de uma análise de causa raiz, que exemplificou as principais causas e condições que levaram ao desastre. Ressalta-se, ainda, que

esta pesquisa não possui cunho geotécnico, mas para estruturar os fatores causais de um evento é imprescindível conhecer as causas técnicas que levaram à sua ocorrência. A partir do conhecimento dessas causas, torna-se possível identificar quais ações poderiam tê-las evitado. Assim, a finalidade do diagnóstico foi de evidenciar os fatores causais e simplificar o entendimento deles, para posteriormente apresentar as ações, aqui chamadas de diretrizes, que seriam eficientes para evitar a ocorrência de um desastre. Dessa forma, indicar os fatores causais relacionados às principais falhas que culminaram no desastre e confrontá-los com as ações e condições ideais, de acordo com a gestão de riscos e desastres, pode auxiliar na forma como outras barragens serão gerenciadas, a fim de evitar futuros desastres em situações similares.

As diretrizes para gestão de riscos e desastres são apresentadas de maneira simples, objetiva e clara, de forma que qualquer pessoa consiga entender não apenas as diretrizes, mas também o motivo pelo qual elas foram listadas nessa pesquisa. A gestão de riscos e desastres foi abordada por processos, sendo analisada a cada etapa do caso de Brumadinho. No cenário pré-desastre, a abordagem foi feita em forma de diretrizes, visando auxiliar o gerenciamento de riscos e desastres para outras barragens de rejeitos de mineração e evitar a possibilidade de rompimento, com base nos fatores causais identificados no caso de Brumadinho:

- **Prevenção:** a construção a montante com um talude íngreme, resultante de um recuo de projeto, e um sistema de drenagem ineficiente são fatores causais construtivos e evitáveis, por isso foram apresentados no primeiro processo da GRD. Para isso, esclarece-se a necessidade de garantir sistemas de drenagem interna eficazes, e ressalta-se os riscos associados às barragens a montante, que devem ser descaracterizadas.
- **Mitigação:** os rejeitos fofos, saturados, contráteis, frágeis e pesados, em conjunto com o sistema de drenagem ineficiente, mostram-se como características de risco para uma barragem de rejeitos. A possibilidade de mitigar tais riscos enquadra esses fatores causais no segundo processo da GRD, e a diretriz para mitigá-los é garantir o lançamento dos rejeitos com uma fração arenosa e uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem.
- **Preparação:** falha no Plano de Ação a Emergências em Barragens de Mineração (PAEBM), principalmente devido à falha na elaboração e divulgação dos procedimentos a serem adotados em caso de rompimento da barragem, e falta de comunicação para as pessoas presentes na zona de autossalvamento. O PAEBM deve conter procedimentos e orientações que visam minimizar os danos frente à ocorrência de um desastre, e uma falha em seu planejamento ou elaboração está diretamente ligada à uma deficiência no processo de preparação, de acordo com a GRD. Por isso, é essencial que o PAEBM

indique os procedimentos corretos para casos de emergência e garanta a correta comunicação e treinamento da comunidade envolvida. Para a zona de autossalvamento, o risco intrínseco para a população que reside nessa área de risco levou ao decreto de retirada das instalações com ocupação humana nesses locais.

Os processos da GRD no cenário pré-desastre foram vinculados a diretrizes para evitar a ocorrência de possíveis futuros eventos, visto que lidam com etapas de planejamento, organização e execução de ações antes de um desastre ocorrer. Para os processos no cenário pós-desastre, resta difundir o conhecimento gerado com as lições aprendidas, pois as ações que seguem após o desastre acompanham a qualidade da execução dos processos anteriores ao desastre. Logo, se os processos no cenário pré-desastre não foram bem planejados e executados, os processos no cenário pós-desastre serão dificultados pela desorganização e despreparo das pessoas envolvidas. Nesse sentido, os processos pós-desastre foram apresentados neste trabalho de forma a evidenciar algumas das lições aprendidas com o caso de Brumadinho:

