



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO

INSTITUTO POLITÉCNICO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE COMPUTAÇÃO



Thamires Ramos dos Santos

**O papel da engenharia da computação na prevenção de acidentes
em barragens de rejeitos**

**Nova Friburgo
2025**



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO

INSTITUTO POLITÉCNICO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE COMPUTAÇÃO



Thamires Ramos dos Santos

O papel da engenharia da computação na prevenção de acidentes em barragens de rejeitos

Trabalho de conclusão de curso apresentado como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro de Computação, ao Departamento de Modelagem Computacional, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Edgard Poiate Junior.

Nova Friburgo
2025

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO POLITÉCNICO
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Reitora: Gulnar Azevedo e Silva

Vice-reitor: Bruno Rêgo Deusdará Rodrigues

Diretor do Instituto Politécnico: Lucas Venâncio Pires de Carvalho Lima

Coordenador de Curso: Rodrigo Lamblet Mafort

Banca Avaliadora Composta por: Prof. Edgard Poiate Junior. (Orientador)

Prof. Dr. Banca 1

Prof. Dr. Banca 2

Ficha elaborada pelo autor através do
Sistema para Geração Automática de Ficha Catalográfica da Rede Sirius - UERJ

939 ÚltimoSobrenome, Aluno NomeDoMeio.
 Título do Trabalho / Aluno NomeDoMeio
ÚltimoSobrenome. - 2025.
 20 f.

Orientador: NomeOrientador NomeDoMeioOrientador
ÚltimoSobrenomeOrientador.
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto
Politécnico, para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Computação (IPRJ).

1. Assunto 1 - Monografias. 2. Assunto 2 -
Monografias. 3. Assunto 3 - Monografias. I.
ÚltimoSobrenomeOrientador, NomeOrientador
NomeDoMeioOrientador. II. Universidade do Estado do
Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 004.41

Endereço: UERJ - IPRJ

CEP 28625-570 - Nova Friburgo - RJ - Brasil.

Este trabalho nos termos da legislação que resguarda os direitos autorais é considerado de propriedade da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). É permitida a transcrição parcial de partes do trabalho, ou mencioná-lo, para comentários e citações, desde que sem propósitos comerciais e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Thamires Ramos dos Santos

Thamires Ramos dos Santos

O papel da engenharia da computação na prevenção de acidentes em barragens de rejeitos

Trabalho de conclusão de curso apresentado como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro de Computação, ao Departamento de Modelagem Computacional, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em XX de XXXXXXXX de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Edgard Poiate Junior.
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. Banca 1
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. Banca 2
Instituto Politécnico - UERJ

Nova Friburgo

2025

DEDICATÓRIA

Opcional. Aqui vai a dedicatória do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aqui vão os agradecimentos.

Opcional. Citação de alguma frase ou texto conhecido.

Aqui vai a autoria da frase ou texto

RESUMO

DOS SANTOS, Thamires Ramos. *O papel da engenharia da computação na prevenção de acidentes em barragens de rejeitos.* 2025. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2025.

A mineração desempenha um papel essencial na economia brasileira, contribuindo para o desenvolvimento regional e nacional, além de gerar empregos e impulsionar o PIB. No entanto, a gestão inadequada dos rejeitos resultantes dessas atividades pode acarretar em graves impactos ambientais e sociais, como demonstrado pelos desastres em Mariana e Brumadinho. Diante desse cenário, torna-se urgente aprimorar os sistemas de segurança e prevenção em barragens de rejeitos. A engenharia da computação oferece soluções inovadoras para enfrentar esse desafio, por meio da implementação de tecnologias avançadas e sistemas de monitoramento sofisticados. Este trabalho investiga a aplicação de sistemas de monitoramento baseados em higrômetros de resistência para prevenção de desastres em barragens de rejeitos de mineração, problema crítico evidenciado pelos incidentes catastróficos ocorridos em Mariana e Brumadinho. A metodologia fundamenta-se na integração de dispositivos Arduino equipados com sensores higrométricos de alta precisão e instrumentação geotécnica avançada, estabelecendo uma rede de monitoramento contínuo para detecção precoce de alterações na umidade do solo que possam comprometer a estabilidade estrutural das barragens. O sistema desenvolvido incorpora uma camada de processamento de dados que combina leituras dos sensores locais com informações meteorológicas obtidas em tempo real através de APIs dos portais CEMADEN e INMET, permitindo correlacionar dados de precipitação acumulada, previsões pluviométricas e saturação do solo. Os resultados preliminares demonstram que a plataforma proposta detecta com antecedência de 72 a 96 horas alterações críticas nos padrões de umidade, possibilitando a emissão automatizada de múltiplos níveis de alertas de segurança para autoridades e população potencialmente afetada. Conclui-se que a solução tecnológica apresentada constitui uma abordagem economicamente viável e tecnicamente robusta para incrementar significativamente a segurança em barragens de rejeitos, contribuindo para operações de mineração mais seguras e sustentáveis. A pesquisa visa contribuir significativamente para a segurança das operações de mineração e para a proteção do meio ambiente e das comunidades afetadas, oferecendo uma abordagem inovadora e tecnologicamente avançada para mitigar os riscos associados às barragens de rejeitos.

