

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA TECNOLOGIA DE
SERGIPE**

**CAMPUS ARACAJU
GRADUAÇÃO DE ENSINO
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

MOISÉS DAS DORES COSTA NASCIMENTO

**BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ACIDENTES E
INCIDENTES REGISTRADOS NOS RELATÓRIOS DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS (RSB's)**

MONOGRAFIA

ARACAJU/SE

2023

MOISÉS DAS DORES COSTA NASCIMENTO

**BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS
ACIDENTES E INCIDENTES REGISTRADOS NOS RELATÓRIOS
DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (RSB's)**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Sergipe - Campus Aracaju.

Orientadora: Professora M.Sc. Andrea Santana Teixeira Lins.

ARACAJU/SE

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nascimento, Moisés Das Dores Costa.

N244b Barragem de rejeitos: análise estatística dos acidentes e incidentes registrados nos relatórios de segurança de barragens (RSB's). / Moisés Das Dores Costa Nascimento. – Aracaju, 2023.

90 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Ma. Andrea Santana Teixeira Lins. Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1. Análise estatística. 2. Barragem de rejeitos. 3. Acidente. 4. Incidente. I. Lins, Andrea Santana Teixeira. II. Título.

CDU 627.8

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia N° 262

**BARRAGEM DE REJEITOS : ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ACIDENTES E
INCIDENTES REGISTRADOS NOS RELATÓRIOS DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS (RSB's)**

MOISÉS DAS DORES COSTA NASCIMENTO

Esta monografia foi apresentada às 09h 13 do dia 19 de JULHO de 2023 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. M.Sc. Louise Francisca Sampaio
Brandão

(IFS – Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Zacarias Caetano Vieira

(IFS – Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Andréa Santana Teixeira Lins
(IFS – Campus Aracaju)
Orientadora


Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

AGRADECIMENTOS

Ao refletir sobre esses anos de graduação, muitas pessoas vêm à mente, pois elas desempenharam um papel fundamental para que eu alcançasse esse momento. Enquanto expresso essas palavras neste parágrafo, inúmeras pessoas passam pela minha mente, e infelizmente, sei que não poderei mencionar todas individualmente. No entanto, se você esteve ao meu lado nos últimos anos, saiba que sou grato por sua presença e contribuição.

Agradeço, primeiramente, à Deus, por ter me capacitado e me abençoado ao longo de todos os dias da minha vida. Cada desafio, se venci, foi com sua ajuda. Sua companhia e sua misericórdia me fizeram tornar uma pessoa mais forte, capaz de superar mais esta etapa da minha vida.

A minha família, em especial a minha mãe, Maria, minha tia Luzinete, meus irmãos Jhênifa e Jeolanderson, meu cunhado Wandson e meu sobrinho Clevertton, que estiveram comigo desde o início da minha caminhada e que sempre acreditaram em mim. Também agradeço as minhas irmãs Manoela e Maricarla, que sempre me deram todo apoio.

Agradeço também minha professora e orientadora M.Sc. Andrea Santana Teixeira Lins, pelo cuidado, sabedoria e dedicação que foram essenciais durante a construção desta trajetória, por todos os momentos convividos. Suas orientações foram de fundamental importância para a conclusão deste trabalho. Sempre se mostrou solícita quando precisei.

Agradeço todos os meus colegas da graduação, em especial a Isabela, Saulo, Bruno, Emerson (Hombrito), que sempre me ajudaram com vocês tudo se tornou menos difícil. Desejo a cada um, muito sucesso e muitas conquistas. Agradeço a todos aqueles que contribuíram de algum modo para a realização desta pesquisa.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”

(ALBERT EINSTEIN).

RESUMO

NASCIMENTO, Moisés das Dores Costa. **BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ACIDENTES E INCIDENTES REGISTRADOS NOS RELATÓRIOS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (RSB's)**. 91 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - Campus Aracaju. 2023.

Resumo: As barragens de rejeitos são estruturas que têm a finalidade de reter os resíduos sólidos e a água provenientes dos processos de beneficiamento de minério. Por isso, estas obras são estruturas complexas e apresentam elevado risco de sofrerem acidentes com grande impacto socioambiental, sendo extremamente importante garantir a sua segurança. Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise estatística dos acidentes e incidentes ocorridos em barragens de rejeitos entre os anos de 2011 e 2022, realizando uma pesquisa quali-quantitativa dos dados publicados nos Relatórios de Segurança de Barragens (RSB's) pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) durante esses onze anos. Buscou-se analisar também os principais tipos de anomalias, bem como suas causas, que acometeram essas obras acarretando a ocorrência dessas anormalidades. Desta forma, verificou-se que ocorreram quatro acidentes, sendo três de grande proporção, e vinte e quatro incidentes em barragens de rejeitos durante esses anos. Constatou-se que a erosão interna (piping) é uma das principais anomalias que provocam os acidentes (25%) e os incidentes (8,33%) neste tipo de obra, desencadeando o rompimento do talude de jusante da barragem e/ou recalques no corpo da barragem. Por outro lado, em 83,33% dos incidentes registrados não foi mencionado o tipo de anomalia que gerou esse evento. Verificou-se também que, apesar ser de suma relevância quando da ocorrência de acidentes e/ou incidentes em barragens de rejeitos, o Plano de Ação de Emergência (PAE) das barragens só foi acionado em 25% dos casos de acidentes e em 37,5% para os casos de incidentes registrados pela ANA. É importante destacar que durante a coleta dos dados nos relatórios da ANA foi evidenciada a falta de informações e padronização no relato dos eventos. Por fim, conclui-se que analisar estatisticamente os acidentes e incidentes em barragens de rejeitos é fundamental para promover melhorias das ações preventivas e corretivas para mitigar os seus efeitos, bem como aprimorar as políticas e regulamentações de segurança para essas obras.

Palavras-chave: Análise estatística. Barragens de rejeitos. Acidentes. Incidentes.

ABSTRACT

Abstract: Tailings dams are structures whose purpose is to retain solid waste and water from ore processing processes. Therefore, these works are complex structures and present a high risk of suffering accidents with great socio-environmental impact, and it is extremely important to guarantee their safety. This work aimed to carry out a statistical analysis of accidents and incidents that occurred in tailings dams between the years 2011 and 2022, carrying out a qualitative and quantitative research of the data published in the Dam Safety Reports (RSB's) by the National Water Agency and Basic Sanitation (ANA) during these eleven years. We also sought to analyze the main types of anomalies, as well as their causes, which affected these works, leading to the occurrence of these abnormalities. In this way, four accidents occurred, three of which were large, and twenty-four incidents occurred in tailings dams during these years. It was found that the internal (piping) is one of the main anomalies that cause accidents (25%) and incidents (8.33%) in this type of work, triggering the disruption of the downstream slope of the dam and/or settlements in the dam body. On the other hand, in 83.33% of the registered incidents, the type of anomaly that generated this event was not mentioned. It was also verified that, despite being extremely familiar when accidents and/or incidents occur in tailings dams, the Emergency Action Plan (EAP) of the dams was only activated in 25% of the accidents and in 37.5% for cases of incidents registered by the ANA. It is important to highlight that during the data collection in the ANA report, the lack of information and standardization in the reporting of events was evidenced. Finally, it is concluded that statistically analyzing accidents and incidents in tailings dams is essential to promote improvements in preventive and corrective actions to mitigate their effects, as well as safety policies and regulations for these improved works.

Keywords: Statistical analysis. Tailings dams. Accidents. Incidents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte esquemático do método de alteamento à montante	19
Figura 2 - Corte esquemático do método de alteamento à jusante	20
Figura 3 - Corte esquemático do método de alteamento de linha central	21
Figura 4 - Remoção e destinação dos rejeitos	21
Figura 5 - Recuperação ambiental	22
Figura 6 - Remoção dos diques de rejeitos	22
Figura 7 - Recuperação ambiental adequada	23
Figura 8 - Conjunto estável - Esforço concentrado na fundação da barragem	24
Figura 9 - Colapso do solo natural e parte da barragem	25
Figura 10 - Formação da superfície de escorregamento	26
Figura 11 - Início do escorregamento - Surgimento da lama (material colapsado)	27
Figura 12 - Início do escorregamento - Abaixo da crista da barragem	28
Figura 13 - Rompimento dos rejeitos - Segundo estrondo	29
Figura 14 - Liquefação dos rejeitos	30
Figura 15 - Inundação - Ondas de lama e rejeitos invadem partes à jusante	30
Figura 16 - Processo de ruptura em barragem por erosão interna (piping)	39
Figura 17 - Processo de liquefação em barragens de rejeitos	40
Figura 18 - Processo de ruptura por deslizamento	40
Figura 19 - Distribuição das barragens cadastradas no SIGBM	44
Figura 20 - Fases da ruptura da Mina de Fernandinho	56
Figura 21 - Vista aérea da barragem de rejeitos da mineração Rio Verde após a ruptura	59
Figura 22 - Lançamento pelo vertedor da lama no Córrego Bom Jardim	60
Figura 23 - Vista da barragem de rejeitos após a ruptura	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de acidentes envolvendo barragens de rejeitos	46
Gráfico 2 - Altura das barragens de rejeitos que sofreram ruptura	47
Gráfico 3 - Número de vítimas geradas pelos acidentes	48
Gráfico 4 - Número de mortes geradas pelos acidentes	50
Gráfico 5 - Número de vítimas e mortes	50
Gráfico 6 - Acionamento do Plano de Ação de Emergência (PAE)	51
Gráfico 7 - Prejuízos financeiros causados	52
Gráfico 8 - Número de incidentes	63
Gráfico 9 - Tipos de anomalias	64
Gráfico 10 - Local das anomalias	66
Gráfico 11 - Acionamento do Plano de Ação de Emergência (PAE)	67
Gráfico 12 - Causas dos incidentes	69
Gráfico 13 - Órgãos fiscalizadores	72
Gráfico 14 - Comparativo entre acidentes e incidentes	74

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos	36
--	-----------

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Altura da barragem	47
Quadro 2 - Anomalias encontradas nas barragens	53
Quadro 3 - Causa e método de detecção do evento	55
Quadro 4 - Acidentes em barragens de rejeitos ocorridos antes de 2011	55
Quadro 5 - Tipos de anomalias	63
Quadro 6 - Local das anomalias	66
Quadro 7 - Acionamento do PAE	67
Quadro 8 - Causas dos incidentes	68
Quadro 9 - Empreendedores das barragens de rejeitos	70
Quadro 10 - Órgãos fiscalizadores	71

LISTA DE ABREVIATURAS

- **hm³ - Hectômetros cúbicos**
- **MG - Minas Gerais**
- **m - Metro**
- **m³ - Metros cúbicos**
- **Nº - Número**

LISTA DE SIGLAS

- **COOPERSANTA - Cooperativa dos Garimpeiros de Santa Cruz**
- **CRI - Categoria de Risco**
- **DPA - Dano Potencial Associado**
- **NPGB - Nível de Perigo Global da Barragem**
- **PAE - Plano de Ação de Emergência**
- **PSB - Plano de Segurança de Barragens**
- **RSB - Relatório de Segurança de Barragens**

LISTA DE ACRÔNIMOS

- **ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**
- **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica**
- **ANM - Agência Nacional de Mineração**
- **CETEM - Centro de Tecnologia Mineral**
- **DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral**
- **FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente**
- **IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração**
- **PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens**
- **SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração**
- **SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens**

LISTA DE SÍMBOLOS

- **% - Porcentagem**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 PRINCIPAL	17
2.2 SECUNDÁRIOS	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1 ASPECTOS GERAIS	18
3.2 TIPOS DE BARRAGENS DE REJEITOS	18
3.2.1 Barragem à Montante	18
3.2.2 Barragem à Jusante	20
3.2.3 Barragem de Linha Central	20
3.3 DESCOMISSIONAMENTO, DESCARACTERIZAÇÃO E DESATIVAÇÃO DE BARRAGEM DE REJEITOS	21
3.3.1 Descomissionamento	21
3.3.2 Descaracterização	22
3.3.3 Desativação	23
3.4 ETAPAS DE RUPTURA DE BARRAGEM DE REJEITOS	23
3.4.1 Primeira Fase	24
3.4.2 Segunda Fase	24
3.4.3 Terceira Fase	25
3.4.4 Quarta Fase	26
3.4.5 Quinta Fase	27
3.4.6 Sexta Fase	28
3.4.7 Sétima Fase	29
3.4.8 Oitava Fase	30
3.5 PROJETO DE BARRAGENS DE REJEITOS	31
3.6 LEGISLAÇÃO	31
3.6.1 Plano de Segurança de Barragem (PSB)	32
3.6.2 Classificação de acordo com a Categoria de Risco (CRI)	33
3.6.3 Classificação de acordo com o Dano Potencial Associado (DPA)	33
3.6.4 Classificação de acordo com o Nível de Perigo Global da Barragem (NPGB)	34
3.7 INSPEÇÃO EM BARRAGENS DE REJEITOS	34

3.8 INCIDENTE E ACIDENTE	35
3.9 SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS (SNISB)	36
3.10 RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (RSB)	37
3.11 SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS	37
3.12 EROÇÃO INTERNA OU INFILTRAÇÃO (PIPING)	38
3.13 TIPOS DE RUPTURAS EM BARRAGENS	39
4 METODOLOGIA	42
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLHA DO MODO DE PESQUISA	42
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ACIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS	43
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS INCIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS	43
4.4 SITUAÇÃO DE BARRAGENS CADASTRADAS NO SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO (SIGBM)	44
4.4.1 Critérios Estabelecidos pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)	45
5 RESULTADOS	46
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ACIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS SEGUNDO OS RSB's	46
5.1.1 Número de acidentes e vítimas	46
5.1.2 Número de mortes	49
5.1.3 Plano de Ação de Emergência (PAE)	51
5.1.4 Prejuízos causados	52
5.1.5 Locais e tipos de anomalias	53
5.1.6 Causa e método de detecção	54
5.1.7 Acidentes em barragens de rejeitos ocorridos no Brasil antes de 2011	55
5.1.7.1 Itaminas - Mina de Fernandinho (1986)	55
5.1.7.2 Mineração Rio Verde - Cava C1 (2001)	57
5.1.7.3 Rio Pomba Cataguases - São Francisco (2006 - 2007)	60
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS INCIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS SEGUNDO OS RSB's	62
5.2.1 Número de incidentes	62
5.2.2 Tipos de anomalias	63
5.2.3 Local das anomalias	65

5.2.4 Plano de Ação de Emergência (PAE)	66
5.2.5 Causa dos incidentes	68
5.2.6 Empreendedor / Fiscalizador	69
5.2.7 Comparativo dos acidentes e incidentes	73
6 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE A	84
APÊNDICE B	87

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a economia do Brasil sempre esteve estreitamente ligada à extração mineral. Dentre os vários fatores relevantes, a mineração destaca-se como um dos setores fundamentais da economia nacional. Em particular, em Minas Gerais, essa relação é ainda mais profunda. O estado é considerado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) como o mais crucial para o setor, representando 53% da produção do país. Segundo Ferreira (2015), Minas Gerais abriga quarenta das cem maiores minas do Brasil em seu território.

A existência da mineração em Minas Gerais é notória, evidente na paisagem, no nome e na própria história do estado, onde a atividade mineradora está presente em quase metade dos municípios mineiros, cerca de quatrocentos (400). No entanto, como ocorre com toda exploração de recursos naturais, a atividade de mineração gera impactos significativos no meio ambiente, tanto no que se refere à exploração de áreas naturais quanto na geração de resíduos (SILVA, 2007).

Sabe-se que os resíduos produzidos em quantidade cada vez maior prejudicam o meio ambiente qualitativa e quantitativamente, causando crescente preocupação às mineradoras, que por sua vez tentam minimizar o impacto ambiental, bem como os custos associados à produção dos resíduos, buscando novas formas seguras de armazenamento e descarte (RESENDE, 2013).

Os resíduos resultantes das atividades de mineração consistem em partículas finas e ultrafinas de minérios, oriundos do processo de extração dos recursos minerais, que juntas formam uma grande quantidade de resíduos “ricos” em metais pesados, comumente armazenados em barragens de rejeitos, ou também chamadas de barragens de contenção de resíduos de mineração.

Com o objetivo de regular e orientar o processo de monitoramento de barragens, a Lei Nº 12.334/2010 foi editada e alterada pela Lei Nº 14.066/2020, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e instituiu o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), cujo objetivo principal é gerar conscientização e maior atenção para o monitoramento e segurança de barragens, bem como para o enfrentamento de acidentes e desastres.

A redação da lei possui dois parâmetros utilizados para classificar as barragens: o primeiro refere-se ao risco, que pode ser alto, médio ou baixo, e leva em consideração fatores como o estado de proteção da estrutura da barragem e o tempo em que foi

construída. E, o segundo, refere-se ao dano potencial associado, que considera principalmente a perda de vidas, danos e impactos sociais, ambientais e econômicos de um possível rompimento de barragem.

Além disso, o acidente na barragem de rejeitos na cidade de Mariana (MG), em 11 de maio de 2015 com o rompimento da barragem de Fundão da Samarco, e outros acidentes em barragens deste tipo no estado de Minas Gerais colocaram as mineradoras fortemente responsáveis pela segurança e eficiência de suas estruturas. Vale ressaltar que mesmo com esses acidentes, as atividades de mineração são em todas as circunstâncias críticas para a sociedade e devem ser operadas de forma planejada com as devidas inspeções de suas instalações.

Assim, é de extrema importância a segurança e o monitoramento das barragens de rejeitos que podem causar sérios problemas se não forem bem planejadas, operadas e mantidas com controles rígidos. A falta de fiscalização efetiva e controle rígido pode levar a tragédias como a que ocorreu tanto em Mariana e, mais recentemente, em Brumadinho no dia 25 de janeiro de 2019, onde a barragem de rejeitos da Mina do Córrego do Feijão, da Vale S.A, rompeu deixando dezenas de mortos e centenas de desaparecidos. Além desse terrível impacto socioeconômico, há um impacto imensurável sobre o meio ambiente. Um estudo realizado pela Agência Nacional de Mineração (ANM) em 2019 apontou que cerca de 50% das barragens de rejeitos no Brasil apresentam algum tipo de problema. Isso evidencia a importância de se investir em segurança para evitar desastres ambientais e perdas de vidas humanas (ANM, 2019).

Diante dessas considerações, é importante analisar a segurança de barragens de rejeitos, bem como o projeto, operação e monitoramento de ocorrências de acidentes e/ou incidentes para entender quais fatores ou falhas levam a ocorrência desses dois eventos. Compreender esses fatores é importante porque esse conhecimento pode ser usado para evitar futuros acidentes e/ou corrigir falhas identificadas.

2 OBJETIVOS

2.1 PRINCIPAL

Realizar uma análise estatística dos acidentes e incidentes ocorridos em barragens de rejeitos com base nos RSB's (Relatórios de Segurança de Barragens) entre os anos de 2011 e 2022.

2.2 SECUNDÁRIOS

- a) Quantificar e qualificar os acidentes e incidentes ocorridos em barragens de rejeitos entre os anos de 2011 a 2022;
- b) Quantificar o número de vítimas e de mortes geradas pelos acidentes ocorridos em barragens de rejeitos entre os anos de 2011 e 2022 no Brasil;
- c) Avaliar as principais anomalias e causas de acidentes e incidentes ocorridos nas barragens de rejeitos no país nos últimos onze anos;
- d) Avaliar o acionamento do PAE (Plano de Ação de Emergência) nos casos de ocorrência de acidentes e incidentes em barragens de rejeitos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ASPECTOS GERAIS

Barragem de rejeitos é uma estrutura construída para contenção de um material resultante do processo de mineração, ou seja, armazena o que sobra desse processo que não pode mais ser utilizado. Esse material é uma lama, que dependendo da região e do tipo do processo de mineração pode ser composta por partículas mais finas, como no caso das argilas e siltes ou até mesmo por partículas mais grossas, como no caso das areias.

O tipo de material resultante é de extrema importância até porque boa parte das barragens são construídas por esses mesmos materiais, ou seja, o comportamento de material em meio a um contexto estrutural pode ser a diferença entre a estrutura estável e uma estrutura que se rompe com facilidade.

Esses rejeitos são desprezados na área da barragem por gravidade através de canais ou até mesmo bombeados. Uma vez na barragem, passam por um processo de decantação, que é quando as partículas sólidas se separam da água. Isso forma na barragem uma espécie de praia de rejeitos.

3.2 TIPOS DE BARRAGENS DE REJEITOS

Uma barragem de rejeitos de mineração contém um material com alto poder destrutivo que causa danos ambientais irreversíveis e havendo colapso, pode tirar a vida de inúmeras pessoas. Entendendo o que são exatamente os rejeitos de mineração, e como eles são transportados até as barragens, pode-se entender como essas estruturas são construídas e quais os tipos principais de barragens utilizadas atualmente no Brasil.

Existem três tipos de metodologias construtivas de barragens de rejeitos, podendo haver outras variações e modelos compostos por mais de um tipo, os quais são:

- Barragem à montante;
- Barragem à jusante;
- Barragem em linha central.

3.2.1 Barragem à Montante

A construção desse tipo de barragem começa por um processo que vai ser comum para todos os outros tipos que é a base ou também conhecido como dique de partida, também chamado de dique inicial ou dique de começo, que nada mais é do que um aterro

compactado, geralmente composto por rochas para garantir a boa estabilidade e capacidade de carga. Após esse processo é colocado um tapete drenante que vai servir para redirecionar a água represada para dutos de saída para que essa água não gere danos à estrutura principal que é a primeira estrutura de contenção. A Figura 1 ilustra uma barragem de rejeitos à montante.