- Resposta: após o rompimento da barragem de rejeitos, a comunidade local não foi avisada pelo sinal sonoro. A falta de treinamento para situações de emergência, de definição de funções e responsabilidades, e de um sistema de resposta como um todo geraram uma mobilização intensa e desordenada da população, dificultando a atuação da defesa civil. Assim, a resposta ao desastre foi prejudicada pela falha nos processos anteriores, o que demonstra a importância dos processos da GRD atuando como um todo.
- Recuperação: o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Brumadinho resultou em extensas perdas humanas, físicas e ambientais. Para a recuperação do local e das proximidades, diversos projetos foram iniciados, por parte da empresa responsável pela barragem. Embora o investimento financeiro para tais projetos seja alto, as vidas perdidas não são recuperáveis e as consequências dos danos ao Rio Paraopeba são irreversíveis. As perdas, diante do investimento para o processo de recuperação, demonstram o quão assertivo seria se a destinação desses recursos fosse, desde o início, para a gestão de riscos e desastres da barragem B1.

O tema abordado nesta pesquisa possui grande relevância para a sociedade, para o governo, para as entidades e para as empresas com responsabilidade direta sobre as barragens de rejeitos de mineração em condições críticas. No Brasil, a ocorrência de desastres advindos do setor de mineração é mundialmente representativa, como apresentado na Revisão Bibliográfica Sistemática, assim como a deficiência da gestão de riscos, que amplia os impactos negativos provenientes dos casos de rompimentos de barragens de mineração brasileiras.

O aumento do número de pesquisas elaboradas sobre gestão de riscos e desastres, rompimentos de barragens e análise de causa raiz representa uma maior preocupação e disposição de prontidão e interesse por parte dos pesquisadores, que agregam conteúdos importantes para a atividade mineradora e para os envolvidos na gestão de riscos e desastres. Para a execução desta pesquisa, foram consultados relatórios oficiais de investigação do caso de Brumadinho, não havendo visita ao local e entrevista com envolvidos. Diante desta lacuna, há a oportunidade de visitar a comunidade afetada, entrevistando-a, e dar continuidade futura a esta pesquisa com o acompanhamento do processo de recuperação ao desastre, que perdurará ao longo dos anos até que a vida local se reestabeleça ao normal. Ainda, a participação da comunidade científica em um tema delicado e de grande relevância como esse é essencial para que os conceitos, as análises e as ferramentas apresentadas sejam conhecidas e utilizadas pela comunidade, visando sua segurança e bem-estar.

Referências Bibliográficas

AGURTO-DETZEL, H. *et al.* The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 10, p. 4929–4936, 2016.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto, 2004.

ALMEIDA, I. M. DE; JACKSON FILHO, J. M.; VILELA, R. A. DE G. Razões para investigar a dimensão organizacional nas origens da catástrofe industrial da Vale em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de saúde pública**, v. 35, n. 4, p. e00027319, 2019.

ALTAY, N.; GREEN, W. G. OR/MS research in disaster operations management. **European Journal of Operational Research**, v. 175 (1), p. 475–493. 2006.

ANM. **Agência Nacional de Mineração**. Report Mensal Barragens de Mineração. 2021. Disponível em <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/report-mensal-marco-v3.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2021.

ANM. **Agência Nacional de Mineração**. Report Trimestral: Descaracterização de Barragens a Montante. Novembro, 2021. Disponível em <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/nota_tecnica_2021_descaracterizacao-3.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Resolução nº4, de 15 de fevereiro de 2019**. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração [...]. Fevereiro, 2019. Disponível em <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056>. Acesso em: 04 mar. 2022.

ATIF, I.; CAWOOD, F. T.; MAHBOOB, M. A. Modelling and analysis of the Brumadinho tailings disaster using advanced geospatial analytics. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 120, n. 7, p. 405–414, 2020.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUIS, R.P. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, n. 6, p.1104-1102. 2003.