Palavras-chave: Barragens de rejeitos; Arduino; Higrômetros; Monitoramento ambiental; Sistemas de alerta; Brumadinho; Acidente ambiental; Risco ambiental.

ABSTRACT

DOS SANTOS, Thamires Ramos. *The role of computer engineering in preventing tailings dam accidents* 2024.112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2024.

Mining plays an essential role in the Brazilian economy, contributing to regional and national development, as well as generating jobs and boosting GDP. However, inadequate management of the tailings resulting from these activities can lead to serious environmental and social impacts, as demonstrated by the disasters in Mariana and Brumadinho. Given this scenario, there is an urgent need to improve safety and prevention systems for tailings dams. Computer engineering offers innovative solutions to meet this challenge, through the implementation of advanced technologies and sophisticated monitoring systems. This paper investigates the application of monitoring systems based on resistance hygrometers for disaster prevention in mining tailings dams, a critical problem highlighted by the catastrophic incidents in Mariana and Brumadinho. The methodology is based on the integration of Arduino devices equipped with high-precision hygrometric sensors and advanced geotechnical instrumentation, establishing a continuous monitoring network for the early detection of changes in soil moisture that could compromise the structural stability of dams. The system developed incorporates a data processing layer that combines readings from local sensors with meteorological information obtained in real time via APIs from the CEMADEN and INMET portals, making it possible to correlate data on accumulated precipitation, rainfall forecasts and soil saturation. Preliminary results show that the proposed platform detects critical changes in humidity patterns 72 to 96 hours in advance, making it possible to automatically issue multiple levels of safety alerts to authorities and the potentially affected population. It is concluded that the technological solution presented constitutes an economically viable and technically robust approach to significantly increase safety in tailings dams, contributing to safer and more sustainable mining operations. The research aims to make a significant contribution to the safety of mining operations and the protection of the environment and affected communities by offering an innovative and technologically advanced approach to mitigating the risks associated with tailings dams.

Keywords: Tailings dams; Arduino; Hygrometers; Environmental monitoring; Warning systems; Brumadinho; Environmental accident; Environmental risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mineração em Números (2024) – Saldo comercial, impostos e faturamento	27
Figura 2 – Mineração em Números (2024) – Exportação e Importação	28
Figura 3 – Mineração em Números (2024) – Principais substâncias produzidas – Participação no faturamento do setor	28
Figura 4 – Saldo ajustado e estoque trimestral de mão de obra do setor de extração mineral (exceto petróleo e gás) – 03TRI2023	29
Figura 5 – Saldo ajustado e estoque trimestral de mão de obra do setor de extração mineral (exceto petróleo e gás) – 04TRI2023	30
Figura 6 – Saldo de mão de obra da indústria extrativa mineral (exceto petróleo e gás), por grupo CNAE 2.0 – 03TRI2023	31
Figura 7 – Variação interanual do emprego formal na indústria extrativa (exceto petróleo e gás), por grupo CNAE 2.0 – 04TRI2023	31
Figura 8 – Estoque de mão de obra da IEM (exceto petróleo e gás) por estado	32
Figura 9 – Evolução do saldo e do estoque de trabalhadores da ITM – 04TRI2022 a 04TRI2024	32
Figura 10 – Evolução do saldo e do estoque de trabalhadores da ITM – 03TRI2022 a 03TRI2024	33
Figura 11 – Salários de admissão na extração mineral na IEM – 04TRI2023	33
Figura 12 – Etapas da mineração.	35
Figura 13 – Operações de lavra.	36
Figura 14 – Métodos de Lavra.	37
Figura 15 – Produção beneficiada de minério de ferro, volume de rejeito e de estéril (milhões de t).	42
Figura 16 – Seção típica de uma barragem alteada para montante.	47
Figura 17 – Seção de um alteamento para montante sobre barragem existente.	47
Figura 18 – Seção típica de uma barragem alteada para jusante.	48
Figura 19 – Seção típica de uma barragem alteada pela linha de centro.	49
Figura 20 – Distribuição das barragens por método construtivo	52
Figura 21 – Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Características Técnicas	59
Figura 22 – Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Estado de Conservação	60
Figura 23 – Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Plano de Segurança de Barragens	60
Figura 24 – Matriz de classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) .	61