Figura 1 - Corte esquemático do método de alteamento à montante



Fonte: ANA (2021).

Essa barreira é feita com aterro compactado com um enrocamento que é basicamente uma estrutura feita de pedras. Quando a barragem demanda uma maior capacidade é feito um alteamento. Nesse caso, essa nova estrutura de contenção é construída com o próprio material de rejeito e é levantada à montante da primeira estrutura de contenção, ou seja, para dentro da barragem, acima inclusive dos rejeitos. Esse processo pode ser repetido várias vezes durante a vida útil da barragem sempre que for necessário aumentar a capacidade da barragem.

O processo de barragem à montante é um dos mais comuns pois envolve um baixo custo de execução e uma rapidez significativa, porém dentre os três métodos é o mais instável. Como o alteamento é construído em cima de camadas de rejeitos, os quais podem não estar totalmente estáveis e são estruturas individuais quase sem ligação nenhuma entre si, tornam-se frágeis e muito suscetíveis à ruptura quando perturbadas.

Esse tipo de barragem possui um alto dano potencial associado e elevado risco caso venha ocorrer um colapso na sua estrutura, como verificou-se nas recentes tragédias ocorridas em barragens de rejeitos em dois municípios de Minas Gerais, Brumadinho e Mariana, onde os impactos ambientais, sociais e econômicos foram catastróficos, sem contar nas inúmeras vidas que foram ceifadas.

3.2.2 Barragem à Jusante

Esse é o tipo mais estável e seguro dentre as três metodologias executivas. O processo de fundação e drenagem é exatamente igual, porém, o alteamento da barragem é sempre feito à jusante, ou seja, sempre para o lado externo da barragem, fazendo com que a estrutura cresça proporcionalmente na largura e na altura. A cada alteamento a estrutura ganha uma base maior, aumentando cada vez mais a sua inércia, o que, consequentemente, dá mais estabilidade à barragem (Figura 2).

Figura 2 - Corte esquemático do método de alteamento à jusante



Fonte: ANA (2021).

As desvantagens desse tipo de barragem são o custo e o tempo de execução, visto que a cada alteamento o processo fica cada vez mais difícil e há um crescimento praticamente exponencial no custo e no tempo de execução, sem contar que essa técnica demanda um espaço maior para ser implantado, o que na maioria das vezes pode não ser o problema, mas ainda assim é um ponto negativo crítico, principalmente quando se tem planos a longo prazo para essas barragens.

3.2.3 Barragem de Linha Central

O último tipo de barragem é a barragem de linha central, que basicamente tem o alteamento feito seguindo o mesmo eixo, ou seja, todas as camadas de alteamento são ligadas entre si. Assim como no alteamento à jusante, elas também têm um crescimento da base, o que aumenta a sua estabilidade, apesar de não ser tão estável como no caso anterior. Esta barragem tem custo menor e um tempo de execução também menor se

comparada com a barragem à jusante, além de ocupar áreas menores. Porém, este tipo de barragem não é tão simples assim pois, além da complexidade da execução, necessita de um constante monitoramento (Figura 3).

Figura 3 - Corte esquemático do método de alteamento de linha central



Fonte: ANA (2021).

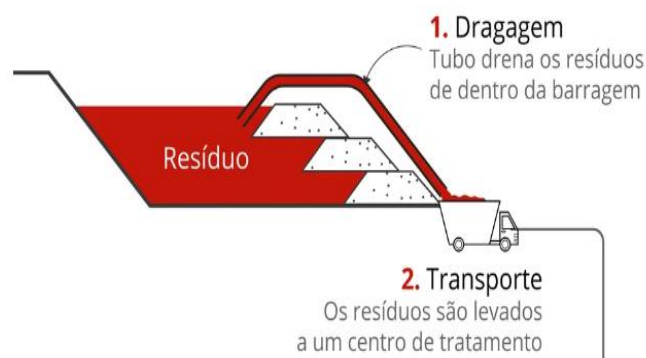
3.3 DESCOMISSIONAMENTO, DESCARACTERIZAÇÃO E DESATIVAÇÃO DE BARRAGEM DE REJEITOS

3.3.1 Descomissionamento

De acordo com a Agência Nacional de Águas - ANA (2020), o processo de descomissionamento de uma barragem de rejeitos envolve várias etapas, conforme descritas a seguir:

- a) Remoção e destinação dos rejeitos e de todas as estruturas que compõem a barragem conforme apresentado na Figura 4. E nos demais itens a seguir.

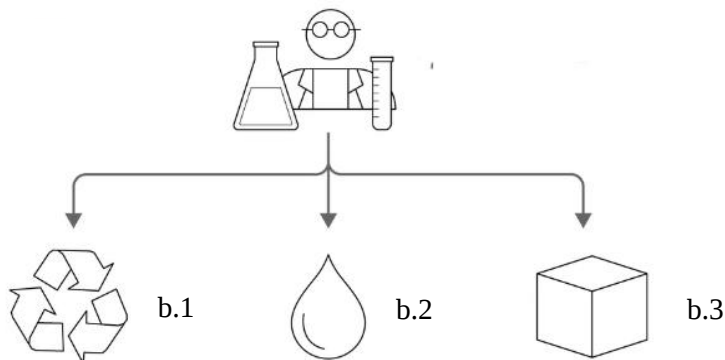
Figura 4 - Remoção e destinação dos rejeitos



Fonte: Modificado G1 (2019).

- b) Execução do plano de recuperação ambiental adequado ao projeto começando pela separação dos resíduos em três partes: (Figura 5).

Figura 5 - Recuperação ambiental



Fonte: Modificado G1 (2019).

- b.1) O que pode ser reaproveitado;
- b.2) Água: Pode ser descartada em outras barragens ou retornar para os rios;
- b.3) Resíduo sólido: Pode ir para outra barragem, encaminhado para um depósito seco ou tapar cavas abertas para a extração de minério.

- c) Remoção dos diques de rejeitos que são removidos de forma adequada e segura (Figura 6).

Figura 6 - Remoção dos diques de rejeitos



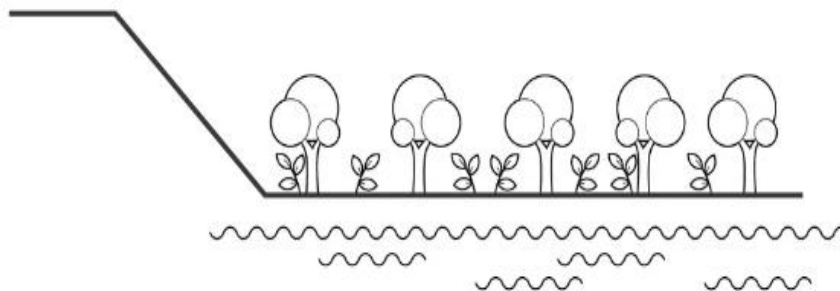
Fonte: Modificado G1 (2019).

3.3.2 Descaracterização

Já o processo de descaracterização de barragens de rejeitos baseia-se nas seguintes etapas:

- a) Plantio de vegetação sobre a estrutura descaracterizada, quando aplicável. A empresa faz um trabalho de recuperação do solo e reflorestamento, se os rios foram desviados, eles são redirecionados ao seu curso natural. (Figura 7).

Figura 7 - Recuperação ambiental adequada



Fonte: Modificado G1 (2019).

- b) Monitoramento contínuo para garantir a efetiva recuperação ambiental.

3.3.3 Desativação

De acordo com a ABNT NBR 13.028:2017, a desativação de barragem de rejeitos é definida como um conjunto de ações e medidas tomadas para encerrar as atividades de uma barragem de forma segura e adequada. Segundo esta norma, a desativação tem o objetivo de prevenir riscos, minimizar impactos ambientais e promover a recuperação da área afetada.

"A desativação consiste no encerramento das atividades de uma área de disposição de resíduos, incluindo a realização de atividades de encerramento, avaliação de riscos, planejamento, execução e monitoramento das ações relacionadas ao fechamento da área." (ABNT NBR 13.028, 2017, p. 3).

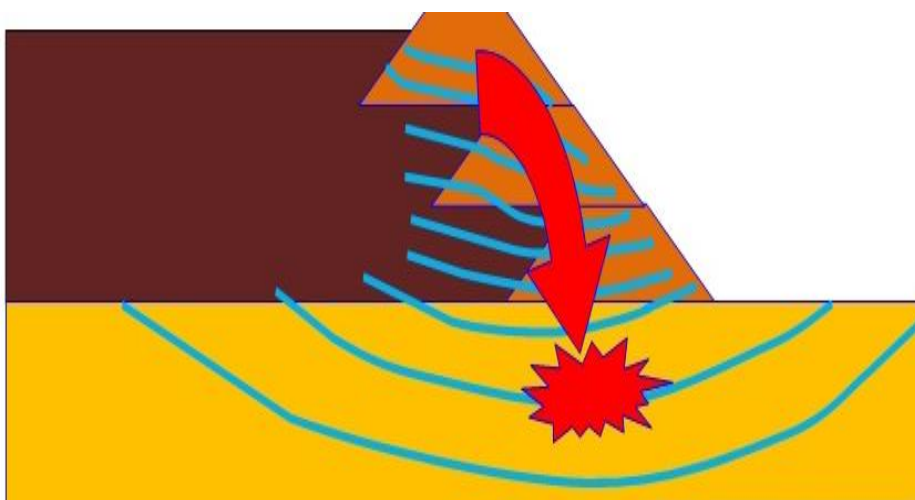
3.4 ETAPAS DE RUPTURA DE BARRAGEM DE REJEITOS

A ruptura de uma barragem de rejeitos ocorre quando sua estrutura falha e não consegue reter de forma adequada os materiais armazenados, resultando na liberação descontrolada dos rejeitos. Embora as etapas precisas da ruptura possam variar dependendo das circunstâncias, é possível descrever algumas fases comuns que podem ocorrer durante esse evento, as quais estão a seguir apresentadas (SMITH, 2021).

3.4.1 Primeira Fase

Um esforço concentrado na fundação ocorre quando uma carga intensa e localizada é aplicada em uma área específica da base da barragem (JONES, 2018). Para assegurar a segurança e estabilidade da barragem de rejeitos, é crucial considerar e avaliar cuidadosamente os efeitos do esforço concentrado na fundação durante o projeto e a construção da estrutura. Estudos geotécnicos abrangentes, análises estruturais adequadas e medidas de projeto apropriadas devem ser empregadas para lidar com o esforço concentrado na fundação, tal como apresenta a Figura 8 (BROWN, 2019).

Figura 8 - Conjunto estável - Esforço concentrado na fundação da barragem



Fonte: Watanabe (2019).

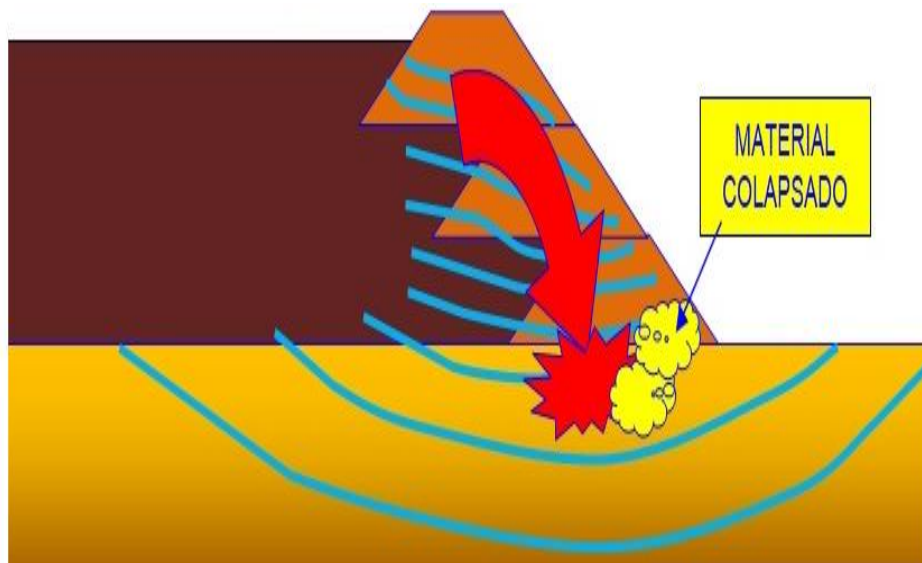
3.4.2 Segunda Fase

O colapso do solo natural e parte da barragem ocorre quando as forças de compressão e cisalhamento atuantes na estrutura excedem sua capacidade de suporte. Segundo Silva et al. (2019), a ocorrência dessas falhas está relacionada à aplicação de cargas excessivas ou desequilibradas sobre o solo ou a estrutura da barragem.

A força de compressão é uma carga que tende a comprimir o solo ou a estrutura, podendo resultar em colapso quando excede a resistência do material. Já a força de cisalhamento atua no sentido de deslizar ou deformar o solo ou a estrutura. Assim, quando essa força ultrapassa a capacidade de resistência, ocorre o colapso (SILVA et al., 2019).

Estudos geotécnicos detalhados e análises de estabilidade são essenciais para avaliar a capacidade de suporte do solo e da estrutura da barragem (SILVA et al., 2019). A implementação de medidas de projeto adequadas, como drenagem eficiente e técnicas de reforço também contribuem para prevenir o colapso (Figura 9).

Figura 9 - Colapso do solo natural e parte da barragem



Fonte: Watanabe (2019).

3.4.3 Terceira Fase

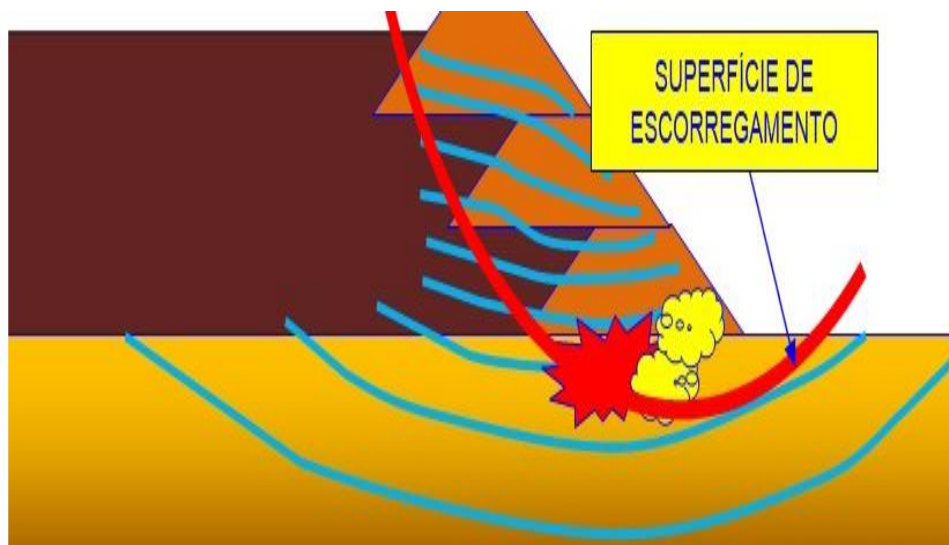
A formação da superfície de escorregamento em barragens de rejeitos é um aspecto crucial a ser considerado na estabilidade dessas estruturas. Estudos realizados por especialistas em engenharia geotécnica, como mencionado por Garcia et al. (2017), apontam que a formação da superfície de escorregamento em barragens de rejeitos pode ser influenciada por diversos fatores, tais como características geológicas e geotécnicas do local, processo de deposição dos rejeitos e variações nas condições de umidade.

As características geológicas do local, como a presença de camadas de solo ou rocha com diferentes propriedades mecânicas, podem desempenhar um papel importante na formação da superfície de escorregamento em barragens de rejeitos (GARCIA et al., 2017). A presença de camadas de solo ou rocha mais fracas ou menos coesas pode facilitar a ocorrência de deslizamentos e a formação da superfície de escorregamento.

Além disso, o processo de deposição dos rejeitos na barragem também pode influenciar na formação da superfície de escorregamento. A compactação adequada dos rejeitos durante a construção da barragem é fundamental para garantir a estabilidade da estrutura e evitar a formação de superfícies de escorregamento (GARCIA et al., 2017).

Variações nas condições de umidade também podem desempenhar um papel significativo na formação da superfície de escorregamento em barragens de rejeitos. Mudanças nas condições de umidade do solo podem afetar sua resistência, tornando-o mais suscetível a deslizamentos e formação de uma superfície de escorregamento, como ilustrado na Figura 10 (GARCIA et al., 2017).

Figura 10 - Formação da superfície de escorregamento



Fonte: Watanabe (2019).

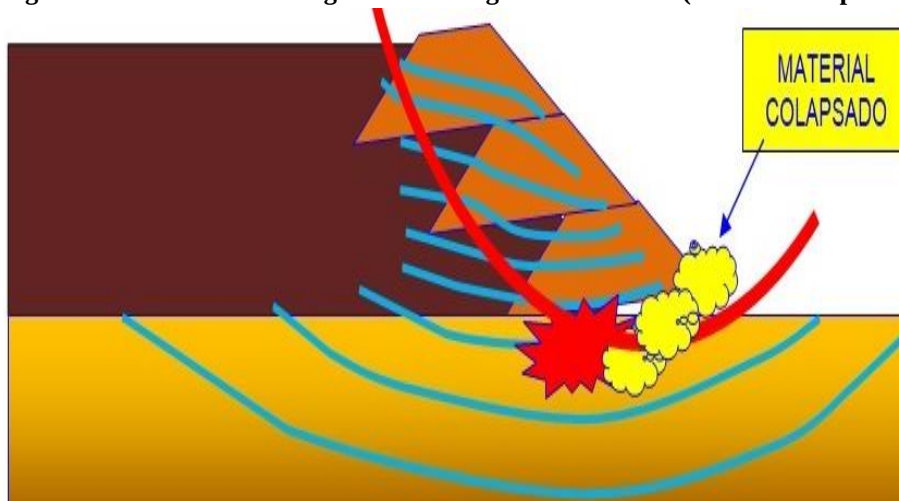
3.4.4 Quarta Fase

O início do escorregamento em barragens de rejeitos pode ser caracterizado pelo surgimento de lama e material colapsado, geralmente acompanhado por estrondos. Segundo Smith et al. (2019), estudos realizados por especialistas em engenharia de barragens destacam que esse estágio inicial do escorregamento pode ser causado por uma série de fatores, como sobrecarga, saturação do material e perda de resistência.

O acúmulo excessivo de rejeitos e sedimentos sobre a barragem pode levar à sobrecarga, aumentando o peso e a pressão sobre o material de fundação e suas camadas internas (SMITH et al., 2019). Esse aumento de carga pode exceder a capacidade de suporte do solo e desencadear o início do escorregamento.

A saturação do material também desempenha um papel importante no início do escorregamento. A presença de água em excesso no solo ou no corpo da barragem pode diminuir a resistência do material, reduzindo sua coesão e aumentando sua porosidade (SMITH et al., 2019). Como resultado, o material pode se tornar mais suscetível a deformações e movimentos de massa, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Início do escorregamento - Surgimento da lama (material colapsado)



Fonte: Watanabe (2019).

É importante ressaltar que o início do escorregamento em barragens de rejeitos é um evento crítico, com potencial para resultar em colapso e liberação descontrolada de rejeitos, representando sérios riscos ambientais e para a segurança humana. Portanto, medidas adequadas de monitoramento e manutenção são essenciais para identificar precocemente os sinais de início do escorregamento e adotar ações corretivas para garantir a estabilidade e segurança das barragens de rejeitos.

3.4.5 Quinta Fase

O início do escorregamento abaixo da crista da barragem é um estágio crítico que pode levar a consequências graves para a estabilidade da estrutura. Essa fase está associada a condições de instabilidade no material de fundação ou nas camadas abaixo da crista da barragem.

Segundo Rinaldi et al. (2014), o início do escorregamento abaixo da crista da barragem pode ser desencadeado por uma série de fatores, incluindo características geotécnicas do solo e da rocha, tensões atuantes, presença de água e variações nas condições de umidade.

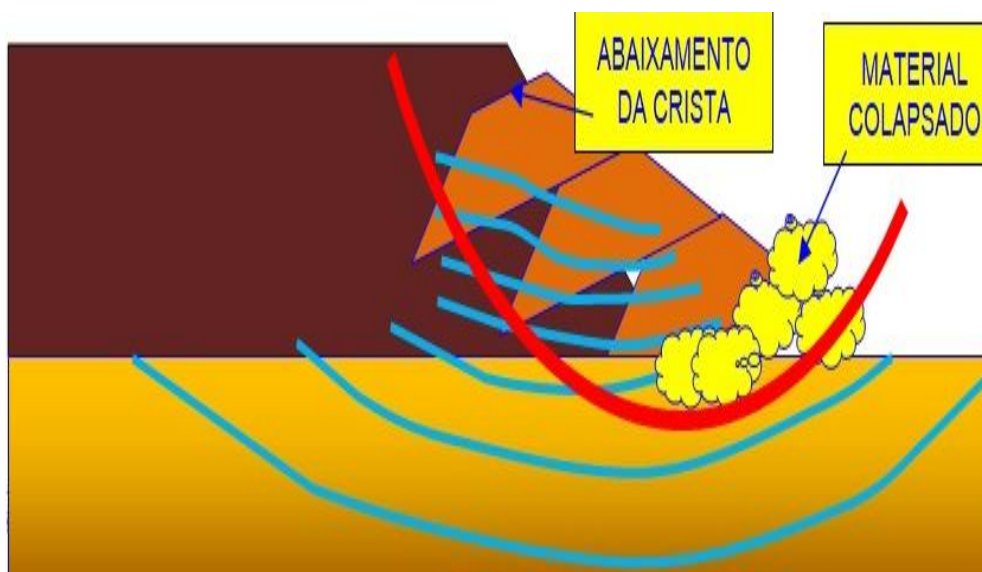
A presença de camadas de solo ou rocha com menor resistência ou menor coesão pode facilitar a formação de superfícies de escorregamento. A aplicação de tensões excessivas, como o carregamento da barragem, pode exceder a resistência do material de fundação, resultando no início do escorregamento.