BERTAZZO, T. R.; BRITO JUNIOR, I.; LEIRAS, A.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Revisão da literatura acadêmica brasileira sobre a gestão de operações em desastres naturais com ênfase em logística humanitária. **Transportes**, v. 21, n. 3, p. 31–39,.

BOHN, R. Stop fighting fires. *Harvard Business Review*, 78(4), 82–91. 2000.

BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M. In the dark shadow of the supercycle tailings failure risk and public liability reach all time highs. **Environments**. v. 4, p. 75. 2017.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Política Nacional de Defesa Civil**. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2007. 82p. Disponível em:

<<http://www.defesacivil.gov.br/publicacoes/publicacoes/pndc.asp>>. Acesso em: 08 jun. 2021.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) [...]. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>. Acesso em: 10 set. 2021.

BRASIL. **Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018**. Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, a Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a Lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9406.htm. Acesso: 10 set. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Resolução n. 13, de 08 de agosto de 2019**. Medidas regulatórias para assegurar a estabilidade de barragens de mineração. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 10 set. 2021.

BRASIL. **Política Nacional de Segurança de Barragens**. Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm>. Acesso em :10 de mar de 2022.

CALLENS, S. Valérie November, Les territoires du Risque. Le risque comme objet de réflexion géographique, Berne: Peter Lang, 2002. Développement durable et territoires, **Lectures** (2002-2010). 2002.

CAMBRIDGE, M., SHAW, D., 2019. Preliminary reflections on the failure of the Brumadinho tailings dam in January 2019. **Dams Reserv.** 29, 113–123.

CARDOSO, M. R. B. e T. F. FELTRIN. Planejamento da infraestrutura de transporte urbano visando contingências emergenciais. **Anais do XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Belo Horizonte, 2011.

CARMO, F. F. *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145–151, 2017.

CARMO, F. F.; LANCHOTTI, A. O.; KAMINO, L. H. Y. Mining waste challenges: Environmental risks of gigatons of mud, dust and sediment in megadiverse regions in Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 20, p. 1–13, 2020.

CARVALHO, L. CARRASCO, U. FARINHA, M. BATISTA, S. FERNANDES, J. M. SOUZA, G. LEITÃO, N. Risco, Desastre e Resiliência – Um Desafio para a Cidade da Amadora. **IX Congresso da Geografia Portuguesa**. Universidade de Évora. Évora, 2013.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. Glossário de defesa civil: estudos de riscos e medicina de desastres. **Ministério do Planejamento e Orçamento**, Departamento de Defesa Civil. Brasília, 2007.

CHAN, E. Y. Y. Bottom - up Disaster Resilience. **Nature Geoscience**, vol 6. 2013.

CIAEA. Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Apuração. **Rompimento**

da Barragem 1 da Mina do Córrego do Feijão – Brumadinho, MG. Fevereiro de 2020. Disponível em: http://www.vale.com/PT/investors/Documents/2020_02_20_Relatorio_CIAEA.pdf. Acesso em: 23 nov. 2020.

CICCO, Francesco. **Gestão de Riscos:** Diretrizes para a implementação da ISO 31000:2018. Editora Risk Tecnologia. 2018.

CIF-OIT. Os processos de globalização, descentralização e desenvolvimento local face ao impacto dos desastres no território. **Curso de Redução do Risco de Desastres e Desenvolvimento Local Sustentável.** Unidade Didática 1. Programa Delnet de Apoio ao Desenvolvimento Local. Centro Internacional de Formação da OIT, 2012.

COMFORT, L. K. Risk, Security, and Disaster Management. **Annual Reviews Politic Science.** 8:335-56. 2005.

CPI BRUMADINHO. Comissão Parlamentar de Inquérito. Relatório Final Consolidado. **Rompimento da Barragem de Brumadinho.** Outubro de 2019. Disponível em <<https://www.camara.leg.br/internet/comissoes/cpi/cpibruma/RelatorioFinal.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2020.