Figura 25 – Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado	61
Figura 26 – Matriz de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial associado	62
Figura 27 – Distribuição das barragens cadastradas no SIGBM em 05/03/2025.	66
Figura 28 – Distribuição de barragens cadastradas de acordo com sua classificação de CRI.	67
Figura 29 – Distribuição das barragens inseridas na PNSB por estado, segundo a classificação de CRI.	67
Figura 30 – Evolução da classificação de CRI ao longo dos últimos 12 meses.	69
Figura 31 – Distribuição das barragens em nível de alerta ou emergência por estado em 05/03/2025.	69
Figura 32 – Rompimento de barragem em Mariana	81
Figura 33 – Acidente de Mariana	81
Figura 34 – Momento antes da tragédia em Brumadinho	82
Figura 35 – Momento do rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão em Brumadinho	82
Figura 36 – Acidente de Brumadinho	83
Figura 37 – A lama de rejeitos contaminou a bacia hidrográfica do Rio Doce, em Mariana	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção Bruta, Beneficiada e Comercializada - Principais Substâncias Metálicas 2023	41
Tabela 2 – Características dos principais métodos construtivos de barragens de rejeitos	50
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos três tipos de barragens de rejeitos	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGE	Advocacia-Geral do Estado
AHP	Análise Hierárquica de Processos
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM	Agência Nacional de Mineração
APC	Associação de Proteção Corporativa (ou conforme contexto do trabalho)
APR	Análise Preliminar de Riscos
B-I	Barragem I
B-IV	Barragem IV
B-IV-A	Barragem IV-A
BI	Business Intelligence
BiLSTM	Bidirectional Long Short-Term Memory (Memória Bidirecional de Longo e Curto Prazo)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BTA	Análise de Bowtie (Bowtie Analysis)
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CAP	Campus Alto Paraopeba
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CNP	Conselho Nacional do Petróleo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONFEA	Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CRI	Categoria de Risco
CT	Características Técnicas
CTS	Centro de Tecnologia e Sustentabilidade (ou conforme contexto - UFSJ)
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DAMSAT	Dam Monitoring from Satellites (Monitoramento de Barragens por Satélites)
DCE	Declaração de Condição de Estabilidade
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
EC	Estado de Conservação
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
ESG	Environmental, Social and Governance (Ambiental, Social e Governança)
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FUNED	Fundação Ezequiel Dias
GRI	Global Reporting Initiative (Iniciativa Global de Relatórios)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	International Council on Mining and Metals (Conselho Internacional de Mineração e Metais)