A presença de água na região da fundação da barragem também desempenha um papel crítico. A infiltração de água pode reduzir a resistência do solo ou da rocha, diminuir

a coesão e aumentar a pressão intersticial, tornando o material mais suscetível a deslizamentos e ao início do escorregamento.

É importante ressaltar que a compreensão dos fatores que contribuem para o início do escorregamento abaixo da crista da barragem é fundamental para o projeto, construção e monitoramento adequados das estruturas de barragens. Estudos geotécnicos abrangentes e análises de estabilidade são essenciais para identificar e mitigar os riscos associados a esse estágio crítico (Figura 12).

Figura 12 - Início do escorregamento - Abaixo da crista da barragem



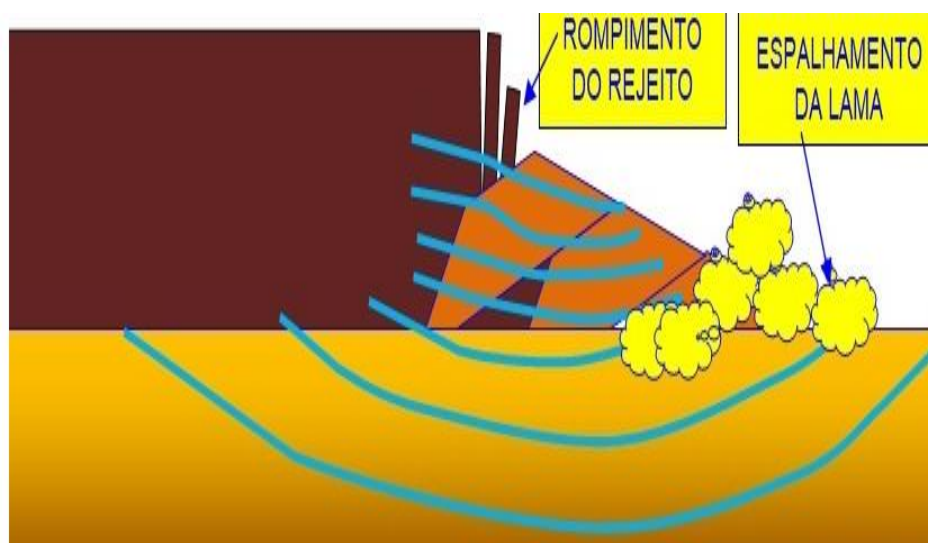
Fonte: Watanabe (2019).

3.4.6 Sexta Fase

Durante o rompimento de uma barragem de rejeitos, o segundo estrondo pode ocorrer como resultado de diferentes fenômenos, como a liberação explosiva de gases acumulados nos rejeitos, a rápida movimentação dos materiais colapsados e o escoamento súbito de grandes volumes de água e lama.

É importante ressaltar que cada caso de rompimento de barragem de rejeitos apresenta características específicas e os fatores que contribuem para o segundo estrondo podem variar. Portanto, é fundamental consultar relatórios técnicos específicos, estudos científicos e investigações sobre acidentes em barragens de rejeitos para obter informações mais precisas e referências diretas sobre o assunto (Figura 13).

Figura 13 - Rompimento dos rejeitos - Segundo estrondo



Fonte: Watanabe (2019).

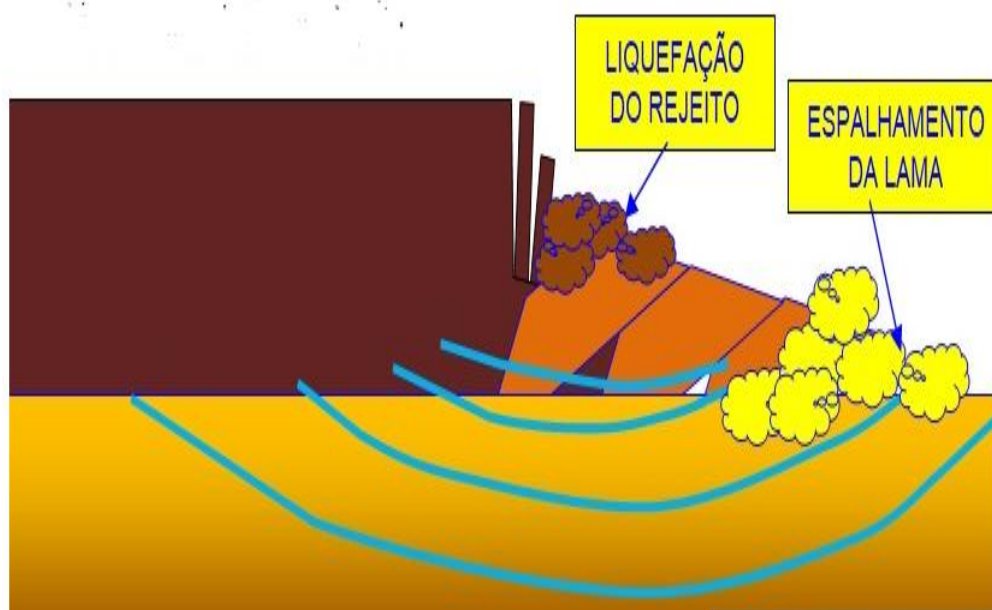
3.4.7 Sétima Fase

A liquefação dos rejeitos em barragens de mineração é um fenômeno geotécnico que ocorre quando os materiais granulares presentes na barragem perdem temporariamente sua resistência e comportam-se como um fluido. Durante esse processo, a pressão da água intersticial aumenta, reduzindo a coesão entre as partículas e diminuindo a capacidade de suporte dos materiais.

De acordo com estudos e relatórios técnicos sobre barragens de rejeitos, a liquefação pode ocorrer quando há uma combinação de fatores, como a presença de materiais granulares finos e saturados, o aumento da pressão da água intersticial e a aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas na barragem (ROBERTSON, 2011).

É importante ressaltar que cada barragem de rejeitos é única e requer uma análise geotécnica específica para avaliar o potencial de liquefação. A compreensão desse fenômeno é crucial para a segurança e a estabilidade das barragens, e medidas adequadas devem ser tomadas durante o projeto, construção e monitoramento das estruturas para mitigar os riscos associados à liquefação (Figura 14).

Figura 14 - Liquefação dos rejeitos



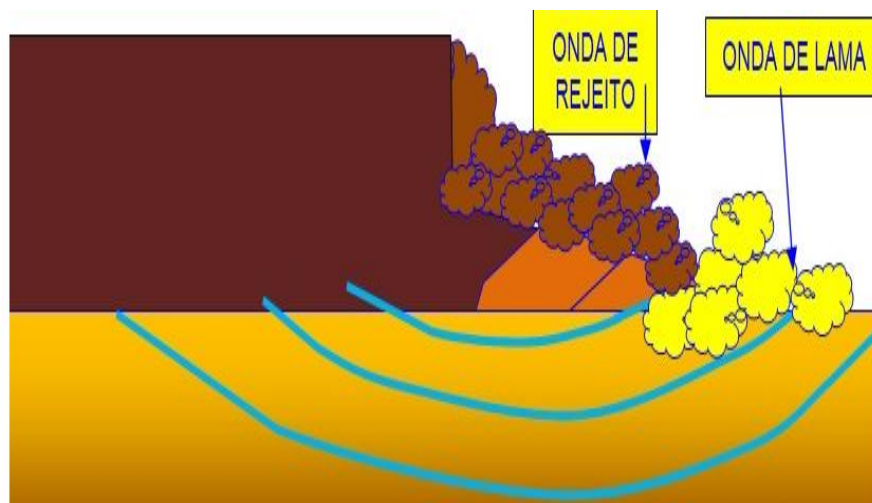
Fonte: Watanabe (2019).

3.4.8 Oitava Fase

Durante uma inundação em barragens de rejeitos, ondas de lama e de rejeitos podem invadir as áreas mais baixas à jusante da barragem. Essas ondas carregam consigo uma mistura de água, sedimentos finos e outros materiais presentes na barragem. O resultado é uma ampla disseminação desses materiais nas áreas afetadas.

A inundação ocorre quando grandes volumes de água, lama e rejeitos são liberados da barragem, formando ondas que se espalham rapidamente pelas áreas abaixo da barragem à jusante, resultando em uma disseminação generalizada de sedimentos e materiais na paisagem (Figura 15).

Figura 15 - Inundação - Ondas de lama e rejeitos invadem partes à jusante



Fonte: Watanabe (2019).

3.5 PROJETO DE BARRAGENS DE REJEITOS

Segundo a ANA (2021), o projeto de barragens de rejeitos tem como principal objetivo garantir a segurança e a estabilidade da estrutura, evitando o rompimento e o vazamento de resíduos no ambiente. Além disso, o projeto de barragens de rejeito deve considerar aspectos como a gestão de água e resíduos, a minimização de impactos ambientais e a preservação da qualidade da água.

Ainda de acordo com a ANA (2021), para alcançar esses objetivos, o projeto de uma barragem de rejeitos deve incluir as seguintes etapas:

- a) Estudos preliminares:** análise das condições locais, definição do tipo de barragem de rejeito mais adequada e avaliação dos impactos ambientais.
- b) Projeto básico:** definição das características técnicas da barragem, como capacidade de armazenamento, altura, largura e tipo de material a ser utilizado.
- c) Projeto executivo:** elaboração de desenhos, especificações técnicas e detalhamento da construção da barragem.
- d) Construção:** execução do projeto, conforme as especificações definidas no projeto executivo.
- e) Operação e manutenção:** monitoramento constante da barragem, realização de inspeções periódicas e adoção de medidas preventivas e corretivas.

De acordo com a ANA (2021), um projeto bem elaborado e executado pode contribuir para a segurança das pessoas e do meio ambiente, além de garantir a continuidade das atividades de mineração.

Após atingir a altura máxima de projeto, a barragem de rejeitos deixa de receber os resíduos das atividades de mineração e será “desativada”, passando a ser monitorada ininterruptamente para garantir a segurança da sua estrutura e, por conseguinte, das comunidades que vivem próximas ao barramento.

3.6 LEGISLAÇÃO

As barragens de rejeitos são regulamentadas por uma série de normas e leis, visando garantir a segurança dessas estruturas e minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição de resíduos da mineração. No Brasil, as principais legislações que tratam do assunto são a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB (Lei Nº 12.334/2010) e a Resolução Nº 4.327/2014 da Agência Nacional de Mineração (ANM),

que estabelece as diretrizes para a construção, operação e desativação de barragens de mineração.

De acordo com essas normas, as barragens de rejeitos devem ser projetadas, construídas e operadas de forma a garantir a estabilidade e segurança da estrutura, bem como a proteção do meio ambiente e da população. Além disso, devem ser realizados estudos geotécnicos e hidrológicos para avaliar a viabilidade técnica e econômica da construção da barragem, bem como estudos de impacto ambiental para avaliar os possíveis impactos na região.

A legislação também estabelece a necessidade de realizar inspeções e monitoramentos periódicos nas barragens, bem como a elaboração de planos de ação de emergência em caso de acidentes ou incidentes. Além disso, a ANM exige a apresentação de relatórios de segurança anuais para as barragens de categoria de risco alto e muito alto, e a adoção de medidas de segurança adicionais quando necessário.

3.6.1 Plano de Segurança de Barragem (PSB)

O Plano de Segurança de Barragem (PSB) é um documento que deve ser elaborado pelos empreendedores responsáveis pelas barragens de rejeitos, de acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) instituída pela Lei Nº 12.334/2010. O objetivo do PSB é garantir a segurança da barragem e das populações a jusante em caso de acidente ou incidente.

O PSB deve conter informações detalhadas sobre a barragem, como características técnicas, dados hidrológicos e geotécnicos, projeto, construção e operação da estrutura, bem como medidas preventivas e de contingência em caso de emergência. Além disso, o PSB deve ser atualizado regularmente e submetido à aprovação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que é responsável por fiscalizar as barragens no Brasil.

De acordo com a PNSB, as barragens devem ser classificadas em três categorias de acordo com o risco e o dano potencial associado: baixo, médio e alto. As barragens de rejeitos de mineração geralmente se enquadram na categoria de alto risco e dano potencial associado, exigindo medidas de segurança mais rigorosas.

É importante ressaltar que o PSB é fundamental para a prevenção de acidentes em barragens de rejeitos, especialmente em casos como o de Brumadinho, que resultou em um dos maiores desastres ambientais da história do Brasil.

3.6.2 Classificação de acordo com a Categoria de Risco (CRI)

A classificação de acordo com a Categoria de Risco (CRI) é uma ferramenta utilizada para avaliar o risco de uma barragem de rejeitos em apresentar problemas de estabilidade. Essa classificação leva em consideração a altura da barragem, o volume de rejeitos armazenados, o tipo de construção da barragem e a proximidade com áreas habitadas.

A CRI é dividida em três categorias: baixo risco, médio risco e alto risco. A categoria de risco é determinada com base em uma série de fatores, como o histórico de desempenho da barragem, a qualidade do projeto e da construção, a qualidade da gestão operacional, entre outros.

A CRI é importante porque fornece informações para os gestores de barragens de rejeitos e autoridades reguladoras tomarem decisões sobre as medidas de segurança que devem ser adotadas para reduzir o risco de acidentes. Por exemplo, barragens de rejeitos classificadas como de alto risco requerem medidas de segurança mais rigorosas do que aquelas classificadas como de baixo risco.

No Brasil, a CRI é regulamentada pela Agência Nacional de Mineração (ANM) por meio da Portaria Nº 70.389/2017, que estabelece critérios e procedimentos para classificação das barragens de mineração quanto ao seu potencial de dano ambiental e às medidas de segurança que devem ser adotadas.

3.6.3 Classificação de acordo com o Dano Potencial Associado (DPA)

A ANA (2021) classifica as barragens de acordo com o dano potencial associado (DPA) com o intuito de avaliar o risco e a necessidade de ações de segurança que a barragem exige.

O DPA é definido como a avaliação dos possíveis danos que poderiam ser causados em caso de rompimento da barragem, considerando as características da estrutura, do entorno e da população afetada. De acordo com o potencial de dano associado (DPA), as barragens podem ser classificadas em três (3) categorias distintas (ANA, 2021):

a) Categoria de risco baixo (DPA I): tratam-se de barragens em que o rompimento não causaria danos significativos à vida humana ou ao meio ambiente. Nesse caso, são recomendadas ações de monitoramento e controle, mas não há necessidade de obras de segurança adicionais.

b) Categoria de risco médio (DPA II): são barragens em que o rompimento pode causar danos moderados à vida humana ou ao meio ambiente. Nesse caso, são recomendadas obras de segurança e monitoramento constante.

c) Categoria de risco alto (DPA III): são barragens em que o rompimento pode causar danos significativos à vida humana ou ao meio ambiente. Nesse caso, são recomendadas obras de segurança prioritárias e monitoramento constante.

A categorização de uma barragem quanto ao DPA é uma ferramenta importante para avaliar o risco de barragens de rejeitos e direcionar ações de prevenção e segurança, bem como para a tomada de decisões em relação à interdição ou descomissionamento de barragens consideradas de alto risco.

3.6.4 Classificação de acordo com o Nível de Perigo Global da Barragem (NPGB)

A classificação de uma barragem quanto ao nível de perigo global da barragem (NPGB) busca avaliar o risco de uma barragem de rejeitos em falhar e causar danos ambientais e humanos. O sistema de classificação baseado no NPGB foi desenvolvido pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens (*International Commission on Large Dams* - ICOLD) e leva em consideração diversos fatores, como o volume de rejeitos armazenados, a altura da barragem, o tipo de construção e as condições do solo.

De acordo com a NPGB, as barragens de rejeitos podem ser classificadas em seis níveis de perigo global, sendo que o nível 1 representa uma barragem de rejeitos com um menor risco e o nível 6 representa uma barragem com o maior risco. É importante frisar que essa classificação considera não apenas o risco de uma possível falha da barragem, mas também as consequências ambientais e humanas, caso isso ocorra.

A classificação NPGB é amplamente utilizada na indústria de mineração para avaliar o risco de barragens de rejeitos em todo o mundo. No Brasil, por exemplo, a ANM utiliza o NPGB para classificar as barragens de rejeitos existentes no país e monitorar o seu estado de conservação.

3.7 INSPEÇÃO EM BARRAGENS DE REJEITOS

A inspeção de barragens de rejeitos é um processo essencial para garantir a segurança e a estabilidade dessas estruturas. Essas inspeções são realizadas regularmente por profissionais especializados e seguem diretrizes estabelecidas por órgãos reguladores e normas técnicas específicas.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2015), o objetivo principal da inspeção de barragens de rejeitos é identificar potenciais problemas, avaliar o estado de conservação e monitorar possíveis alterações na estrutura da barragem. Esta atividade é feita por meio de uma série de atividades que incluem:

a) Inspeção visual: Consiste em uma análise detalhada da barragem para identificar sinais de desgaste, erosão, trincas, vazamentos ou outros indícios de comprometimento da integridade estrutural.

b) Monitoramento de instrumentação: Barragens de rejeitos devem ser equipadas com instrumentação de monitoramento, tais como: piezômetros, extensômetros, inclinômetros, entre outros. Esses dispositivos são verificados para garantir que estejam funcionando corretamente e para obter dados precisos sobre o comportamento da barragem.

c) Análise de documentação e registros: São revisados os registros históricos da barragem, incluindo projetos, relatórios de inspeções anteriores, dados de monitoramento, planos de emergência e outros documentos relevantes.

d) Avaliação da estabilidade geotécnica: A estabilidade do maciço (diques de apoio) e do rejeito, fundações e taludes da barragem é analisada para identificar possíveis problemas de instabilidade, erosão interna ou deslizamentos.

e) Verificação de sistemas de drenagem: É avaliada a eficiência dos sistemas de drenagem da barragem, incluindo canais, bacias de sedimentação e sistemas de extravasamento, para garantir que estejam funcionando adequadamente e que a água seja controlada corretamente.

É importante ressaltar que as inspeções devem ser realizadas regularmente e que a frequência e a abrangência das inspeções podem variar de acordo com as regulamentações locais e a classificação de risco da barragem.

3.8 INCIDENTE E ACIDENTE

De acordo com a ANA (2020), incidente e acidente em barragens de rejeitos são definidos da seguinte forma:

a) Incidente: é qualquer evento que possa indicar uma falha ou uma possível falha no funcionamento da barragem, mas que não cause danos significativos à estrutura e/ou ao meio ambiente. Pode-se citar como exemplo de um incidente a ocorrência de um pequeno

vazamento de água que é rapidamente controlado e não causa impactos ambientais significativos.

b) Acidente: é um evento que resulta em danos significativos à estrutura da barragem, ao meio ambiente e/ou à segurança das pessoas. Nesta situação, cita-se como exemplo o rompimento de uma barragem que causa a inundação de áreas habitadas e/ou a destruição da infraestrutura existente no local do evento.

Na Tabela 1 são apresentados os registros de acidentes em barragens de contenção de rejeitos ocorridos pelo mundo, destacando suas respectivas causas e os danos resultantes. É importante ressaltar que diversos desses acidentes resultaram em perdas humanas e devastaram cidades e áreas vizinhas, causando danos de natureza irreversível que foram sentidos ao longo de várias gerações.

Tabela 1 - Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos

ANO	LOCAL	CAUSAS DA RUPTURA	DANOS PROVOCADOS
1965	EL COBRE - CHILE.	TERREMOTO / LIQUEFAÇÃO	210 VÍTIMAS - SOTERRAMENTO DO POVOADO
1970	MUFALINE MINE - ÁFRICA	NÃO INFORMADO	89 VÍTIMAS - 453.000 M³ DE REJEITOS SATURADOS
1972	BUFFALO CREEK - U.S.A.	NÃO INFORMADO	110 MORTOS, 1100 FERIDOS, 1500 CASAS DESTRUÍDAS - 595.000 M³ DE LAMA
1974	IMPALA PLATINUM - ÁFRICA DO SUL	ENTUBAMENTO	12 VÍTIMAS - 3 MILHÕES DE M³ DE LAMA FLUÍRAM POR 45 KM, DESTRUÇÃO DE ESTRADAS E PONTES
1985	PREALPI - ITÁLIA	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	268 VÍTIMAS - 200.000 M³ DE REJEITOS
1996	MINA DO PORCO - BOLÍVIA	ENTUBAMENTO	3 VÍTIMAS - 300 KM DE RIO CONTAMINADO
2010	MINA DE SAN JOSÉ - CHILE	DESLIZAMENTO DE ROCHAS, BLOQUEANDO A SAÍDA DA MINA	33 TRABALHADORES SOTERRADOS NA MINA A 700 METROS DE PROFUNDIDADE DURANTE 69 DIAS

Fonte: Modificado Soares (2010).