CPI ALMG. Comissão Parlamentar de Inquérito da Assembleia Legislativa de Minas Gerais. **Opção pelo Risco:** Causas e Consequências da Tragédia de Brumadinho. Belo Horizonte: Scriptum, 2021. Disponível em: <https://issuu.com/assembleia.mg/docs/brumadinho_interativo>. Acesso em: 03 mar. 2022.

CUNHA, L.; NEGREIROS, F; LEIRAS, A. Análise da Gestão de Riscos Sociais, Ambientais e Desastres das 100 Maiores Empresas Brasileiras. **III Congresso Brasileiro de Redução de Riscos e Desastres.** 2019.

CUNHA, R. E. et al. Influence of Fundão Tailings Dam Breach on Water Quality in the Doce River Watershed. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 583–595, 2020.

DE CARVALHO, D. W. The brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: Analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law. **Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito**, v. 12, n. 2, p. 227–238, 2020.

DROZINO, B.; OLIVEIRA, F. B. R.; SAMED, M. M. A. Proposição de estudos sobre centrais de suporte a desastres naturais na etapa de preparação com base em dados do estado do Paraná. **VII Simpósio Maringaense de Engenharia de Produção.** 2014.

EDUVIRGEM, R. V.; SOARES, C. R.; BEIER, E. V. Normalized difference vegetation index analysis of the first part impacted with the breaking of the Fundão Dam in Mariana-MG. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 24, p. e27, 2020.

ERSOY, B.; HASELSTEINER, R. **The seepage analysis of the embankment dams of flood retention basin in Poland.** 26th International Commission on Large Dams Congress. pp. 1635-1646. Austria, 2018.

ESPINDOLA, H. S.; NODARI, E. S.; DOS SANTOS, M. A. Rio Doce: Risks and uncertainties of the Mariana Disaster (MG). **Revista Brasileira de História**, v. 39, n. 81, p. 141–162, 2019.

ESPIRITO-SANTO, C. M.; SZLAFSZTEIN, C. F. Gestão de risco de desastres em planos diretores de três municípios da zona costeira do estado do Pará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management**, vol. 16, n. 2, pp. 223-230, 2016.

FIUZA, S. N., VIANNA, D. S. e VIANNA, M. F. D. Root Cause Analysis: A conceptual and methodological approach. **Interdisciplinary Scientific Journal**. N. 2, v. 7, article 04, 2020.

FLICK, U. **Introdução à pesquisa qualitativa**. Artmed Editora S.A. v. 3, p. 14. São Paulo, 2009.

GAMA, F. F. *et al.* Deformations prior to the Brumadinho dam collapse revealed by sentinel-1 insar data using sbas and psi techniques. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 1–22, 2020.

GODOY, A. S. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **Revista de Administração de Empresas**. São Paulo, v. 35, n.3, p, 20-29. 1995.

GOUGH, D., Oliver, S., & Thomas, J. **An introduction to systematic reviews**. Los Angeles, CA: Sage. 2012.

GUANG-JIN, W. *et al.* Study on tailings dam over-topping failure model test and break mechanism under the rainfall condition. **Tehnicki vjesnik - Technical Gazette**, v. 24, n. 6, p. 1897–1904, 2017.

GUEVARA, Y. Z. C. *et al.* Reference values of soil quality for the Rio Doce Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1–16, 2018.

HU, J.; LIU, X. Design and implementation of tailings dam security monitoring system. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 1914–1921, 2011.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R.V.; SCHRÖDER, P.H.; GRANDO, Â.; REGINATTO, G.M.P. Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais. In: **Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais**, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 834-846 (CDROM).

KOMLJENOVIC, D. *et al.* A resilience-based approach in managing the closure and abandonment of large mine tailing ponds. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 30, n. 5, p. 737–746, 2020.

KOSSOFF, D., DUBLIN, W.E., ALFREDSSON, M., EDWARDS, S.J., MACKLIN, M.G., HUDSON-EDWARDS, K.A., 2014. Mine tailing dams: characteristics, failure, environmental impacts and remediation. **Applied Geochemistry**. 51, 229–245.