3.9 SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS (SNISB)

O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) é uma plataforma criada com o objetivo de centralizar e disponibilizar informações sobre a segurança das barragens no Brasil. Ele foi desenvolvido para coletar, armazenar, analisar e divulgar dados relacionados à segurança das barragens, proporcionando maior transparência e controle sobre essas estruturas.

O SNISB foi estabelecido pela Lei Nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) no Brasil. Segundo essa legislação, o SNISB é responsável por compilar e disponibilizar informações sobre a segurança das

barragens, incluindo dados sobre a quantidade, localização, condição de conservação e risco das barragens no país.

Através do SNISB é possível acessar informações sobre as barragens, como seu histórico de inspeções, características técnicas, planos de segurança, relatórios de monitoramento, e eventuais incidentes ou acidentes registrados.

O principal objetivo do SNISB é fornecer uma base de dados centralizada que possa ser utilizada por órgãos governamentais, empresas responsáveis por barragens, pesquisadores e o público em geral. A disponibilização dessas informações visa fortalecer a gestão e a fiscalização das barragens, promovendo a transparência e a segurança dessas estruturas.

3.10 RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (RSB)

O Relatório de Segurança de Barragens (RSB) é um documento técnico que tem por objetivo avaliar a segurança da estrutura da barragem e do empreendimento como um todo, além de apresentar as medidas preventivas e corretivas que devem ser adotadas para garantir a segurança das pessoas e do meio ambiente. O RSB é exigido por lei no Brasil e deve ser elaborado e atualizado periodicamente pelos responsáveis pelas barragens de rejeitos.

O RSB deve conter informações sobre a localização da barragem, suas características geotécnicas, hidrológicas e ambientais, o histórico de operação e manutenção da barragem, os planos de contingência e emergência, as medidas preventivas e corretivas, entre outras informações relevantes para avaliação da segurança da barragem.

O RSB é importante porque fornece informações para as autoridades reguladoras e para a sociedade em geral sobre a segurança das barragens de rejeitos e as medidas de segurança que estão sendo adotadas para prevenir acidentes.

No Brasil, a obrigatoriedade de elaboração do RSB é regulamentada pela Lei Nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). A Agência Nacional de Mineração (ANM) é o órgão responsável pela fiscalização e monitoramento das barragens de rejeitos no país.

3.11 SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS

A segurança de barragens de rejeitos é fundamental para prevenir desastres ambientais e sociais. Segundo a ANM (2018), a garantia da segurança dessas estruturas

requer a adoção de medidas que incluem a seleção criteriosa de locais de construção, o uso de tecnologias avançadas na construção e monitoramento, e a implementação de planos de emergência e evacuação.

Além disso, a ANM (2018) destaca que é fundamental realizar uma avaliação rigorosa dos riscos envolvidos por meio da análise da estabilidade do solo, da quantidade e tipo de rejeitos armazenados e das condições climáticas locais da barragem. A instalação de sensores, a análise de imagens de satélite e inspeções periódicas também são importantes para monitorar constantemente as condições da barragem.

3.12 EROSÃO INTERNA OU INFILTRAÇÃO (PIPING)

A erosão interna, também conhecida como piping, é um fenômeno que ocorre em barragens de uma maneira geral e representa uma ameaça à sua estabilidade. De acordo com Oliveira et al. (2019), a erosão interna ocorre quando a água se infiltra através do maciço ou da fundação da barragem, criando canais preferenciais de fluxo e removendo partículas finas, podendo levar ao colapso da barragem.

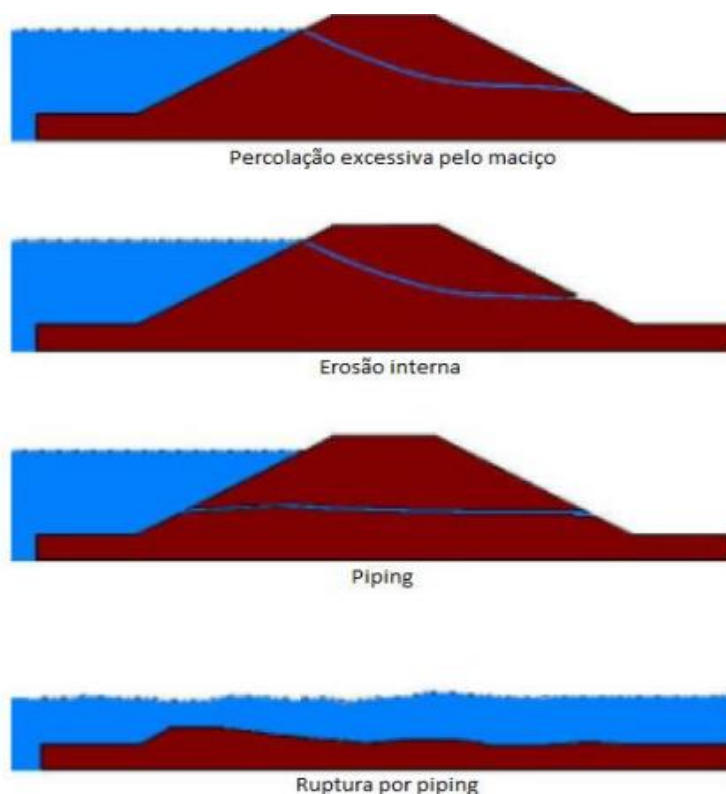
A infiltração de água e a subsequente erosão interna podem ser particularmente preocupantes em barragens de rejeitos, pois os materiais depositados são altamente permeáveis. A água infiltrada pode transportar partículas finas e criar caminhos de fluxo preferenciais, levando à formação de canais ou túneis dentro da barragem. À medida que a erosão interna progride, podem ocorrer vazios ou galerias no interior da barragem, comprometendo sua estabilidade (OLIVEIRA et al., 2019).

A erosão interna pode ser desencadeada por diversos fatores, incluindo a presença de fluxos de água não controlados, variações excessivas do nível de água, gradiente hidráulico elevado, permeabilidade inadequada do material de construção da barragem e falhas no projeto e construção (OLIVEIRA et al., 2019).

Para prevenir a erosão interna em barragens de rejeitos é essencial adotar medidas adequadas de projeto, construção e operação. Isso pode incluir a seleção cuidadosa de materiais de construção, compactação adequada dos rejeitos, implantação de sistemas de drenagem eficientes, controle adequado do nível de água e monitoramento contínuo (OLIVEIRA et al., 2019).

A Figura 16 ilustra o fenômeno de ocorrência de erosão interna (piping) pelo corpo de uma barragem, gerando a sua ruptura.

Figura 16 - Processo de ruptura em barragem por erosão interna (piping)



Fonte: Pereira (2009).

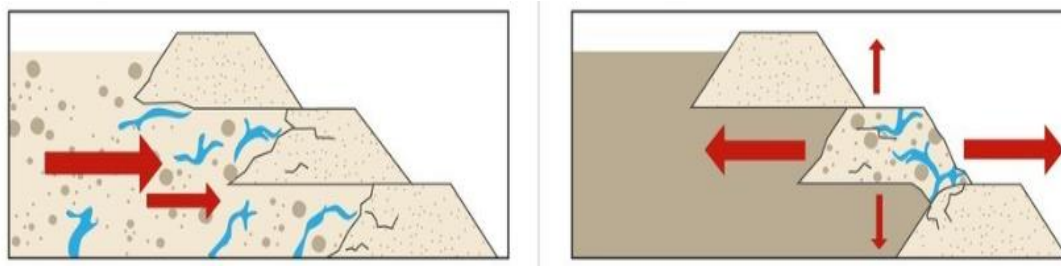
3.13 TIPOS DE RUPTURAS EM BARRAGENS

Existem vários tipos de rupturas em barragens e a literatura técnica apresenta diversas descrições e classificações dessas rupturas. Carvalho et al. (2020) apresentam uma classificação das rupturas em barragens de rejeitos com base nas causas e mecanismos que as originam. A classificação apresentada por Carvalho et al. (2020) é útil para compreender as causas das rupturas e, assim, desenvolver medidas preventivas e corretivas mais eficazes para reduzir o risco de acidentes em barragens de rejeitos.

Desta forma, a seguir, são apresentados os tipos de rupturas em barragens de rejeitos de acordo com a classificação proposta por esses autores:

a) Ruptura por liquefação: é causada pela perda de resistência do solo, assumindo este o comportamento de um líquido. Esse tipo de ruptura pode ocorrer em solos saturados, como os depósitos de rejeitos, e é um dos principais mecanismos de falha em barragens de rejeitos (Figura 17).

Figura 17 - Processo de liquefação em barragens de rejeitos



Fonte: Modificado G1 (2019).

- No rejeito: o material começa a se comportar como fluido e escorre, empurrando a estrutura, que pode se romper.
- No dique: ao sofrer liquefação, a área afetada perde completamente a resistência, tornando-se um ponto de fraqueza na estrutura. A barragem pode entrar em colapso a partir desse ponto.

b) Ruptura por erosão interna (piping): causada pela infiltração de água no rejeito, que pode levar à erosão dos materiais internos da barragem. Essa erosão pode iniciar uma trinca que, se não for contida, pode evoluir para uma ruptura completa.

c) Ruptura por deslizamento: ocorre quando o talude de uma barragem de rejeitos desliza, em função da instabilidade do solo ou de falhas na construção da barragem. (Figura 18).

Figura 18 - Processo de ruptura por deslizamento



Fonte: Angelo (2022).

d) Ruptura por sobrecarga: ocorre quando a quantidade de rejeitos na barragem ultrapassa sua capacidade de suporte. Isso pode ocorrer devido a erros de cálculo ou falhas na manutenção da barragem.

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLHA DO MODO DE PESQUISA

Neste trabalho foi realizado uma análise detalhada dos acidentes e incidentes que ocorreram em barragens de rejeitos no Brasil, conforme divulgado nos Relatórios de Segurança de Barragens (RSB's) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) entre os anos de 2011 a 2022.

O trabalho é definido como sendo estatístico, pois teve como propósito coletar e apresentar os dados referentes aos acidentes e incidentes que ocorreram envolvendo barragens de rejeitos nos últimos onze anos.

Esta pesquisa é também classificada como descritiva e explicativa em relação aos seus objetivos. No que se refere à pesquisa descritiva, buscou-se caracterizar os fenômenos ocorridos com as barragens quanto aos acidentes e incidentes mapeados. Já no que tange à pesquisa explicativa, teve-se como objetivo identificar os fatores determinantes desses fenômenos (tipos de anomalias e suas causas).

Nesse sentido, adotou-se uma abordagem quantitativa, traduzindo as informações sobre os acidentes e incidentes em números e gráficos, que foram utilizados para análise dos resultados. Os dados analisados nesse estudo tratam-se de casos reais de acidentes e incidentes ocorridos em barragens de rejeitos no Brasil entre os anos de 2011 e 2022, os quais foram extraídos dos Relatórios de Segurança de Barragens (RSB's) publicados anualmente pela ANA. A compilação desses dados está apresentada em forma de planilhas nos Apêndices A e B desse trabalho.

A pesquisa bibliográfica fundamentou-se na legislação em vigor, incluindo leis federais e resoluções de órgãos (federais e estaduais) relacionadas à segurança em barragens. Além disso, foram revisados materiais literários existentes sobre o assunto, como livros, teses, monografias e apostilas de cursos sobre segurança de barragens disponibilizados pelo órgão regulador, abrangendo diversas perspectivas e abordagens de diferentes autores.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ACIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS

De acordo com a ANA (2019), a caracterização dos acidentes registrados em barragens de rejeitos envolve a análise de diversas variáveis, como a causa do acidente, o tipo de estrutura da barragem, o tamanho do reservatório, o tipo de rejeito armazenado, entre outras. Essas informações são importantes para entender as possíveis causas dos acidentes e identificar medidas preventivas para evitar que eles ocorram novamente.

Segundo a ANA (2019), as rupturas podem ser causadas por falhas na estrutura da barragem, como erosões no talude ou na fundação, enquanto os transbordamentos podem ocorrer devido ao excesso de água acumulada no reservatório.

Além disso, a caracterização dos acidentes também leva em consideração o impacto ambiental e social causado pelo acidente. A contaminação dos corpos d'água e o deslocamento de comunidades são alguns dos possíveis impactos causados por acidentes em barragens de rejeitos (ANA, 2019).

A análise dos acidentes registrados em barragens de rejeitos é fundamental para aprimorar as técnicas de construção e operação dessas estruturas, garantindo a segurança das pessoas e do meio ambiente. As informações obtidas a partir da caracterização dos acidentes podem ser utilizadas para implementar medidas de prevenção e mitigação de possíveis danos (ANA, 2019).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS INCIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS

Segundo a ANA (2021), os incidentes registrados em barragens de rejeitos podem ocorrer devido a:

a) Vazamentos ou rupturas de barragens de rejeitos: esse tipo de incidente pode resultar em contaminação de rios, lagos e áreas circundantes. Esse incidente pode ser causado por diversos fatores, tais como: erosão, falhas no projeto ou manutenção inadequada.

b) Elevação do nível de água nas barragens de rejeitos: esse tipo de incidente pode levar a transbordamentos (galgamentos) e deslizamentos de terra. Esse tipo de incidente pode ser desencadeado por chuvas intensas ou problemas de drenagem.

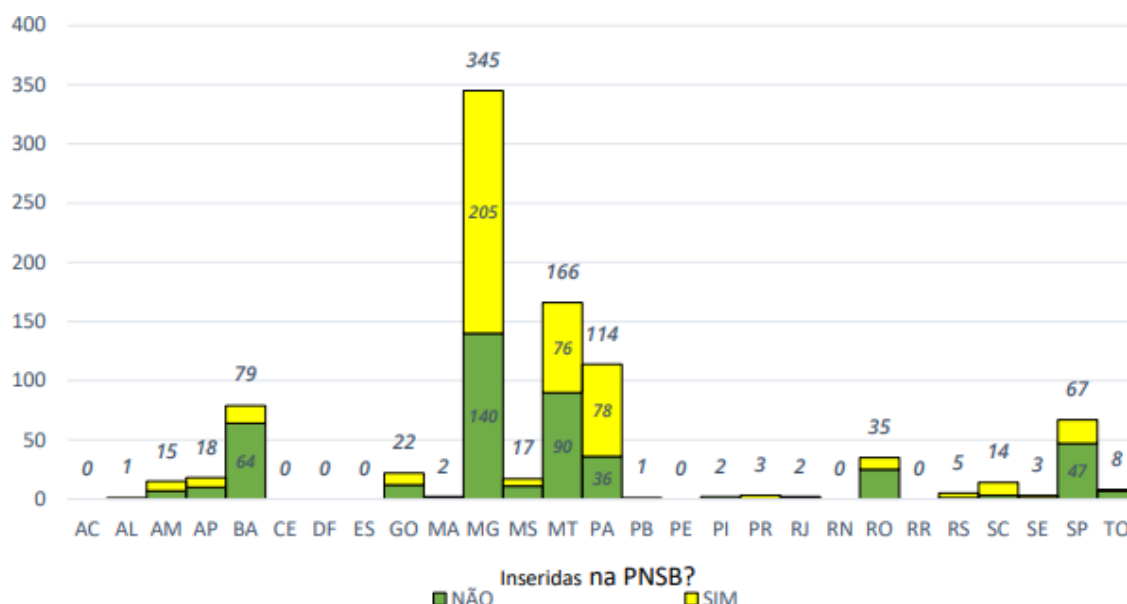
c) Deslizamentos de terra na área ao redor das barragens de rejeitos: esse tipo de incidente pode resultar em danos à estrutura da barragem e risco de ruptura.

Todos esses incidentes podem ter consequências graves para o meio ambiente e as comunidades circundantes, como contaminação de rios e solos, perda de biodiversidade, desalojamento e perda de vidas humanas.

4.4 SITUAÇÃO DE BARRAGENS CADASTRADAS NO SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO (SIGBM)

De acordo com a ANM (2023), no Brasil, até o dia 1º de junho, haviam um total de novecentas e dezenove (919) barragens de mineração registradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM). Dentre essas, cerca de quatrocentas e sessenta (460) estavam de acordo com os critérios estabelecidos pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Distribuição das barragens cadastradas no SIGBM



Fonte: ANM (2023).

Essa adesão à PNSB é fundamental para promover a prevenção de acidentes e a proteção do meio ambiente, assegurando práticas adequadas de monitoramento e manutenção das barragens. Ao cumprir os critérios estabelecidos pela política, busca-se garantir a estabilidade e a segurança das estruturas, minimizando os riscos de rompimentos e vazamentos prejudiciais. Além disso, a PNSB visa assegurar a implementação de medidas de proteção ambiental, preservando ecossistemas, recursos hídricos e biodiversidade. Ao seguir essas diretrizes, promove-se uma gestão responsável

das barragens de mineração, promovendo a segurança das comunidades próximas e o cuidado com o ecossistema circundante.

4.4.1 Critérios Estabelecidos pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estabelece uma série de critérios e diretrizes a serem seguidos para garantir a segurança e a gestão adequada das barragens de mineração. Alguns dos critérios importantes definidos pela PNSB incluem:

- Classificação de risco;
- Inspeções e monitoramento;
- Plano de Ação de Emergência (PAE);
- Gestão de riscos;
- Responsabilidade técnica.

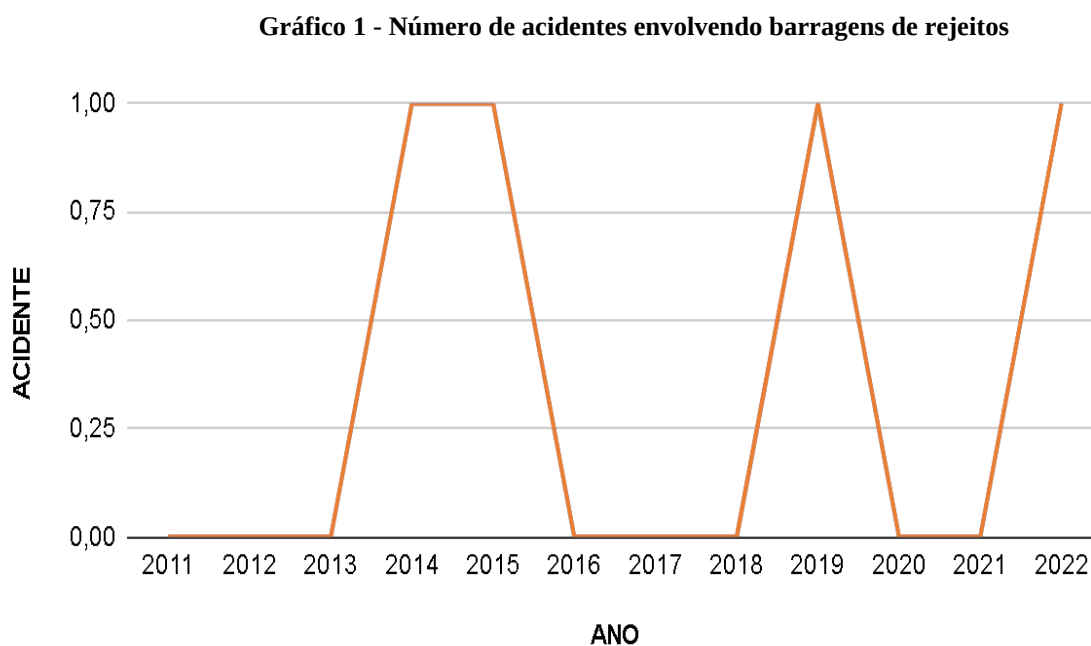
Esses são apenas alguns dos critérios estabelecidos pela PNSB. É importante observar que as especificações completas e atualizadas podem variar ao longo do tempo e devem ser consultadas diretamente nos documentos oficiais da legislação vigente.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ACIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS SEGUNDO OS RSB's

5.1.1 Número de acidentes e vítimas

Com base nos dados publicados pela ANA, entre os anos de 2011 a 2022 ocorreram no Brasil quatro (4) acidentes em barragens de rejeitos, conforme ilustrado no Gráfico 1. Dentre esses quatro acidentes, as barragens da Mineradora Herculano, Fundão B1, em Brumadinho, são conhecidas por terem sido palco de tragédias de grande magnitude. Esses acidentes resultaram em perdas de vidas humanas e causaram impactos devastadores tanto para as comunidades locais quanto para o meio ambiente.



Fonte: Autor (2023).

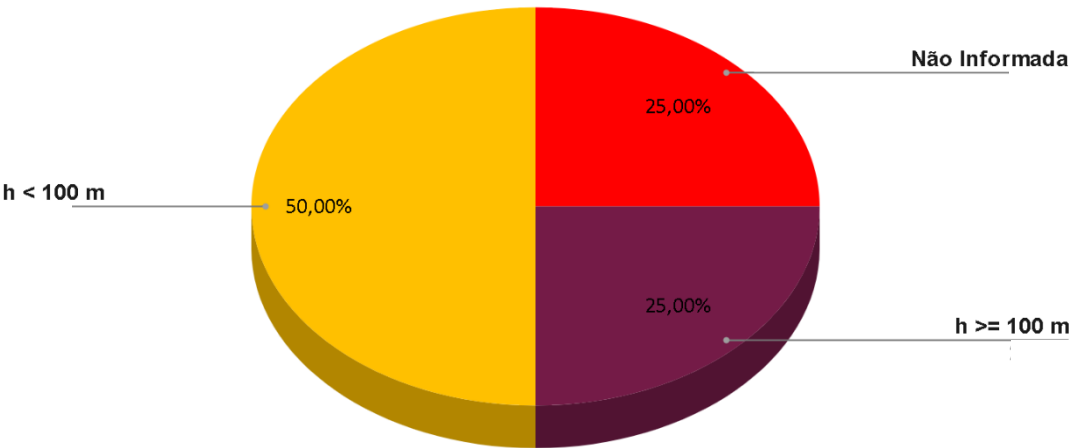
O Quadro 1 e o Gráfico 2 apresentam os valores da altura dessas quatro (4) barragens de rejeitos que colapsaram.

Quadro 1 - Altura da barragem

ANO	NOME DA BARRAGEM	ALTURA DA BARRAGEM (m)
2014	MINERADORA HERCULANO	NÃO INFORMADA
2015	FUNDÃO	100,0
2019	B1	86,0
2022	BELÍSSIMA	4,5

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 2 - Altura das barragens de rejeitos que sofreram ruptura



Fonte: Autor (2023).

O acidente da barragem de rejeitos da Mineradora Herculano, situada no município de Itabirito, estado de Minas Gerais, ocorreu no dia 10 de setembro de 2014, e resultou em oito (8) vítimas. Esse desastre teve consequências devastadoras, causando prejuízos não só para essas pessoas que foram vitimadas pelo acidente, como também danos ambientais significativos para a região.

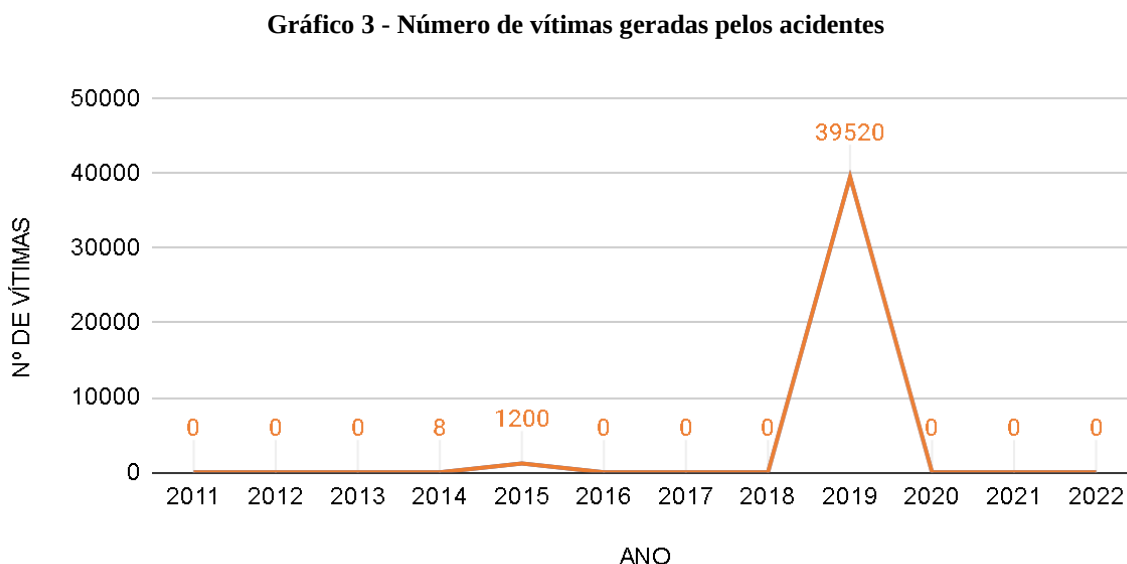
O rompimento da barragem de Fundão, pertencente à Samarco (subsidiária da Vale), ocorreu em 5 de novembro de 2015, na cidade de Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil. Esse desastre foi considerado um dos maiores desastres ambientais do país. Estima-se que 1.200 pessoas foram impactadas com essa tragédia. Além das vítimas

humanas, o rompimento da barragem causou extensos danos ambientais devido ao derramamento de uma enorme quantidade de rejeitos tóxicos que poluíram rios, afetaram a fauna e flora locais e causaram impactos de longo prazo no ecossistema.

No caso da barragem B1, localizada em Brumadinho, no estado de Minas Gerais, o rompimento ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019. Esse evento trágico resultou em um grande número de vítimas, afetando não apenas a cidade de Brumadinho, mas também municípios vizinhos como Betim, Juatuba, Esmeraldas, São Joaquim de Bicas e Mário Campos, além de toda a bacia do Rio Paraopeba. O número de pessoas vitimadas por esse acidente é muito significativo, totalizando 39.520 vítimas. Além disso, o desastre provocou danos ambientais graves, com a contaminação do solo e da água, perda da biodiversidade e impactos socioeconômicos de grande magnitude.

Em 2022, ocorreu um acidente, de pequena magnitude, na barragem Belíssima, localizada no município de Ariquemes, em Rondônia, e pertencente à Cooperativa dos Garimpeiros de Santa Cruz (COOPERSANTA). Por se tratar de uma barragem de pequeno porte, com altura de 4,5 metros e um volume de 964.280.000 m³ de rejeitos de minério de estanho, o acidente não gerou vítimas e nem mortes.

O Gráfico 3 apresenta o número de pessoas que foram vitimadas pelos acidentes ocorridos no Brasil em barragens de rejeitos entre os anos de 2011 a 2022.



Fonte: Auto (2023).

As tragédias provocadas pelo rompimento de barragens de rejeitos devem servir como alerta para a importância da segurança e monitoramento adequados desse tipo de obra, bem como para a necessidade de uma regulamentação mais rigorosa e um cuidado

maior com o meio ambiente e com as comunidades que estão nos entornos dessas barragens e são afetadas pela atividade mineradora. Assim, deve haver uma preocupação contínua em investir em práticas de segurança, prevenção de desastres e mitigação dos impactos ambientais relacionados à mineração e à construção dessas obras de contenção.

5.1.2 Número de mortes

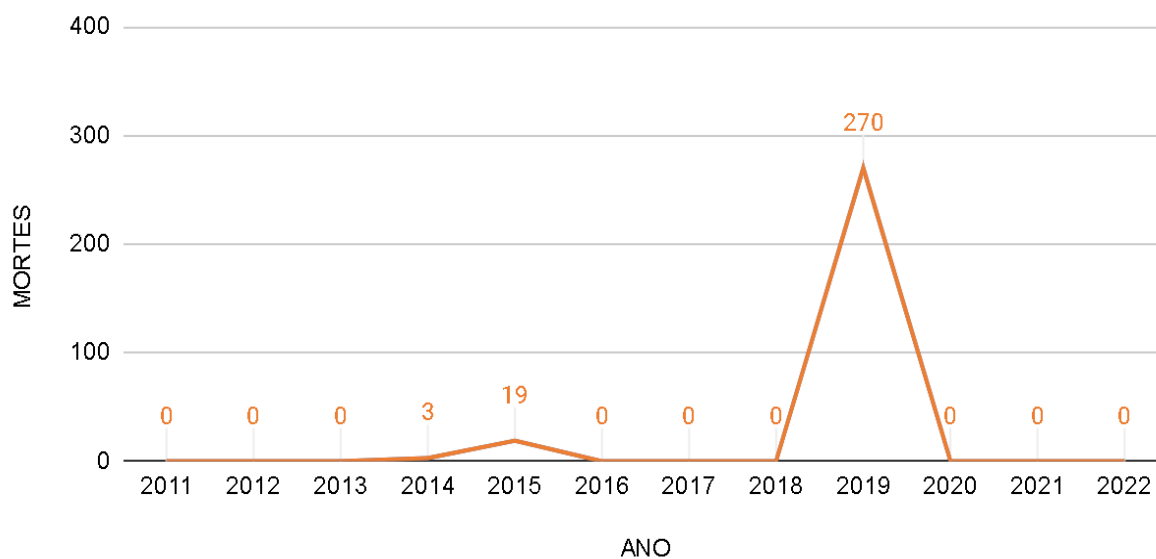
Além do número elevado de pessoas afetadas pelos acidentes das barragens da Mineradora Herculano, Fundão e B1, estas barragens também provocaram perdas de vidas humanas, sobremaneira as duas últimas. Como dito anteriormente, o acidente da barragem Belíssima não gerou vítimas, nem perdas de vidas humanas ou danos às propriedades.

O colapso da barragem da Mineradora Herculano resultou em quatro (4) vítimas fatais, onde uma (1) pessoa ainda se encontra desaparecida. Além dessas perdas de vidas humanas, o desastre provocou sérios danos ambientais, como contaminação do solo, poluição de recursos hídricos e destruição de ecossistemas locais.

A barragem de Fundão, de propriedade da Samarco, foi considerada um dos maiores desastres ambientais do país. O colapso resultou em um número expressivo de mortes, totalizando dezenove (19) de mortes. Além disso, a liberação em larga escala de rejeitos de mineração contaminou o rio Doce e seus afluentes, ocasionando danos ambientais significativos ao longo da bacia hidrográfica, afetando a fauna, a flora e a segurança hídrica das regiões afetadas.

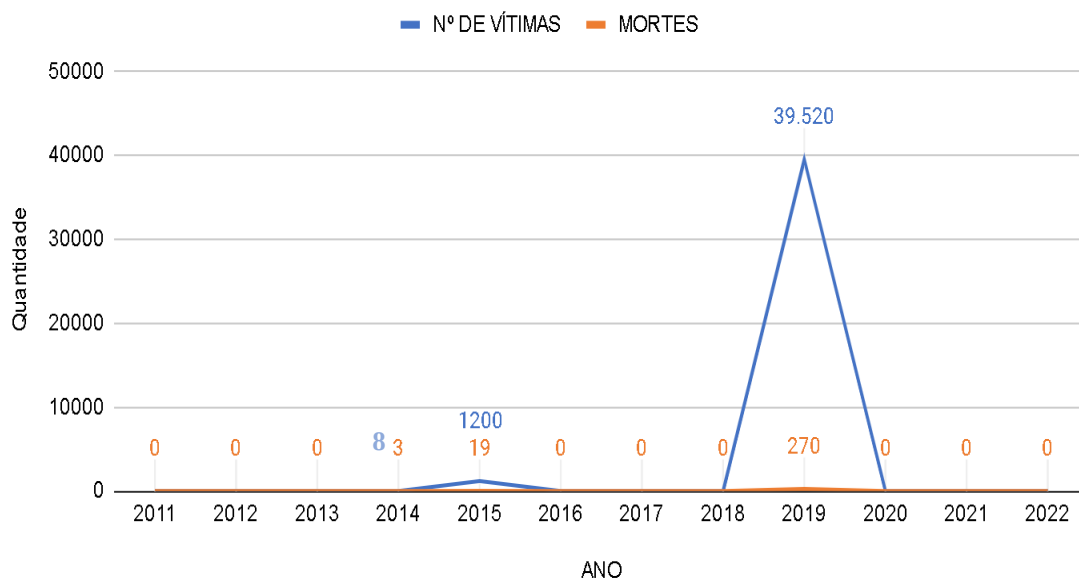
A barragem B1 resultou em um número alarmante de mortes, com o expressivo número de duzentas e sessenta e sete (267) vítimas fatais, sem contar com três (3) pessoas que ainda continuam desaparecidas. Além disso, o colapso da barragem gerou um volume considerável de rejeitos de mineração que se espalhou pela região, causando devastação ambiental, destruição de áreas vegetais, contaminação de recursos hídricos e impactos socioeconômicos significativos.

O Gráfico 4 apresenta o número de mortes ocorridas devido ao rompimento dessas barragens de rejeitos.

Gráfico 4 - Número de mortes geradas pelos acidentes

Fonte: Autor (2023).

O Gráfico 5 abaixo apresentado correlaciona o número total de vítimas e de mortes geradas pelos acidentes em barragens de rejeitos no Brasil, onde computa-se um total de 292 (duzentas e noventa e duas) mortes e 40.728 (quarenta mil setecentos e vinte e oito) pessoas vitimadas por esses eventos ocorridos no Brasil entre os anos de 2011 a 2022.

Gráfico 5 - Números de vítimas e mortes

Fonte: Autor (2023).

Desta forma, a ocorrência desses eventos enfatiza a necessidade de implementar medidas eficazes para prevenir acidentes, garantir a segurança das estruturas das

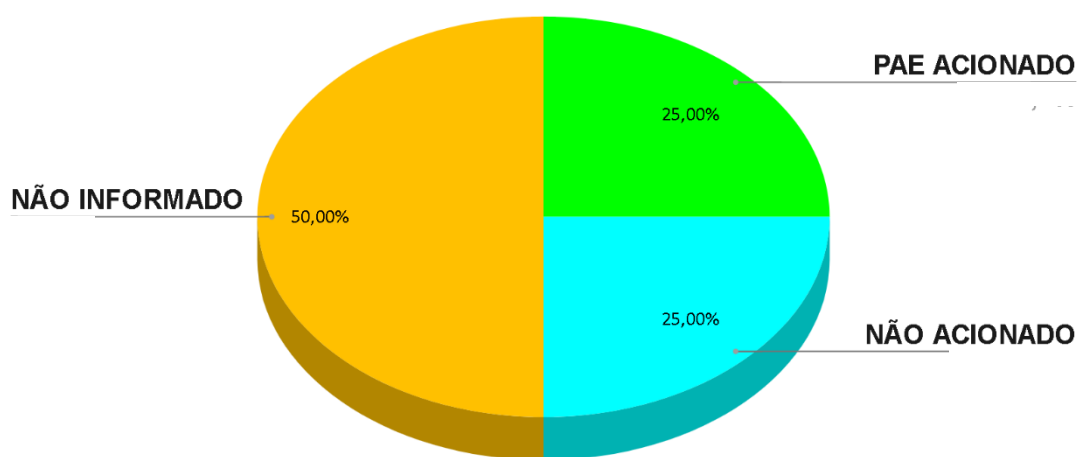
barragens e adotar práticas sustentáveis na indústria mineradora, a fim de evitar futuros desastres e proteger vidas humanas e o meio ambiente.

5.1.3 Plano de Ação de Emergência (PAE)

O Plano de Ação de Emergência (PAE) é um documento elaborado para estabelecer as diretrizes e procedimentos a serem seguidos em caso de ocorrência de uma situação de emergência em uma barragem. Esse plano é fundamental para garantir a segurança das pessoas, do meio ambiente e das estruturas adjacentes em caso de eventos indesejados, como o rompimento de uma barragem de rejeitos. Esse plano garante dispositivos de alerta para comunicar as pessoas que habitam regiões próximas a essas grandes obras em caso de sinistro, dando condições às mesmas de poderem se evadir de suas casas ou locais de trabalho e irem se abrigar em locais seguros.

O Gráfico 6 demonstra que para 50% dos acidentes ocorridos, não se tem a informação sobre o acionamento, ou não, dos PAE's dessas barragens, conforme está registrado nos RSB's anuais da ANA.

Gráfico 6 - Acionamento do Plano de Ação de Emergência (PAE)



Fonte: Autor (2023).

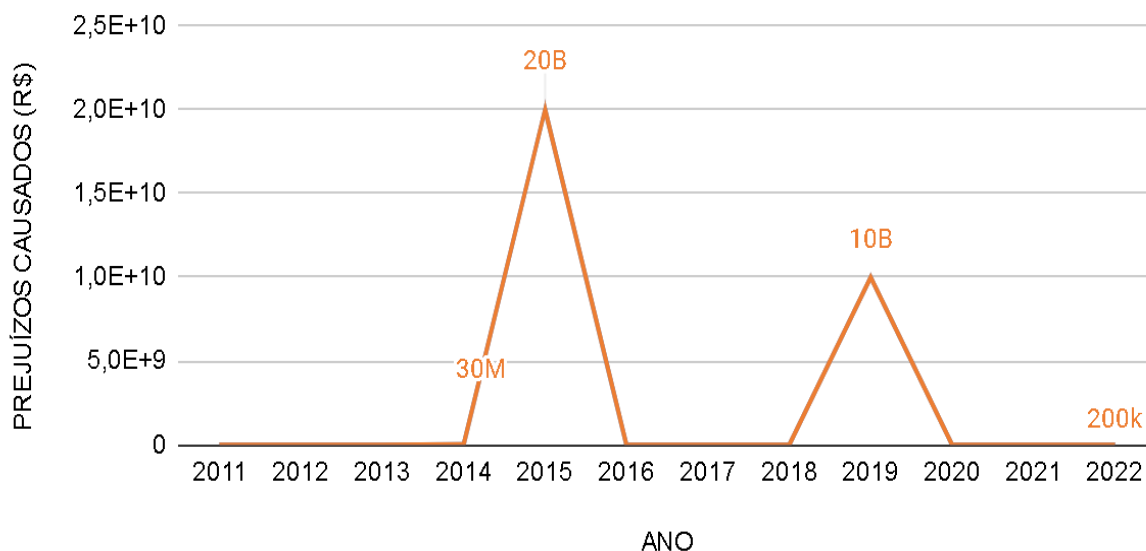
Segundo consta nos RSB's apenas a barragem B1, localizada em Brumadinho, acionou o seu PAE. Contudo, é de conhecimento que esse documento só foi acionado após a ocorrência do acidente com o intuito de mitigar os danos ocorridos. Segundo Rodrigues (2019), a Vale tinha conhecimento da existência de problemas na estrutura da obra e de deficiências no plano de evacuação para o caso de ocorrência de um sinistro.

Ao contrário do que deveria ter sido realizado, a empresa não tomou nenhuma providência para desmobilizar as pessoas que trabalhavam no local, bem como os moradores das circunvizinhanças da barragem. Essa atitude poderia ter evitado a morte de centenas de pessoas e a expressiva destruição do meio ambiente.

5.1.4 Prejuízos causados

As barragens da Mineradora Herculano, Fundão, B1 e Belíssima foram responsáveis por causar prejuízos significativos de diferentes categorias, como será descrito a seguir. O Gráfico 7 apresenta os valores (em reais) dos prejuízos financeiros causados às empresas responsáveis por cada uma dessas quatro barragens de rejeitos.

Gráfico 7 - Prejuízos financeiros causados



Fonte: Autor (2023).

A barragem da Mineradora Herculano resultou em danos econômicos substanciais, com perdas estimadas em cerca de 30 milhões de reais. Além disso, houve impactos sociais consideráveis, com o deslocamento forçado de comunidades locais e a interrupção de atividades econômicas que dependiam da região afetada.

O desastre da barragem de Fundão resultou em um enorme custo financeiro para a recuperação e reparação dos danos causados. Os prejuízos foram estimados em cerca de 20 bilhões de reais, abrangendo os esforços de remoção dos rejeitos, a reconstrução de infraestruturas afetadas e a compensação às vítimas e comunidades atingidas.

A barragem B1 em Brumadinho teve impactos financeiros significativos, com prejuízos estimados em cerca 10 bilhões de reais. Os custos envolveram ações de busca e resgate, remoção dos rejeitos, restauração ambiental, indenizações às vítimas e suas famílias, além de medidas de mitigação de danos ambientais e socioeconômicos.

Além dos impactos financeiros, esses três desastres causaram danos irreversíveis às comunidades locais, ao meio ambiente e à reputação das empresas envolvidas, destacando a importância de uma gestão responsável e sustentável das operações industriais.

Já a barragem Belíssima gerou danos financeiros estimados em cerca de duzentos mil reais, incluindo contratos assinados com a empresa Certare para adequação da barragem, hospedagem da equipe contratada, alimentação e locação de máquinas para realizar as obras necessárias.

5.1.5 Locais e tipos de anomalias

As barragens de rejeitos podem apresentar diferentes tipos de anomalias. Essas anomalias podem variar desde trincas e erosões no barramento até a instabilidade estrutural e vazamentos de rejeitos. Cada tipo de anomalia apresenta seus próprios riscos e potencial de causar danos significativos em caso de falhas da barragem.

O Quadro 2 apresenta o tipo de anomalia e o local de sua ocorrência que propiciou o colapso de cada uma das quatro barragens de rejeitos no Brasil, segundo consta nos RSB's da ANA. Para as barragens B1 e Belíssima, estas duas informações não estão descritas nos respectivos RSB's.

Quadro 2 - Anomalias encontradas nas barragens

ANO	NOME DA BARRAGEM	TIPO DE ANOMALIA	LOCAL DA ANOMALIA
2014	MINERADORA HERCULANO	EROSÃO INTERNA	CORPO DA BARRAGEM
2015	FUNDÃO	ROMPIMENTO	CORPO DA BARRAGEM
2019	B1	NÃO INFORMADO	NÃO INFORMADO
2022	BELÍSSIMA	NÃO INFORMADO	NÃO INFORMADO

Fonte: Autor (2023).

É imprescindível que as empresas responsáveis pela operação dessas barragens realizem inspeções regulares, monitoramento contínuo e manutenção adequada para identificar e corrigir precocemente quaisquer anomalias encontradas, visto que a análise

e o acompanhamento das anomalias são partes essenciais do processo de garantia da segurança das barragens, visando proteger vidas humanas, o meio ambiente e as comunidades que residem nos arredores dessas grandes obras.

5.1.6 Causa e método de detecção

É importante ressaltar a importância da transparência e da divulgação completa das informações relacionadas à segurança das barragens, a fim de promover a prestação de contas e a confiança das comunidades e do público em geral.