LACAZ, F. A. C., PORTO, M. F. S., PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista brasileira de saúde ocupacional**, v. 42, 2017.

LAPOLLI, A. V. **O plano diretor e o plano de gerenciamento de enchentes do município de Rio do Sul – SC: a construção de um território seguro?** Dissertação de Mestrado profissional em planejamento territorial e desenvolvimento socioambiental da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Florianópolis, 2013.

LAVELL, A. Programa Regional para la Gestión del Riesgo em América Central. CEPREDENAC – PNUD. 2003.

LEIRAS, A., YOSHIZAKI, H. T. Y., SAMED, M. M. A., GONÇALVES, M. B. **Logística Humanitária**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

LOPES, I. T. P. **Gestão de riscos de desastres: integrando os riscos de acidentes industriais à gestão territorial**. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, 2017.

LOUSADA, G.; FARIAS, H. Desastres ambientais, prevenção e mitigação: um estudo de caso da região de Angra dos Reis/RJ. **Revista Continentes (UFRRJ)**, ano 3, n. 5, p. 131 – 149. 2014.

LUMBROSO, D. *et al.* Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 21–37, 2020.

MARTIN, T.E., MCROBERTS, E.C., 1999. **Some Considerations in the Stability Analysis of Upstream Tailing Dams**. AGRA Earth & Environmental Limited, Canada.

MEI, G. Quantitative assessment method study based on weakness theory of dam failure risks in tailings dam. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 1827–1834, 2011.

MELO, T. L.; GUIMARÃES, L. O. Gestão de riscos e desastres: a atuação das organizações da sociedade civil no contexto do rompimento da barragem da Vale na mina em Córrego do Feijão. **Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente da FEA/USP** – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. 23ª edição. São Paulo, 2021.

MENDES, L. O. **Análise probabilística do potencial de falha por liquefação estática e dinâmica de barragens**. Dissertação. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2019.

MOURA, Eduardo H. de. **Integration of Humanitarian Logistics Practices, Disaster Management and Disaster Mutual Assistance**. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering) – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

MOURA, H. E.; ROCHA E CRUZ, B. T.; CHIROLI, D. M. G. A framework proposal to integrate humanitarian logistics practices, disaster management and disaster mutual assistance: A Brazilian case. **Safety Science**, v. 132, n. January, p. 104965, 2020.

MURA, J. C. *et al.* Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in Germano iron mining area after the collapse of the tailings dam of fundão (Mariana-MG, Brazil) using DInSAR techniques with terraSAR-X data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1–21, 2018.

NARVÁEZ, L.; LAVELL, A.; ORTEGA, G. P. **La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos**. Secretaría General de la Comunidad Andina. Biblioteca Nacional del Perú, v. 1, n. 2009-10975. Perú, 2009.

NIMBALKAR, S.; ANNAPAREDDY, V. S. R.; PAIN, A. A simplified approach to assess

seismic stability of tailings dams. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 1082–1090, 2018.

NUGROHO, A., MAULANA H., FACHRUDDIN F., ARIYATI N., KURMOAWAN D. Scenario based logistic capacity assessment for disaster preparedness. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2019.

OLIVEIRA, T. R. *et al.* Metodologia Para Análise De Danos Ambientais Do Rompimento da Barragem De Fundão Em Bento Rodrigues (Mg). **Holos**, v. 7, p. 1–17, 2019.

OLIVEIRA, M. Livro Texto do Projeto Gerenciamento de Desastres - Sistema de Comando de Operações. Florianópolis: Ministério da Integração Nacional, **Secretaria Nacional de Defesa Civil**, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, 2009.

OWEN, J. R. *et al.* Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 42, 2020.

PEIXOTO, C.L.P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Ouro Preto, 2012.