Por isso, é essencial que as empresas responsáveis pela operação de barragens adotem medidas rigorosas de monitoramento, inspeção e manutenção, além de implementarem sistemas de gestão de riscos e segurança adequados. A identificação precoce de problemas e anomalias, juntamente com a adoção de ações corretivas efetivas, pode ajudar a prevenir acidentes e incidentes, e garantir a segurança das barragens de rejeitos.

De um modo geral, as principais causas que geram problemas em barragens de rejeitos podem ser do tipo: falhas na estrutura da barragem; erosão do solo; deficiências no projeto; construção inadequada; falta de manutenção; excesso de carga; eventos climáticos extremos; entre outros fatores.

Por conseguinte, existem diversos mecanismos para detectar a possibilidade de ocorrência de um acidente em barragem (iminência de um acidente) e/ou de investigar a sua causa, após o acontecimento do sinistro. Os métodos de detecção mais usuais empregados em barragens de rejeitos incluem o monitoramento geotécnico e inspeções visuais regulares, o uso de tecnologias com o emprego de drones e a análise de dados de instrumentação (inclinômetros, piezômetros, extensômetros, entre outros). Esses métodos permitem avaliar a integridade da barragem, identificar pontos críticos e fornecer informações sobre a evolução das anomalias ao longo do tempo.

O Quadro 3 apresenta a causa que gerou o acidente em cada uma das quatro barragens de rejeitos e o método de detecção, quando informados nos RSB's.

Quadro 3 - Causa e método de detecção do evento

ANO	NOME DA BARRAGEM	CAUSA QUE GEROU O EVENTO	MÉTODO DE DETECÇÃO
2014	MINERADORA HERCULANO	EROSÃO INTERNA	NÃO INFORMADO
2015	FUNDÃO	LIQUEFAÇÃO DOS EFLUENTES	DETECÇÃO APÓS O ACIDENTE
2019	B1	NÃO INFORMADO	NÃO INFORMADO
2022	BELÍSSIMA	NÃO INFORMADO	NÃO INFORMADO

Fonte: Autor (2023).

5.1.7 Acidentes em barragens de rejeitos ocorridos no Brasil antes de 2011

A publicação do primeiro Relatório de Segurança de Barragem (RSB) elaborado pela ANA se deu no ano de 2011, com os casos de acidentes e incidentes ocorridos no ano de 2010. No entanto, a literatura traz casos de acidentes ocorridos no Brasil em barragens de rejeitos desde a década de 1980, conforme ilustra o Quadro 4.

Quadro 4 - Acidentes em barragens de rejeitos ocorridos antes de 2011

ANO	BARRAGEM / MUNICÍPIO	PRINCIPAIS DANOS CAUSADOS
1986	ITAMINAS - FERNANDINHO / ITABIRITO (MG)	7 MORTES
2001	RIO VERDE - CAVA C1 / NOVA LIMA (MG)	5 MORTES
2006	RIO POMBA CATAGUASES - SÃO FRANCISCO / MIRAÍ (MG)	VAZAMENTO DE RESÍDUOS DE BAUXITA
2007	RIO POMBA CATAGUASES - SÃO FRANCISCO / MIRAÍ (MG)	VAZAMENTO DE RESÍDUOS DE BAUXITA

Fonte: Modificado Lima (2016).

5.1.7.1 Itaminas - Mina de Fernandinho (1986)

No mês de maio de 1986, ocorreu a ruptura da barragem de contenção de rejeitos na Mina de Fernandinho, pertencente à empresa Itaminas Comércio de Minérios S.A., localizada no município de Itabirito, no estado de Minas Gerais. Esse acidente resultou no vazamento de aproximadamente 350.000 m³ de resíduos de minério de ferro, causando perdas de vidas humanas (PARRA e LASMAR, 1987). De acordo com esses autores, tomando-se também como base relatos de testemunhas, a ruptura pode ser descrita em duas fases, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Fases da ruptura da Mina de Fernandinho



Fonte: Parra e Lasmar (1987).

A barragem, com uma altura de 40 metros e ainda em funcionamento, vinha passando por um processo de aumento de altura, com seu topo cerca de 2,0 metros acima do nível dos rejeitos armazenados no reservatório. De acordo com Parra e Lasmar (1987), a inclinação e a altura do talude a jusante não estavam adequadas em relação à resistência ao cisalhamento do material e às pressões piezométricas presentes na massa.

O material de rejeito era lançado em locais distantes do maciço da barragem, resultando no acúmulo da fração fina nas proximidades da crista. Os subsequentes aumentos de altura eram realizados pelo método de montante, com camadas de 1,0 a 2,0 metros de espessura, sem qualquer controle de compactação. Como resultado, o maciço apresentava uma estrutura precariamente compactada, com uma densidade relativamente baixa (PEREIRA, 2005).

Segundo Pereira (2005), devido ao processo de lançamento, as partículas mais finas se acumulavam próximas à estrutura de contenção, o que poderia afetar o sistema de drenagem durante uma carga rápida, resultando em condições não drenadas. Esse

fenômeno é explicado pelo fato de que as partículas de ferro tendem a compor a fração mais fina do rejeito, o que resulta em amostras com maiores teores de ferro apresentando valores mais baixos de condutividade hidráulica.

Na condição em que o material se encontrava, sujeito a esforço cisalhante ou outras perturbações capazes de afetar o equilíbrio das partículas depositadas, havia uma condição crítica propensa à contração do material. Essa condição, juntamente com as características granulométricas e o estado de saturação do material, tornou o maciço da Mina de Fernandinho suscetível à ocorrência de liquefação espontânea (PARRA e LASMAR, 1987).

Segundo Parra e Lasmar (1987), os sinais deixados pelo acidente foram impressionantes devido à rapidez com que se desenvolveram, à velocidade alcançada e ao alto grau de fluidez da massa envolvida. Nas gargantas localizadas a jusante, irregularidades do terreno que poderiam ter retido parte da massa em movimento ficaram vazias, evidenciando o caráter de baixa viscosidade do fluido.

Nas áreas adjacentes, foram observados sinais de grandes variações nas alturas atingidas pela onda de lama. A força da massa em movimento resultou na remoção completa da vegetação e da camada superficial do solo, deixando uma superfície com aparência desértica (MELO, 2013).

5.1.7.2 Mineração Rio Verde - Cava C1 (2001)

No município de Nova Lima, em Minas Gerais, a empresa Mineração Rio Verde realizava atividades de exploração de minério de ferro, o que incluía a disposição dos rejeitos gerados. No ano de 2001, a contenção dos rejeitos era realizada em uma antiga cava conhecida como Cava C1, localizada na extremidade norte da mina. Essa cava desativada desde 1990, devido a restrições impostas pela sua geometria, passou a ser utilizada como depósito de rejeitos. Segundo Diniz et al. (2006), as dimensões dessa cava eram de 500 metros de comprimento, 120 metros de largura e 100 metros de profundidade.

Os rejeitos, compostos por partículas finas com alto teor de ferro, eram lançados na extremidade sul da estrutura de contenção e se depositavam ao longo dela. Em função das características típicas de deposição desse tipo de rejeito, as partículas maiores e mais pesadas sedimentavam-se mais rapidamente, enquanto o material fino misturado com líquidos direcionava-se para a zona norte da barragem. Esse direcionamento da fração fina com líquidos em direção à borda norte, combinado à ausência de um sistema de

drenagem interno, contribuiu significativamente para o aumento do nível do lençol freático da barragem, atingindo níveis considerados inaceitáveis (DINIZ et al, 2006).

Na segunda metade do ano de 1994, a barragem C1 atingiu a altura máxima da antiga cava, marcando o início da segunda fase do projeto. Nessa fase, foram construídos diques de contenção ao longo das bordas norte e leste da barragem. Para isso, foram realizados sucessivos aumentos de altura utilizando o método de montante, com cada alteamento apresentando 10 metros de altura e 15 metros de largura. Contudo, Diniz et al. (2006) afirma que os últimos taludes construídos antes da ruptura eram visivelmente menores do que o previsto em projeto, além de não terem sido identificados instrumentos de monitoramento ao longo da estrutura.

No dia 22 de junho de 2001, ocorreu a ruptura na borda nordeste desse sistema de contenção, onde o último aumento de altura estava a 20 metros acima da cota da crista da barragem. Nessa época, a altura total da barragem já havia ultrapassado os 40 metros em relação às bordas. Naquele momento, o perímetro da estrutura de contenção era de aproximadamente 1.130 metros, com uma seção transversal de 45.300 metros quadrados. É importante destacar que essa inclinação de talude é bastante acentuada para esse tipo de estrutura. A ruptura apresentou uma dimensão de aproximadamente 330 metros de largura ao longo da barragem de rejeitos, liberando imediatamente cerca de 530.000 m³ de rejeitos acumulados (DINIZ et al., 2006).

Devido à topografia acidentada da região, o material deslizou rapidamente, percorrendo uma distância aproximada de 6,3 quilômetros. Sua largura média foi calculada em cerca de 60 metros, com uma altura total de aproximadamente 400 metros. Durante o percurso, verificou-se que em alguns pontos os rejeitos foram depositados em áreas deprimidas, enquanto em outros locais a lama expôs o solo, causando erosão e novas instabilidades. A Figura 21 retrata a barragem de rejeitos após a sua ruptura.

Figura 21 - Vista aérea da barragem de rejeitos da mineração Rio Verde após a ruptura



Fonte: Ávila (2008).

A ruptura da barragem de rejeitos da Mineração Rio Verde resultou na trágica perda de cinco trabalhadores, causou danos significativos à infraestrutura, com a destruição da principal via de acesso, e teve impactos devastadores no município de São Sebastião das Águas Claras, incluindo o soterramento de áreas. Além disso, uma extensa porção de 79 hectares de Mata Atlântica foi completamente destruída. Aproximadamente 600 mil metros cúbicos de rejeitos contaminados se espalharam para o córrego Taquaras, afetando também cerca de 30 hectares de uma área de proteção ambiental na região (CETEM, 2016).

A Mineração Rio Verde realizou alterações na Cava C1 sem obter a devida licença ambiental de forma intencional, violando as normas técnicas exigidas. O procedimento de licenciamento original mencionava apenas um alteamento de 10 metros, porém foram realizados dois alteamentos adicionais sem a aprovação do órgão competente. Isso significa que não houve a elaboração de um projeto executivo completo, que incluiria informações geotécnicas essenciais para uma avaliação precisa dos riscos envolvidos. Além disso, não houve a supervisão de um profissional técnico responsável durante a execução dessas alterações (LIMA, 2016).

5.1.7.3 Rio Pomba Cataguases - São Francisco (2006-2007)

A empresa de mineração Rio Pomba Cataguases, localizada em Miraí, no estado de Minas Gerais, enfrentou dois acidentes com a mesma barragem em menos de um ano. O primeiro acidente ocorreu em 1º de março de 2006 na barragem São Francisco, quando ocorreu uma abertura entre as placas do vertedouro, resultando no vazamento de uma grande quantidade de lama, composta por aproximadamente 400 mil m³ de lama misturada com resíduos de bauxita (CETEM, 2012).

Segundo o CETEM (2012), esse acidente ocorreu devido ao deslocamento entre as placas que controlavam o fluxo de água nos vertedores, conhecidos como vertedores do tipo tulipa, resultando em uma fenda de 96 cm de comprimento por 5 cm de largura. Aproximadamente 135.000 m³ da lama, composta por argila e água sem materiais tóxicos, escoaram para o Córrego Bom Jardim, como ilustra a Figura 22.

Figura 22 - Lançamento pelo vertedor da lama no Córrego Bom Jardim



Fonte: FEAM (2006).

Segundo o CETEM (2012), durante um período de 36 horas, ocorreu o lançamento de rejeitos no Córrego Bom Jardim, resultando em impactos ambientais de grande magnitude nas áreas a jusante, a saber:

- Ocorrência de inundações em áreas agriculturáveis;
- Aumento significativo da turbidez nas águas do Córrego Bom Jardim, Ribeirão Fubá e Rio Muriaé;

- Destruição dos ecossistemas ribeirinhos;
- Prejuízo à vida aquática, com a morte de peixes;
- Interferência no abastecimento de água das cidades a jusante, como Lage de Muriaé e os distritos de Retiro e Comendador Venâncio, localizados em Itaperuna, no estado do Rio de Janeiro.

No ano de 2007, a barragem São Francisco já se encontrava em sua capacidade máxima e, devido às fortes chuvas que atingiram a região, aproximadamente 2 milhões de metros cúbicos de lama, contendo água e argila, transbordaram, afetando as cidades de Mirai e Muriaé. Os rejeitos alcançaram os rios Fubá e Muriaé, atingindo municípios tanto em Minas Gerais quanto no Rio de Janeiro. Esse foi o segundo acidente envolvendo a barragem São Francisco (CETEM, 2012).

Após o ocorrido acidente anterior com a barragem, o promotor de Justiça de Mirai solicitou a realização de vistorias por parte dos técnicos do Ministério Público. Essas vistorias resultaram em laudos que destacaram diversos problemas, incluindo a presença de processos erosivos em uma das encostas e na base da barragem. Os laudos recomendaram a adoção das medidas apropriadas para solucionar esses problemas, sendo responsabilidade de um profissional técnico certificado, devidamente registrado e com a anotação de responsabilidade técnica (LARCHER, 2012).

Durante a última inspeção, realizada após dois meses antes do segundo rompimento, foi constatado pelos técnicos do Ministério Público de Minas Gerais um alteamento não autorizado na barragem, com o objetivo de prolongar sua vida útil. Além disso, foi observado que o vertedouro da barragem estava em um nível mais elevado do que a própria barragem. Os técnicos recomendaram que a empresa apresentasse ao órgão ambiental um projeto "as built", documentando as modificações realizadas, e tomasse as medidas necessárias para aumentar o coeficiente de segurança da barragem até alcançar níveis satisfatórios (LARCHER, 2012).

No entanto, poucos dias antes de uma nova inspeção para verificar a execução das exigências mencionadas, especificamente na madrugada do dia 10 de janeiro de 2007, ocorreram fortes chuvas que atingiram a região, provocando o galgamento da barragem e, conseqüentemente, a sua ruptura (Figura 23).

Figura 23 - Vista da barragem de rejeitos após a ruptura



Fonte: Lauriano (2009).

Durante a inspeção realizada pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), foi constatado que a barragem de rejeitos tinha aproximadamente 35 metros de altura e que cerca de 70% do material armazenado havia vazado. Os técnicos também observaram que o restante do material poderia transbordar caso as chuvas continuassem intensas. Diante do acidente ambiental e da poluição das águas, o DNPM solicitou a interrupção imediata das atividades de mineração da empresa. Para conter a lama vermelha remanescente no barramento, a empresa e a Defesa Civil estavam construindo uma barreira de contenção (DNPM, 2007).

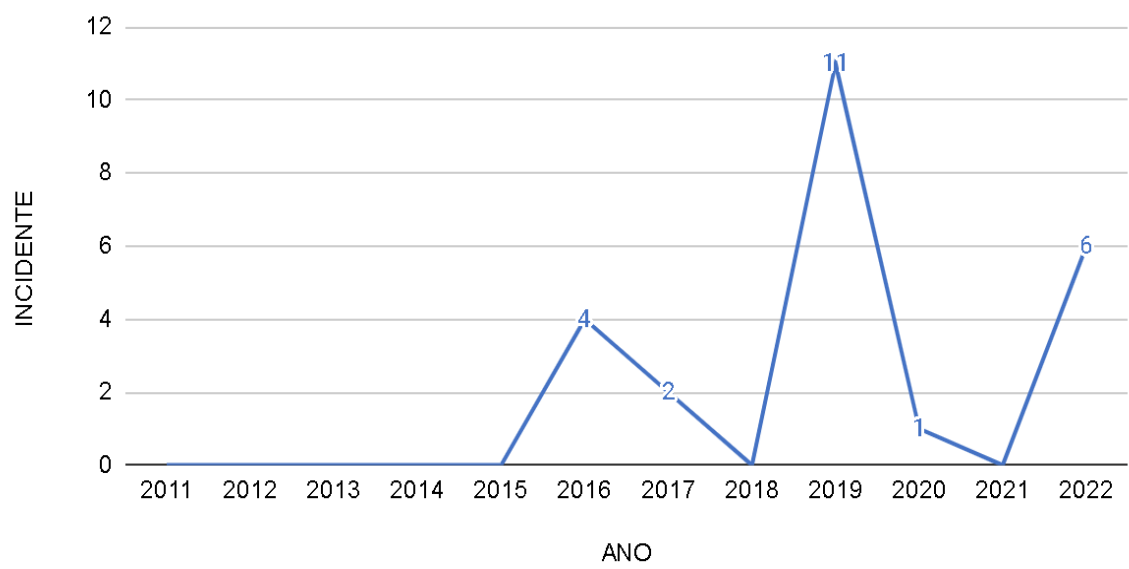
Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM (2007), a mineradora foi responsabilizada pelo acidente, uma vez que a causa foi uma falha na estrutura da barragem que não havia sido corrigida pela Mineração Rio Pomba.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS INCIDENTES REGISTRADOS EM BARRAGENS DE REJEITOS SEGUNDO OS RSB's

5.2.1 Número de incidentes

Os Relatórios de Segurança de Barragens (RSB's) apresentam um número significativo de incidentes ocorridos em barragens no Brasil, não só de rejeitos. Entre os anos de 2011 e 2022 foi contabilizada a ocorrência de vinte e quatro (24) incidentes em barragens de rejeitos, conforme ilustra o Gráfico 8.

Gráfico 8 - Número de incidentes



Fonte: Autor (2023).

5.2.2 Tipos de anomalias

As anomalias em barragens de rejeitos podem levar a uma série de incidentes, representando riscos significativos para a segurança das estruturas e do meio ambiente. O Quadro 5 apresenta as anomalias que geraram a ocorrência dos vinte e quatro (24) incidentes registrados em barragens de rejeitos nos RSB’s entre os anos de 2011 e 2022.

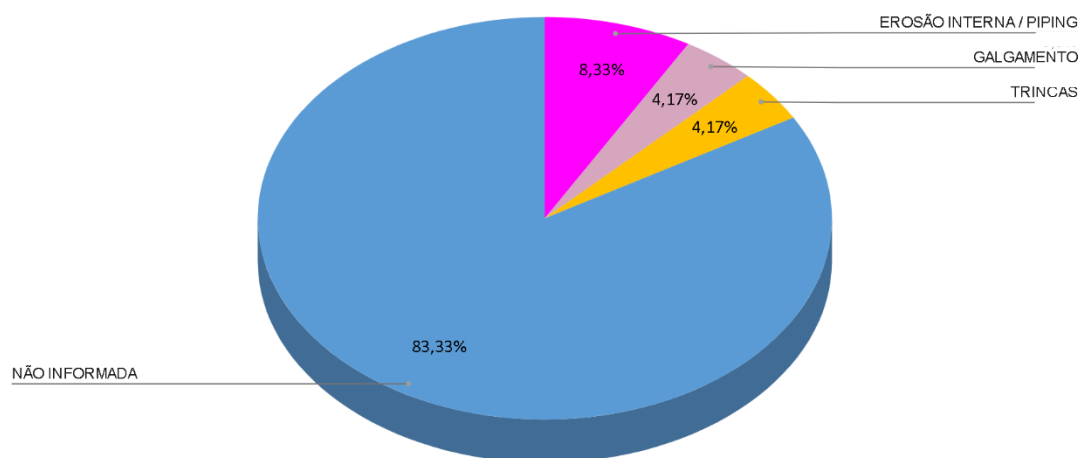
Quadro 5 - Tipos de anomalias

TIPO DE ANOMALIA	QUANTIDADE DE INCIDENTES	PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO TOTAL DE INCIDENTES (%)
NÃO INFORMADA	20	83,33%
EROSÃO INTERNA / PIPING	2	8,33%
GALGAMENTO	1	4,17%
TRINCAS	1	4,17%
TOTAL	24	100,00%

Fonte: Autor (2023).

O Gráfico 9 ilustra os tipos de anomalias que provocaram os incidentes em barragens de rejeitos entre os anos de 2011 e 2022.

Gráfico 9 - Tipos de anomalias



Fonte: Autor (2023).

Dentre os incidentes ocorridos em barragens de rejeitos, vinte (20) deles (83,33%) não informaram nos RSB's o tipo da anomalia que gerou o evento. É importante registrar que durante o levantamento dos dados dos acidentes e dos incidentes publicados nos relatórios da ANA foi evidenciado a ausência de muitas informações que são de suma importância para entender o evento ocorrido. Constata-se também que há uma ausência de padronização para o registro desses eventos nos RSB's por parte dos órgãos responsáveis por esta atividade, o que pode dificultar a análise mais detalhada da anomalia, bem como a tomada de decisão para correção do problema. Santos (2023) propõe um modelo de um formulário de coleta de informações sobre acidentes e incidentes ocorridos em barragens que leva em consideração todas as informações mais importantes para o registro desses dois eventos, o que contribuiria para a análise dessas ocorrências, o levantamento de suas causas e a tomada de ações necessárias para a reparação do problema, além de promover uma divulgação clara e precisa do evento para todas as partes interessadas.

Alguns dos tipos de anomalias que podem resultar em incidentes em barragens de rejeitos são:

- **Erosão interna / Piping:** A erosão interna é uma anomalia que pode levar a incidentes graves em barragens de rejeitos. Ela ocorre quando a água passa por

caminhos indesejados dentro da estrutura, removendo progressivamente partículas de solo ou rejeitos e enfraquecendo a estabilidade da barragem. A erosão interna pode resultar na formação de canais preferenciais, aumentando o risco de ruptura e liberação de rejeitos.

- **Galgamento:** É uma anomalia grave que pode ocorrer em barragens de rejeitos e representa um risco significativo para a sua estabilidade e segurança. Esse fenômeno acontece quando as águas de um reservatório ultrapassam o nível de contenção da barragem, transbordando e se espalhando para áreas além da estrutura projetada para conter os rejeitos.
- **Trinca:** A trinca é uma forma comum de anomalia encontrada em barragens de rejeitos e podem ter várias origens e características. Trincas são fissuras ou fraturas que ocorrem nas estruturas da barragem, como no concreto, nas paredes dos diques ou nos taludes e podem variar em tamanho, extensão e profundidade.

Por tudo isso, é crucial realizar inspeções regulares, monitorar a integridade da estrutura e implementar ações corretivas adequadas para garantir a segurança e minimizar os riscos associados a essas obras.

5.2.3 Local das anomalias

O local de uma anomalia em barragens de rejeitos é uma área específica onde são identificadas irregularidades ou problemas que possam comprometer a estabilidade e a segurança da estrutura. Essas anomalias podem variar tanto em natureza como em gravidade, abrangendo desde pequenas falhas e deformações até rachaduras significativas e instabilidade estrutural.

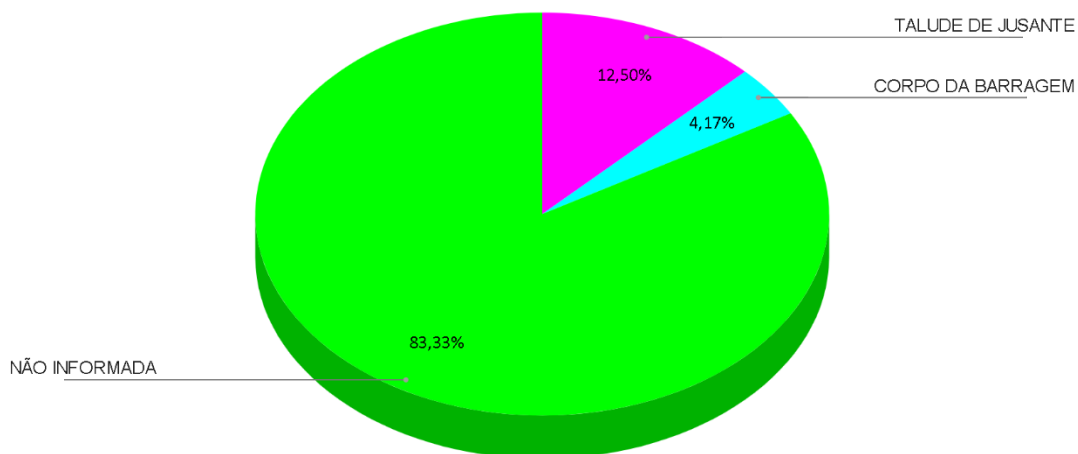
A identificação precoce e precisa do local de ocorrência de uma anomalia é crucial para a gestão e a manutenção adequadas da barragem. No entanto, é importante ressaltar que a presença de uma anomalia não necessariamente indica que a barragem está em iminente perigo de ruptura. Contudo, é um sinal de alerta para a necessidade de avaliações mais detalhadas, análises de risco e implementação de medidas corretivas, a fim de evitar possíveis colapsos com consequências devastadoras.

O Quadro 6 e o Gráfico 10 apresentam os locais das barragens de rejeitos que mais apresentaram anomalias, provocando incidentes nessas obras.

Quadro 6 - Local das anomalias

LOCAL DA ANOMALIA	QUANTIDADE DE INCIDENTES	PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO TOTAL DE INCIDENTES (%)
NÃO INFORMADA	20	83,33%
TALUDE DE JUSANTE	3	12,50%
CORPO DA BARRAGEM	1	4,17%
TOTAL	24	100,00%

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 10 - Local das anomalias

Fonte: Autor (2023).

5.2.4 Plano de Ação de Emergência (PAE)

Em um Plano de Ação de Emergência (PAE) os níveis de resposta podem ser classificados em diferentes categorias, dependendo da gravidade e complexidade da situação de emergência.

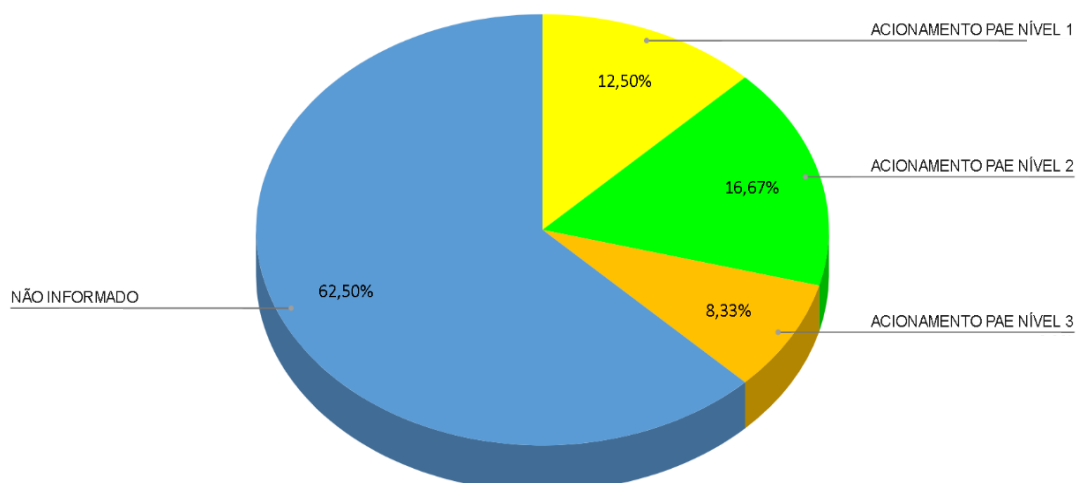
O Quadro 7 e o Gráfico 11 apresentam os níveis de acionamento do PAE para os vinte e quatro (24) incidentes ocorridos em barragens de rejeitos registrados nos RSB's. É importante destacar que em 62,5% dos incidentes publicados nos relatórios da ANA não foram informados se houve, ou não, o acionamento do PAE da barragem devido à ocorrência do incidente.

Quadro 7 - Acionamento do PAE

TIPO DO ACIONAMENTO DO PAE	QUANTIDADE DE INCIDENTES	PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO TOTAL DE INCIDENTES (%)
NÃO INFORMADO	15	62,50%
ACIONAMENTO NÍVEL 1	3	12,50%
ACIONAMENTO NÍVEL 2	4	16,67%
ACIONAMENTO NÍVEL 3	2	8,33%
TOTAL	24	100,00%

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 11 - Acionamento do Plano de Ação de Emergência (PAE)



Fonte: Autor (2023).

De uma maneira geral, o PAE de uma barragem de rejeitos pode apresentar três diferentes níveis de resposta, a saber:

- **Nível 1 - Alerta ou Prevenção:** No Nível 1 as ações são voltadas para a prevenção de situações de emergência. Nesse estágio são tomadas medidas proativas para reduzir riscos, melhorar a segurança e a capacidade de resposta.
- **Nível 2 - Alerta ou Emergência:** No Nível 2 ocorre uma situação de emergência real ou iminente. As ações nesse estágio são voltadas para a resposta imediata e efetiva à emergência.

- **Nível 3 - Alerta ou Crise:** No Nível 3 ocorre uma situação de emergência grave e complexa, exigindo uma resposta intensificada e coordenação efetiva.

É importante destacar que o objetivo principal do PAE é definir as ações a serem tomadas para minimizar os riscos e impactos decorrentes de uma situação de emergência. Desta forma, esse documento deve ser elaborado levando em consideração as características específicas da barragem, como sua localização, tamanho, capacidade de armazenamento, características geotécnicas e hidrológicas.

5.2.5 Causa dos incidentes

Os incidentes em barragens de rejeitos podem ocorrer devido a uma variedade de causas, que incluem fatores técnicos, operacionais e ambientais. Embora cada incidente seja único, algumas das causas prováveis comuns são problemas de projeto, má gestão operacional, falhas geotécnicas, excesso de carga, condições climáticas extremas, falhas de monitoramento e alerta e, por fim, falta de fiscalização e regulamentação adequadas.

O Quadro 8 e o Gráfico 12 apresentam as causas que provocaram os vinte e quatro (24) incidentes ocorridos em barragens de rejeitos registrados nos RSB's. Ressalta-se que 83,34% dos incidentes registrados não informaram a causa que gerou esse incidente.

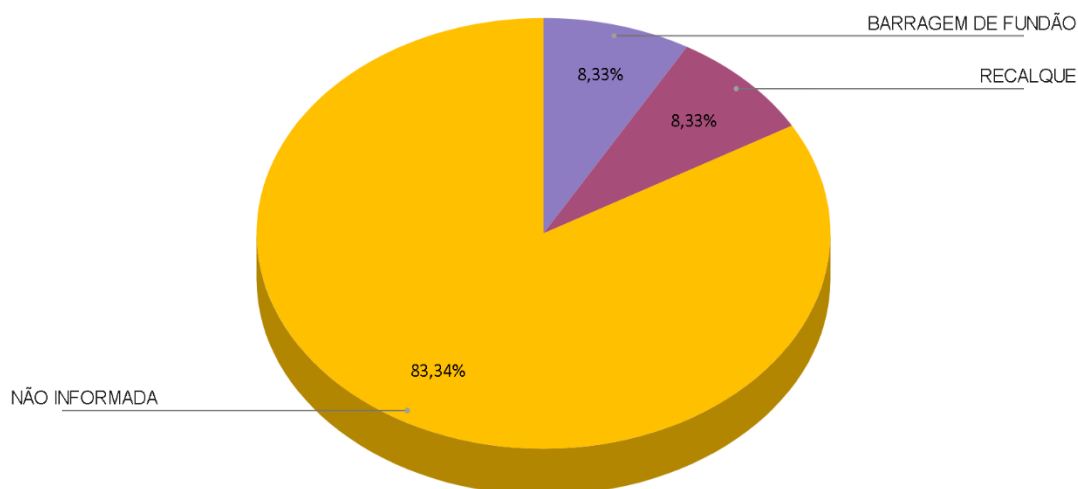
Como dito anteriormente para os acidentes, a ausência de informações sobre as causas que ocasionaram os incidentes é preocupante, pois dificulta a análise precisa do surgimento do evento, bem como a identificação de medidas preventivas e corretivas necessárias para evitar a ocorrência de outros sinistros.

Quadro 8 - Causas dos incidentes

CAUSA DO INCIDENTE	QUANTIDADE DE INCIDENTES	PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO TOTAL DE INCIDENTES (%)
NÃO INFORMADA	20	83,34%
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO (ROMPIMENTO DE BARRAGENS EM CASCATAS)	2	8,33%
RECALQUE	2	8,33%
TOTAL	24	100,00%

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 12 - Causas dos incidentes



Fonte: Autor (2023).

Para garantir a segurança das barragens de rejeitos é fundamental que as entidades responsáveis pela fiscalização das barragens realizem uma investigação minuciosa de cada incidente, identificando e documentando as causas de forma precisa. Isso permitirá uma análise mais aprofundada e uma compreensão mais clara dos fatores que contribuem para os incidentes, possibilitando a implementação de medidas preventivas mais efetivas.

Além disso, é essencial promover a transparência e a divulgação adequada das informações relacionadas aos incidentes em barragens de rejeitos nos RSB's. Isso permite o compartilhamento de conhecimento, aprendizado com os erros e a adoção das melhores práticas para a correta manutenção e monitoramento desse tipo de obra, contribuindo para a prevenção de futuros incidentes e/ou acidentes, garantindo a segurança da população e do meio ambiente.

5.2.6 Empreendedor / Fiscalizador

O empreendedor de barragens de rejeitos é o responsável pela construção, operação e manutenção dessas estruturas. Ele é o proprietário ou a entidade responsável pelo projeto e pela gestão da barragem. Assim sendo, o empreendedor deve garantir que a barragem seja construída de acordo com padrões técnicos adequados, respeitando as normas de segurança e as regulamentações ambientais vigentes.

O Quadro 9 apresenta os empreendedores das barragens de rejeitos que sofreram incidentes entre os anos de 2011 e 2022. A Vale é a companhia que durante esses anos apresentou o maior número de incidentes em barragens de rejeitos, totalizando 33,32%.

Quadro 9 - Empreendedores das barragens de rejeitos

EMPREENDEDOR	QUANTIDADE DE INCIDENTES	PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO TOTAL DE INCIDENTES (%)
ARCELORMITTAL BRASIL	2	8,33
CONCRESAND MINERAÇÃO LTDA	1	4,17
EMICON MINERAÇÃO E TERRAPLENAGEM LTDA.	1	4,17
FERROUS RESOURCES DO BRASIL S.A.	2	8,33
INDÚSTRIA COMÉRCIO E SERVIÇOS S. A	1	4,17
JACOBINA MINERAÇÃO E COMÉRCIO LTDA.	1	4,17
MINERAÇÃO SERRAS DO OESTE EIRELI	1	4,17
MOSAIC FERTILIZANTES	1	4,17
NACIONAL MINÉRIOS	1	4,17
NEXA RESOURCES S. A	1	4,17
SAMARCO MINERAÇÃO	2	8,33
VALE S.A.	8	33,32
NÃO INFORMADO	2	8,33
TOTAL	24	100,00%

Fonte: Autor (2023).

Dentre as principais responsabilidades do empreendedor de uma barragem de rejeitos, citam-se:

- **Projeto e construção:** O empreendedor é responsável por elaborar o projeto da barragem, considerando aspectos como a escolha do local, as características geotécnicas, os sistemas de drenagem, os sistemas de contenção e outros elementos de engenharia. Ele também é responsável pela execução da construção da barragem, garantindo que todas as etapas sejam realizadas conforme o projeto e dentro dos padrões de qualidade e segurança estabelecidos.
- **Operação e manutenção:** O empreendedor é encarregado de operar a barragem de forma segura e eficiente. Isso inclui a implementação de procedimentos operacionais adequados, monitoramento regular das condições da barragem,

inspeções de rotina, manutenção preventiva e corretiva, controle de níveis de água e rejeitos, entre outros aspectos. O objetivo é garantir a estabilidade da barragem e prevenir a ocorrência de incidentes.

- **Monitoramento ambiental:** O empreendedor deve realizar o monitoramento ambiental da área ao redor da barragem, verificando possíveis impactos nos recursos hídricos, na fauna, na flora e no solo. Isso inclui a coleta e análise de amostras, a medição de parâmetros ambientais relevantes e a adoção de medidas para mitigar impactos negativos.

Por outro lado, o fiscalizador de barragens de rejeitos é uma entidade governamental, regulatória ou de órgãos fiscalizadores responsável pela supervisão e fiscalização das barragens. O órgão fiscalizador tem o papel de garantir o cumprimento das normas e regulamentos aplicáveis às barragens de rejeitos, garantindo a proteção do meio ambiente e das comunidades circunvizinhas, além de garantir a segurança das estruturas.

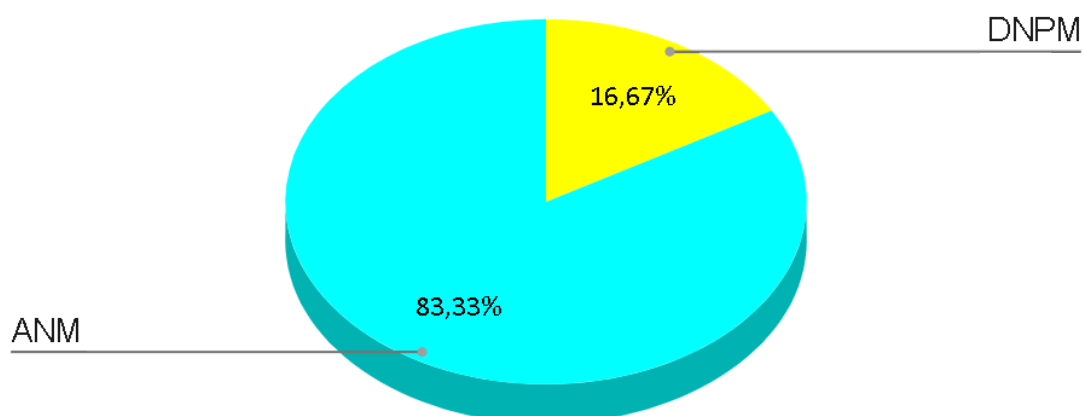
O Quadro 10 e o Gráfico 13 ilustram que a Agência Nacional de Mineração (ANM) é o órgão fiscalizador responsável por 83,33% das barragens de rejeitos que sofreram algum incidente entre os anos de 2011 e 2022.

Quadro 10 - Órgãos fiscalizadores

ÓRGÃO FISCALIZADOR	QUANTIDADE DE INCIDENTES	PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO TOTAL DE INCIDENTES (%)
ANM	20	83,33%
DNPM	4	16,67%
TOTAL	24	100,00%

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 13 - Órgãos fiscalizadores



Fonte: Autor (2023).

É importante ressaltar que o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) não possui mais responsabilidade direta pela fiscalização de barragens desde a criação da ANM em 2019. O DNPM, até então, desempenhava um papel significativo na regulamentação e supervisão das atividades de mineração no Brasil, incluindo as barragens de mineração. Após a criação da ANM, suas atribuições específicas relacionadas à fiscalização de barragens foram transferidas para esta nova agência.

Dentre as principais responsabilidades do órgão fiscalizador de uma barragem de rejeitos, destacam-se:

- **Inspecção e monitoramento:** O fiscalizador realiza inspeções regulares nas barragens de rejeitos para verificar seu estado de conservação, a conformidade com os padrões de segurança e a conformidade com as normas e regulamentos estabelecidos. Essas inspeções podem ser agendadas ou surpresas, e podem incluir a análise de documentação, a verificação das condições da barragem e a avaliação dos sistemas de gestão implementados pelo empreendedor.
- **Avaliação de relatórios e planos:** O fiscalizador analisa e avalia os relatórios de segurança de barragens (RSB's) e outros documentos apresentados pelo empreendedor. Esses relatórios fornecem informações sobre a operação, manutenção e monitoramento da barragem, bem como sobre eventuais acidentes ou incidentes ocorridos. O fiscalizador verifica se as informações são completas, precisas e cumprem as exigências legais.

- **Imposição de medidas corretivas:** Se forem identificadas não conformidades ou deficiências na operação ou na segurança da barragem, o fiscalizador pode impor medidas corretivas ao empreendedor. Isso pode incluir a exigência de melhorias na infraestrutura da barragem, a implementação de planos de emergência, a adoção de medidas adicionais de monitoramento ou a suspensão temporária ou definitiva da operação da barragem, se necessário.

Tanto o empreendedor quanto o fiscalizador desempenham papéis fundamentais na gestão adequada das barragens de rejeitos. A colaboração entre ambos, aliada ao cumprimento das normas e regulamentações, é essencial para garantir a segurança das estruturas, a proteção do meio ambiente e a prevenção de incidentes prejudiciais.

5.2.7 Comparativo dos acidentes e incidentes

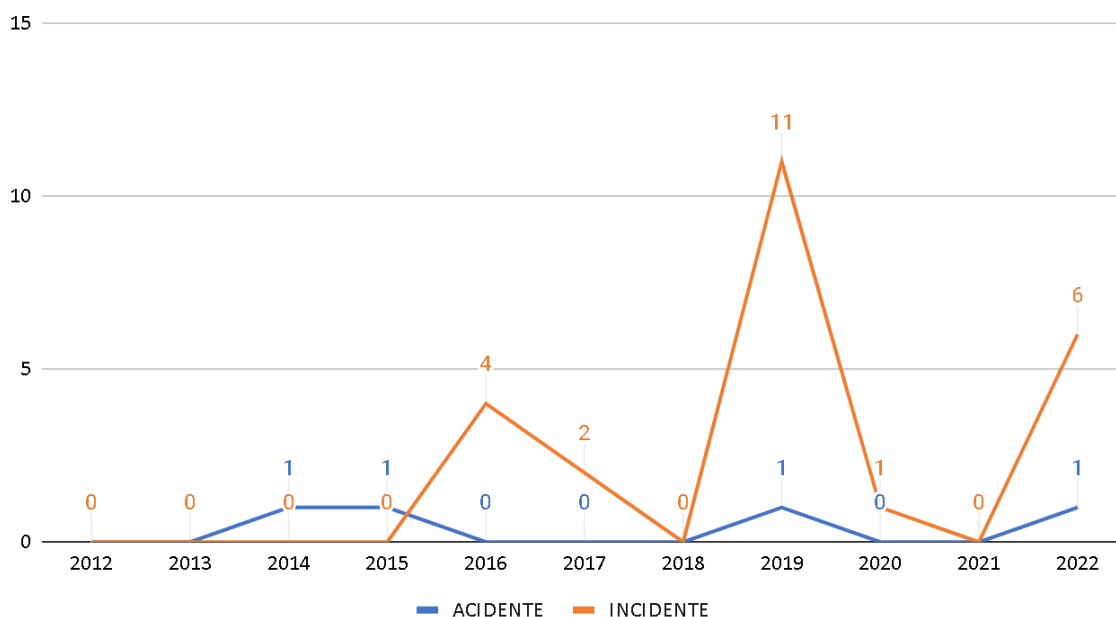
Pode-se afirmar que o número de acidentes ocorridos em barragens de rejeitos e publicados nos RSB's da ANA expressa, fidedignamente, a realidade desse evento, visto que um acidente em uma barragem de rejeito não é possível passar despercebido nem pela comunidade aonde a obra encontra-se localizada, nem muito menos pela mídia. Como se sabe, uma barragem de rejeitos é, em geral, uma obra de grande vulto que ao gerar um acidente (sofrer colapso) provoca danos de grande magnitude, difíceis de não serem percebidos.