PERES, E. Q., I. BRITO JR., A. LEIRAS e H. YOSHIZAKI. Literature review in humanitarian logistics and disaster relief operations research. **Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain**. Creative logistic for an un-certain world ILS. Quebec (Canada). 2012.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic reviews in the social sciences: A practical guide**. Malden, MA: Blackwell. 2006.

PORSANI, J. L.; DE JESUS, F. A. N.; STANGARI, M. C. GPR survey on an iron mining area after the collapse of the tailings Dam I at the Córrego do Feijão mine in Brumadinho-MG, Brazil. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 1–13, 2019.

RICHARD, E. DA C. *et al.* Water and Sediment Quality in the Coastal Zone Around the Mouth of Doce River After the Fundão Tailings Dam Failure. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 643–654, 2020.

ROBERTSON, P, K. *et al.* **Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão**. 2019. Disponível em <<http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/>>. Acesso em: 03 de abr. 2021.

ROCHA, O. J. **O plano de ação de emergência como ferramenta para redução dos riscos de desastres provocados por rupturas de barragens e sua relação com os planos de contingência da defesa civil**. Dissertação. Universidade Federal Fluminense. Programa de Pós-Graduação em Defesa e Segurança Civil. Rio de Janeiro, 2017.

RODRIGUES, K. F.; CARPES, M. M.; RAFFAGNATO, C. G. Preparação e resposta a desastres do Brasil na pandemia da Covid-19. **Revista de Administração Pública**, v. 54, n. 4. julho - agosto, 2020.

ROONEY, J. J.; HEUVEL, L. N. V. Root Cause Analysis For Beginners. **Quality Progress**,

2004.

ROTTKEMPER, B.; FISCHER, K.; BLECKEN, A.; DANNE, C. **Inventory relocation for overlapping disaster settings in humanitarian operations**. *OR Spectrum*, 33 (3), 721-749. 2011.

SAMED, M. M. A.; GONÇALVES, M. B. Introdução à Logística Humanitária. In: LEIRAS, Adriana et al. (Org.). **Logística Humanitária**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, cap. 3, p. 27-38. 2017.

SARMIENTO, J. **Gestión del riesgo ante la variabilidad y cambio climático**. In: Aldunce, P.; Neri, C.; Szlafsztein, C. (orgs.), *Hacia la evaluación de prácticas de adaptación ante la variabilidad y el cambio climático*, p. 31-42, NUMA/UFPA, Belém, Pará, Brasil, 2008.

SALVADOR, G. N. *et al.* Mining activity in Brazil and negligence in action. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 18, n. 2, p. 139–144, 2020.

SCAPIN, C. A. **Análise sistêmica de falhas** (2o ed). São Paulo: Editora Falconi. 2013.

SCHNAID, F.; F.S. DE MELLO, L. G. Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams. **Soils and Rocks**, v. 43, n. 3, p. 369–395, 2020.

SEDEC. **Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil**. Departamento de Minimização de Desastres. Resposta: gestão de desastres, decretação e reconhecimento federal e gestão de recursos federais em proteção em defesa civil para resposta. Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, Departamento de Minimização de Desastres. Brasília, 2017.

SEGUR (Seção de Saúde e Segurança do Trabalhador). **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho - Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019**. 2019. Disponível em <https://sinait.org.br/docs/305346580-relatorio_bi_-_a_corpo_assinado.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2021.

SILVA, M. F. Análise espacial dos impactos socioambientais provocados pelo rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração: Fundão, na cidade de Mariana e Córrego do Feijão, no município de Brumadinho. **Territorium**, v. 28 (I), p. 67-92, 2020.

SILVA ROTTA, L. H. *et al.* 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**, v. 90, n. April, p. 102119, 2020.

SMITH, R. E. W.; VAL, A. L. Understanding the Science Surrounding Environmental Consequences and Rehabilitation Actions Stemming from Brazil's Fundão Tailing Dam Rupture. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 569–571, 2020.

SOARES, L. **Tratamento de Minérios**. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, v. 5, cap. 19, pg. 849 – 852. Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, T. C. **Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento

de Geotecnia. Belo Horizonte, 2018.