Contudo, o número de incidentes divulgados nos RSB's para este tipo de estrutura pode não condizer com a realidade da ocorrência desse tipo de evento pois, segundo a ANM (2023), existem no Brasil cerca de novecentas e dezenove (919) barragens de rejeitos, um número considerado muito expressivo devido ao intenso processo de extrativismo existente no país.

O registro de um incidente é de extrema importância, pois pode ajudar a mitigar ou até mesmo prevenir a ocorrência de um acidente. Ao registrar um incidente, busca-se não só identificar e tratar as causas desse evento, mas também evitar que o mesmo se repita ou que venha a gerar um acidente, o que é, em geral, um episódio de maior relevância, servindo este registro também de experiência e aprendizado para evitar outros acontecimentos de mesma natureza em obras similares.

Como ilustra o Gráfico 14, o número de acidentes ocorridos em barragens de rejeitos é, consideravelmente, menor se comparado com o número de incidentes, porém o seu impacto é bastante significativo.

Gráfico 14 - Comparativo entre acidentes e incidentes



Fonte: Autor (2023).

Logo, espera-se que haja uma maior transparência e conscientização por parte dos órgãos empreendedores e fiscalizadores no que concerne ao registro nos RSB's dos acidentes e incidentes em barragens de rejeitos, visto que apesar de permitir que possa ser realizado um levantamento do histórico desses acontecimentos, não é possível ainda, devido à deficiência das informações divulgadas nesses relatórios, realizar um mapeamento das principais anomalias relacionadas a esses eventos, e de suas causas, informações estas que contribuiriam para aprimorar continuamente a gestão dessas obras, bem como para promover uma melhoria das políticas e regulamentações de segurança em barragens de rejeitos.

6 CONCLUSÃO

De uma maneira geral, barragens são grandes obras da Engenharia, projetadas e construídas para armazenar água ou rejeitos, sendo de extrema importância garantir a sua segurança durante toda a sua vida útil.

As barragens de rejeitos são estruturas de terra que armazenam resíduos provenientes do beneficiamento de um processo de mineração, que apesar de não possuírem nenhum um valor econômico, devem ser armazenados adequadamente em virtude do elevado impacto econômico, social e ambiental que podem gerar caso estas estruturas venham a sofrer colapso.

Tomando-se como base os dados publicados nos Relatórios de Segurança de Barragens (RSB's), elaborados anualmente pela ANA, este trabalho buscou realizar uma análise estatística dos acidentes e incidentes ocorridos em barragens de rejeitos entre os anos de 2011 e 2022. Através dessa análise, foi possível quantificar esses eventos, bem como analisar as principais anomalias e causas que geraram a sua ocorrência, e os locais mais recorrentes de surgimento dessas anormalidades.

Verificou-se que a erosão interna (piping) é uma anomalia que aparece como geradora tanto de acidente quanto de incidente em barragem de rejeitos devido à liquefação da lama acumulada por este tipo de obra, causando o rompimento do talude de jusante.

Foi constatado também que o acionamento do Plano de Ação de Emergência (PAE) não é uma prática comum a ser implementada pelos empreendedores de barragens de rejeitos, tanto nos casos de acidentes quanto de incidentes. Este documento é de suma importância e deve ser acionado em caso de sinistros pois define os procedimentos de resposta a situações emergenciais que ameacem a estrutura do barramento.

Um fator importante a ser destacado é que durante o desenvolvimento deste estudo foi constatada a falta de completude das informações publicadas nos RSB's, o que dificultou uma análise mais detalhada dos indicadores avaliados, limitando a amostragem dos dados, além da falta de padronização no registro das informações sobre os acidentes e incidentes ocorridos em barragens pelos órgãos fiscalizadores responsáveis por essa atividade.

Por sua vez, ressalta-se também a falta de padronização na descrição dos acidentes e incidentes, visto que os relatórios apresentam diferentes abordagens para relatar esses eventos. Essa disparidade ocorre porque as informações sobre cada acidente ou incidente

são coletadas por diversas entidades encarregadas de fiscalizar esse tipo de obra. É importante lembrar que essas fontes de informação variam, o que contribui para a falta de uniformidade desses relatos.

Em resumo, a análise estatística dos acidentes e incidentes em barragens de rejeitos desempenha um papel crucial na identificação de fatores de risco, na avaliação da eficácia das medidas preventivas e corretivas, e na formulação de leis e práticas de gestão mais seguras.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se realizar uma análise das barragens de rejeitos cadastradas no SNISB, no que se refere ao dano potencial associado (DPA) e ao nível de perigo global da barragem (NPGB), bem como a análise de outras barragens de contenção, tais como as barragens de contenção de resíduos industriais e de sedimentos, as quais também são suscetíveis em gerar vítimas e danos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Entenda o Relatório de Segurança de Barragens: versão síntese em linguagem simplificada.**

Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2021. Disponível em: < snisb.gov.br/relatorio-anual-de-segurancade-barragem/RSB_LinguagemSimples>. Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Monitoramento de barragens.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-de-barragens/monitoramento-de-barragens>. Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2014.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2015. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2015.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2016. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2016.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2017. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2017.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2018. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2018.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2019. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2019.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2020. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2020.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2021. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório de Segurança de Barragens 2021.** Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). 2022. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores>> Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório Técnico sobre a Situação das Barragens no Brasil.** 2014. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-tecnicos/barragens_2021_web.pdf. Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório Técnico sobre a Situação das Barragens no Brasil.** 2016. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-tecnicos/barragens_2021_web.pdf. Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Relatório Técnico sobre a Situação das Barragens no Brasil.** 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-tecnicos/barragens_2021_web.pdf. Acesso em 03 de maio de 2023.

—————. **Segurança de barragens: conceitos, terminologia e metodologia.** 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-de-barragens/publicacoes/seguranca-de-barragens-conceitos-terminologia-e-metodologia.pdf>. Acesso em 03 de maio de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Guia de Segurança de Barragens - Módulo 3: Operação e Manutenção de Barragens de Mineração.** Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens-de-mineracao/publicacoes/guia-de-seguranca-de-barragens-modulo-3-operacao-e-manutencao-de-barragens-de-mineracao>. Acesso em 03 de maio de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resumo campanha entrega DCE**, setembro 2019. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/apoio>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

----- . **Report Mensal Barragens de Mineração: Operação e Manutenção de Barragens de Mineração**. Brasília, 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/boletim-mensal-maio-2023.pdf> >. Acesso em 17 de junho de 2023.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 696/2015**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.com.br/>. Acesso em 17 de maio de 2023.

ANGELO, Maurício. **Estrutura da Vallourec que cedeu em MG teve reunião extraordinária, licenciamento expresso e alertas de ambientalistas em sua ampliação**. 2022. Disponível em: < <https://observatoriodamineracao.com.br/exclusivo-estrutura-da-vallourec-que-cede-u-em-mg-teve-reuniao-extraordinaria-licenciamento-expresso-e-alertas-de-ambientalistas-em-sua-ampliacao/>>. Acesso em 22 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13.028: **Mineração - Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ÁVILA, J. P. Mesa **Redonda Sobre Segurança de Barragens**. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, Comitê Brasileiro de Barragens, 24 de abril de 2008, Belo Horizonte, Minas Gerais. [Apresentação PowerPoint]. Disponível em: < http://cbdb.org.br/xxxxsngb/download/trabalhos_temas/12-05/tarde/Erton%20Carvalho/CBDB-RELATOR-ERTON-XXX-SNGB.pdf >. Acesso em: 05 de abril de 2023.

BRASIL. Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em 17 de maio de 2023.

BRASIL. Resolução No 4.327, de 25 de abril de 2014. **Diário Oficial da União, Brasília**, DF, 28 de abril de 2014. Disponível em: http://www.bcb.gov.br/pre/normativos/busca/downloadNormativo.asp?arquivo=/Lists/Normativos/Attachments/48557/Res_4327_v1_O.pdf. Acesso em: 20 de abril de 2023.

----- . Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1º de outubro de 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm. Acesso em: 20 de abril de 2023.

----- Lei Nº 70.389, de 16 de março de 2017. **Estabelece os procedimentos para o transporte rodoviário de produtos perigosos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 de março de 2017. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/images/Resolucoes/Resolucao6852017.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2023.

BROWN, A. **Design and Construction of Waste Containment Facilities**. CRC Press. 2019.

CARVALHO et al., G.B., (2020). **Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito**, Tese de M.sc, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, MG, Brasil.

CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (São Paulo) (Org.). **Rompimento de barragem da Mineração Rio Verde, em Nova Lima (MG) deixa mortos e destruição ambiental**. 2016. Acesso em 06 de maio de 2023.

----- . **Rompimento de barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases afeta qualidade da água em MG e no RJ**. 2012. Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/mariana/verbeterio-pomba.pdf> >. Acesso em 06 de maio de 2023.

DINIZ, N.C. et al. 2006. **Casos históricos de ruptura de presas de relaves en Brasil**: propuesta de geoindicadores para el monitoreo. Boletín Geológico y Minero, 117 (2): 265-275 ISSN: 0366-0176. Disponível em: <http://www.igme.es/Boletin/2006/117_2_2006/Art.4.PDF >. Acesso em 13 de junho de 2023.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **DNPM vistoria e paralisa mineradora em Mirai.** 2007. Disponível em: <
<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=99&IDPagina=72&IDNoticiaNoticia=236>>. Acesso em 12 de março de 2023.

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente. Ministério Público de Minas Gerais (Org.). **Parecer Técnico DIMIM 057/2006: Rio Pomba Empresa de Mineração Ltda.** Belo Horizonte: Feam. 2006. 7 p. Processo COPAM: Nº 201/1986/031/2006 Processo DNPM: 831.090/1981.

—————. **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais Ano 2007.** Belo Horizonte: Feam-dger-gerim-rt-03/2015. 2016. 54 p. Disponível em:
[http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERAÇÃO/Inventário de Barragens 2015 Final V01.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERAÇÃO/Inventário_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf)>. Acesso em de 15 abril de 2023.

FERREIRA, Bárbara (Org.). **Minas Gerais vira ‘refém’ da mineração em relação perigosa.** 2015. Publicado pelo Jornal O Tempo. Disponível em: <
<http://www.otempo.com.br/cidades/minas-gerais-vira-ref%C3%A9m-damineira%C3%A7%C3%A3o-em-rela%C3%A7%C3%A3o-perigosa-1.1185431> >. Acesso em 20 de setembro de 2022.

G1. **Entenda o que é a liquefação: fenômeno que pode levar barragens ao colapso.** 2019. Disponível em: <
<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/07/entenda-o-que-e-a-liquefacao-fenomeno-que-pode-levar-barragens-ao-colapso.ghtml>>. Acesso em 22 de maio de 2023.

GARCIA, M., et al. **Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities.** Springer. 2017.

JONES, B. **Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities.** Springer. 2018.

LARCHER, Marta Alves. **A responsabilidade civil decorrente de acidentes ambientais deflagrados por eventos da natureza - o caso do rompimento da barragem de rejeitos em Mirai.** Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, v. 1, N. 1, p. 48-52, 2012. Edição especial Mineração.

LAURIANO, André William. **ESTUDO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE FUNIL: COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS FLDWAV E HEC-RAS.** 2009.

251 f. Monografia (Especialização) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LIMA, Sara. **Caracterização e Análise dos Acidentes com Barragens de Rejeito de Mineração no Estado de Minas Gerais.** 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação Lato Sensu à distância) - Universidade Federal Do Pará, Belém.

MELO, Leonardo Pires Reis de. **Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: Caso hipotético da barragem Tico-Tico.** 2013. 199 f. Monografia (Especialização) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Cap. 3

OLIVEIRA, A. L. et al. **Manual de Barragens de Rejeitos: Aspectos Técnicos e Operacionais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

PARRA, P.C.; LASMAR, N.T. **Ruptura da barragem de rejeito da Mina de Fernandinho.** In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, REGEO'87. 1987, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, 1987. v. 1, p. 423-444.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** 2005. 210 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005. Cap. 3.

PEREIRA, Frank Marcos da Silva. **Gestão de riscos e plano de ações emergenciais aplicado à barragem de contenção de rejeitos Casa de Pedra/CSN.** 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/110654055-Dissertacao-de-mestrado.html>. Acesso em 22 de março de 2023.

RESENDE, Diego Alves de. **Análise Probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos.** 2013. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Cap. 2.

RINALDI, M. et al. **Guidelines for the Analysis, Design and Construction of Tailings Dams**. International Commission on Large Dams (ICOLD). 2014.

ROBERTSON, P. K. **Liquefaction and Flow Failure of Tailings Dams: Analysis and Design Considerations**. GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. ASCE. 2011.

RODRIGUES. **Vale poderia ter acionado plano de emergência da barragem e evitado mortes em Brumadinho**. 2019. Disponível em: <https://www.sargentorodrigues.com.br/index.php/noticias/3956-vale-poderia-ter-acionado-plano-de-emergencia-da-barragem-e-evitado-mortes-em-brumadinho>. Acesso em 07 de julho de 2023.

SANTOS, Isabela Victoria dos. **Análise Estatística sobre Segurança de Barragens Fundamentada no Relatório de Segurança de Barragens (RSB): Estudo de Acidentes e Incidentes**. 106 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - Campus Aracaju. 2023.

SILVA, G. L. et al. **Characterization of tailings from Itabirite Iron Ore Processing: Potential for Utilization in Geotechnical Applications**. 2019. Minerals, 9(2), 105.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração**. 2007. Revista Espaço da Sophia. N. 08, Ano I, Novembro/2007.

SMITH, J. **A importância da segurança de barragens de rejeitos**. 2021. Journal of Engineering and Environmental Sciences, 15(2), 40-50.

SMITH, J., et al. **Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities**. CRC Press. 2019.

SOARES, L. Barragem de Rejeitos. In: CETEM/MCT. **Tratamento de Minérios**. 5. ed., Rio de Janeiro: Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; França, S. C. A., 2010. p. 831-896.

WATANABE, Roberto Massaru. **Barragem segurança Watanabe explica**. 2019. Disponível em: < <https://www.ebanataw.com.br/talude/barragem.htm> >. Acesso em 13 de julho de 2023.

APÊNDICE A

PLANILHA DE ACIDENTES EM BARRAGENS

DE REJEITOS

PERÍODO: 2011 A 2022

PLANILHA DE ACIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS - PERÍODO: 2011 A 2022

ANO	ACIDENTE	NOME DA BARRAGEM	PORCENTAGEM DE ACIDENTES EM RELAÇÃO AO TOTAL (%)	ESTADO	MUNICÍPIO	REGIÃO	DATA DO EVENTO	DATA DE IDENTIFICAÇÃO DO EVENTO	ALTURA DA BARRAGEM (m)	VOLUME DA BARRAGEM (hm³)	Nº DE VÍTIMAS	Nº DE MORTES
2011	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	1	MINERADORA HERCULANO	25	MINAS GERAIS	ITABIRITO	SUDESTE	10/09/2014	15/09/2014	-	-	8	3
2015	1	FUNDÃO	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	0	-	0	MINAS GERAIS	MARIANA	SUDESTE	05/11/2015	05/11/2015	100,0	41,00	1.200	19
2017	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	1	B1	25	MINAS GERAIS	BRUMADINHO	SUDESTE	25/01/2019	25/01/2019	86,0	11.741,32	39.520	270
2020	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2022	1	BELÍSSIMA	25	RONDÔNIA	ARIQUEMES	NORTE	08/01/2022	08/01/2022	4,5	964.280,00	0	0
TOTAL	4	-	100	-	-	-	-	-	-	-	40.728	292

PLANILHA DE ACIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS - PERÍODO: 2011 A 2022

ANO	ACIDENTE	NOME DA BARRAGEM	PREJUÍZOS CAUSADOS (R\$)	EMPREENDEDOR	FISCALIZADOR	PAE	LOCAL DA ANOMALIA	TIPO DE ANOMALIA	MÉTODO DE DETECÇÃO DO ACIDENTE	CAUSA DO ACIDENTE
2011	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	1	MINERADORA HERCULANO	30.000.000,00	HERCULANO MINERAÇÃO LTDA.	-	-	CORPO DA BARRAGEM	EROSÃO INTERNA	-	EROSÃO INTERNA
2015	1	FUNDÃO	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	0	-	20.000.000.000,00	SAMARCO MINERAÇÃO	DNPM	-	CORPO DA BARRAGEM	ROMPIMENTO	DETECÇÃO PÓS ACIDENTE	LIQUEFAÇÃO DOS EFLUENTES
2017	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	1	B1	10.000.000.000,00	VALE S.A.	ANM	FOI ACIONADO	-	-	-	-
2020	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2022	1	BELÍSSIMA	200.000,00	COOPERSANTA	ANM	NÃO FOI ACIONADO	-	-	-	-
TOTAL	4	-	30.030.200.000,00	-	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE B

PLANILHA DE INCIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS

PERÍODO: 2011 A 2022

PLANILHA DE INCIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS - PERÍODO: 2011 A 2022

ANO	INCIDENTE	NOME DA BARRAGEM	% DE INCIDENTES EM RELAÇÃO AO TOTAL (%)	ESTADO	MUNICÍPIO	REGIÃO	DATA DO EVENTO	DATA DE IDENTIFICAÇÃO DO EVENTO	ALTURA DA BARRAGEM (m)	VOLUME DA BARRAGEM (hm³)	EMPREENDEDOR	FISCALIZADOR	PAE
2011	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	4	ITABIRUÇU	16,67	MINAS GERAIS	ITABIRA	SUDESTE	NÃO INFORMADO	10/03/2016	63,0	151,05	VALE S.A.	DNPM	-
2016		DIQUE B3		MINAS GERAIS	BRUMADINHO	SUDESTE	NÃO INFORMADO	02/03/2016	-	0,01	EMICON MINERAÇÃO E TERRAPLANAGEM LTDA	DNPM	-
2016		SANTARÉM		MINAS GERAIS	MARIANA	SUDESTE	NÃO INFORMADO	APÓS O ACIDENTE COM A BARRAGEM DE FUNDÃO	-	-	SAMARCO MINERAÇÃO	DNPM	-
2016		GERMANO		MINAS GERAIS	MARIANA	SUDESTE	NÃO INFORMADO	APÓS O ACIDENTE COM A BARRAGEM DE FUNDÃO	-	-	SAMARCO MINERAÇÃO	DNPM	-

PLANILHA DE INCIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS - PERÍODO: 2011 A 2022

ANO	INCIDENTE	NOME DA BARRAGEM	% DE INCIDENTES EM RELAÇÃO AO TOTAL (%)	ESTADO	MUNICÍPIO	REGIÃO	DATA DO EVENTO	DATA DE IDENTIFICAÇÃO DO EVENTO	ALTURA DA BARRAGEM (m)	VOLUME DA BARRAGEM (hm³)	EMPREENDEDOR	FISCALIZADOR	PAE
2017	2	BAIAS VIGA	8,33	MINAS GERAIS	-	SUDESTE	08/05/2017	08/05/2017	-	-	FERROUS RESOURCES DO BRASIL S.A.	ANM	-
2017		BAIAS VIGA		MINAS GERAIS	-	SUDESTE	23/05/2017	23/05/2017	-	-	FERROUS RESOURCES DO BRASIL S.A.	ANM	-
2018	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	11	SUL SUPERIOR	45,83	MINAS GERAIS	BARÃO DOS COCAIS	SUDESTE	22/03/2019	22/03/2019	-	-	VALE S.A.	ANM	ACIONAMENTO PAE NÍVEL 3
2019		SUL SUPERIOR		MINAS GERAIS	BARÃO DOS COCAIS	SUDESTE	07/02/2019	07/02/2019	-	-	VALE S.A.	ANM	ACIONAMENTO PAE NÍVEL 1
2019		MINA SERRA AZUL		MINAS GERAIS	ITATIA IUÇU	SUDESTE	07/02/2019	07/02/2019	-	-	ARCELORMITTAL BRASIL	ANM	ACIONAMENTO PAE NÍVEL 2
2019		B3 E B4		MINAS GERAIS	NOVA LIMA	SUDESTE	16/02/2019	16/02/2019	-	-	VALE S.A.	ANM	ACIONAMENTO PAE NÍVEL 2
2019		FORQUILHA I, II E III		MINAS GERAIS	ITABIRITO	SUDESTE	20/02/2019	20/02/2019	-	-	VALE S.A.	ANM	ACIONAMENTO PAE NÍVEL 2
2019		B1 E B4		MINAS GERAIS	ARAXÁ	SUDESTE	22/02/2019	22/02/2019	-	-	MOSAIC FERTILIZANTES	ANM	ACIONAMENTO PAE NÍVEL 2

PLANILHA DE INCIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS - PERÍODO: 2011 A 2022

[illegible]

PLANILHA DE INCIDENTES EM BARRAGENS DE REJEITOS - PERÍODO: 2011 A 2022

[illegible]