SPEZIA, T. S. **Governança da segurança nacional das barragens de rejeitos de mineração e uma análise do maior acordo ambiental brasileiro**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Departamento de Direito, 2021. Disponível em https://www.pucrs.br/direito/wp-content/uploads/sites/11/2021/01/tainara_spezia.pdf. Acesso em: 10 set. 2021.

THOMÉ, R.; LAGO, T. M. O. Barragens de rejeitos da mineração: o princípio da prevenção e a implementação de novas alternativas. **Revista dos Tribunais**, São Paulo, vol. 85/2017, p. 17-39, jan/mar. 2017.

TOLEDO, L. A.; SHIAISHI, G. F. Estudo de caso em pesquisas exploratórias qualitativas: um ensaio para a proposta de protocolo do estudo de caso. **Revista FAE**, Curitiba, v.12, n.1, p.103-119, jan/jun. 2009.

TRAJBER, R.; OLIVATO, D.; MARCHEZINE, V. **Conceitos e termos para a gestão de riscos de desastres na educação**. CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, 2017. Disponível em <http://educacao.cemaden.gov.br/site/mediaLibrary/MTAwMDAwMDAwMTg=%20>. Acesso em 10 mar. 2022.

TRENNEPOHL, Curt; Terence; Natacha. **Infrações ambientais: comentários ao Decreto 6.514/2008**. 3 ed. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2019.

UNISDR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Risk and poverty in a changing climate**. Geneva, Switzerland: UNISDR, 2009.

UNISDR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Making Cities Resilient Report 2012**. Disponível em https://www.unisdr.org/files/28240_rcreport.pdf. Acesso em: 12 mar. 2022.

VALE S.A. **Acordo sela compromisso da Vale com reparação integral de Brumadinho e apoio ao desenvolvimento do Estado de Minas Gerais**. 2021. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Acordo-sela-compromisso-da-Vale-com-reparacao-integral-de-Brumadinho-e-apoio-ao-desenvolvimento-do-Estado-de-Minas-Gerais.aspx>

VALE S.A. **Reparação e Desenvolvimento**. 2021. Disponível em http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/listas-atualizadas.aspx

VALÊNCIO, N. Desastres, Ordem Social e Planejamento em Defesa Civil: o contexto brasileiro. **Saúde e Sociedade**, v. 19, n. 4, p. 748–762. 2010.

VAZQUEZ, F. G. **Alertas de desastres socioambientais no Estado de Santa Catarina sob a perspectiva da Ciência da Informação**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Informação. Florianópolis, 2018.

VERGILIO, C. DOS S. *et al.* Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, v. 10,

n. 1, p. 1–12, 2020.

VEYRET, Y. **Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente**. Contexto, São Paulo. 2007.

VIEIRA, K. I. C. *et al.* Bees and the Environmental Impact of the Rupture of the Fundão Dam. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 631–635, 2020.

WISEU, Maria Teresa. **Segurança dos Vales a Jusante de Barragens – Metodologia de Apoio à Gestão do Risco**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Laboratório Nacional em Engenharia Civil, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2008. 420p.

WEBSTER, J.; WATSON, J. T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. **MIS Quarterly & The Society for Information Management**, v.26, n.2, p.13-23, 2002.

YANG, J. *et al.* A CNN-LSTM Model for Tailings Dam Risk Prediction. **IEEE Access**, v. 8, p. 206491–206502, 2020a.

YANG, Y.; SUN, W.; LI, S. Tailings dam stability analysis of the process of recovery. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 1782–1787, 2011.

YI, W.; ÖZDAMAR, L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. **European Journal of Operational Research**, 179 (3), 1177-1193. 2007.

YIN R. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2a ed. Porto Alegre: Bookman; 2001.

ZHENG, X.; XU, X.; XU, K. Study on the risk assessment of the tailings dam break. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 2261–2269, 2011.