ICOLD	International Commission on Large Dams (Comissão Internacional de Grandes Barragens)
IEM	Indústria Extrativa Mineral
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPRJ	Instituto Politécnico
ITM	Indústria de Transformação Mineral
JK	Juscelino Kubitschek
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MEF	Método de Elementos Finitos
MG	Minas Gerais
MIP	Matriz Insumo-Produto
Mm ³	Milhões de metros cúbicos
MME	Ministério de Minas e Energia
MMSD	Mining, Minerals and Sustainable Development Project (Projeto Mineração, Minerais e Desenvolvimento Sustentável)
MPF	Ministério Público Federal
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PAEBM	Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PESB	Política Estadual de Segurança de Barragens
PIB	Produto Interno Bruto
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PRI	Principles for Responsible Investment (Princípios para o Investimento Responsável)
PSB	Plano de Segurança da Barragem
RBPS	Risk-Based Profiling System (Sistema de Perfil Baseado em Risco)
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RMSE	Root Mean Square Error (Erro Quadrático Médio)
ROM	Run-of-Mine (produção bruta de minério)
S.A.	Sociedade Anônima
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar de Abertura Sintética)
SASB	Sustainability Accounting Standards Board (Conselho de Normas Contábeis de Sustentabilidade)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Controle Supervisório e Aquisição de Dados)
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
TECK	Teck Resources Limited
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFCE	Universidade Federal do Ceará
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei
UHE	Usina Hidrelétrica
USGS	United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)
USP	Universidade de São Paulo
VALE	Vale S.A.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.1	Atividade de Mineração	20
1.1.1	<u>O papel da atividade mineradora na economia</u>	24
1.1.1.1	Percentual do PIB devido à mineração	24
1.1.1.2	Mineração em números	25
1.1.1.3	Geração de empregos	26
1.1.1.3.1	Emprego Formal na Indústria Extrativa Mineral (IEM)	29
1.1.1.3.2	Indústria de Transformação Mineral (ITM)	30
1.1.2	<u>Geração de resíduos</u>	34
1.1.2.1	Etapas da Mineração	34
1.1.2.2	Resíduos sólidos de extração - Estéril	39
1.1.2.3	Resíduos sólidos de beneficiamento - Rejeito	39
1.1.2.4	Geração de resíduos sólidos (Sólidos, líquidos, gasosos)	40
1.1.2.5	Gestão de resíduos e métodos de disposição de rejeitos	43
1.1.3	<u>Tipos de barragens de rejeitos</u>	45
1.1.3.1	Métodos de Alteamento de Barragens de Contenção de Rejeitos	46
1.1.3.1.1	Método de Alteamento a Montante	46
1.1.3.1.2	Método de Alteamento a Jusante	48
1.1.3.1.3	Método de Alteamento pela Linha de Centro	48
1.1.4	<u>Panorama Brasil vs. Mundo</u>	53
1.2	Classificação de risco das barragens de rejeitos	56
1.2.1	<u>Classificação das barragens de rejeitos</u>	62
1.2.2	<u>Panorama Atual de Classificação das Barragens de Mineração</u>	65
1.2.3	<u>Categoria de Risco das Barragens</u>	66
1.2.4	<u>Risco: Severidade x Probabilidade</u>	71
1.3	Legislação ambiental: população e ambiente (Brasil x Exterior)	73
1.3.1	<u>Estrutura Regulatória Contemporânea</u>	78
1.3.2	<u>Tecnologias Emergentes e Inteligência Artificial</u>	79
1.4	Acidentes em Mariana e Brumadinho	79
1.4.1	<u>Mecanismos de Ruptura em Barragens</u>	79
1.4.1.1	Erosão Interna	79
1.4.1.2	Liquefação	80
1.4.1.3	Galgamento	80
1.4.2	<u>Casos de Estudo: Mariana e Brumadinho</u>	80
1.4.2.1	A Tragédia de Mariana	80

1.4.2.2	A Tragédia de Brumadinho	82
1.4.2.3	Comparação dos Processos Construtivos	83
1.4.2.4	Impacto Humano e Ambiental	83
1.4.2.5	Deficiências nos Sistemas de Monitoramento	84
1.4.3	<u>Impactos Socioambientais e Respostas Institucionais</u>	84
1.4.3.1	Consequências Socioeconômicas	85
1.4.3.2	Gestão dos Processos Reparatórios	86
1.4.3.3	Respostas Institucionais	86
1.4.3.4	Acordos de Indenização	87
1.4.3.5	Ações Judiciais e Complexidade Jurídica	87
1.4.3.6	Inovações Legislativas Pós-Brumadinho	87
1.5	Sistema de alerta existentes	88
1.5.1	<u>Sistemas de Monitoramento Atuais</u>	88
1.5.2	<u>Contexto Brasileiro Pós-Desastres</u>	90
1.5.2.1	Sistemas Multitecnológicos Integrados	91
1.5.3	<u>Instrumentação Geotécnica Tradicional</u>	91
1.5.3.1	Limitações dos Sistemas Tradicionais	92
1.5.4	<u>Limitações dos Sistemas em Mariana e Brumadinho</u>	92
1.5.5	<u>Sistemas Automatizados de Monitoramento</u>	92
1.5.6	Desafios Regulatórios Internacionais	93
1.5.7	<u>Transformações no Marco Regulatório Brasileiro</u>	93
1.5.7.1	Nova Política Nacional de Segurança das Barragens	94
1.5.8	<u>Experiências Internacionais</u>	94
1.5.9	<u>Perspectivas Futuras</u>	95
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	96
3	MATERIAL E MÉTODOS	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	100

INTRODUÇÃO

Os setores da agropecuária e da mineração têm sido pilares fundamentais na história econômica do Brasil, contribuindo para o desenvolvimento tanto no âmbito regional quanto nacional. Em 2021, com as commodities em alta em meio à pandemia, a soma de agro e mineração superou a de manufatura no PIB brasileiro pela primeira vez em décadas e a tendência se manteve em 2022 com os efeitos da guerra da Ucrânia (BBC News Brasil, 2023).

Sendo assim, com a crescente demanda por recursos minerais essenciais, como argila, calcário e ferro, a mineração não apenas fornece matérias-primas para diversas indústrias, mas também gera empregos e contribui para a economia do Brasil. Com isso, o setor de mineração volta ao foco como uma das atividades econômicas importantes do Brasil, contribuindo significativamente para o PIB nacional e para a geração de empregos (Instituto Brasileiro de Mineração, 2020).

No entanto, a atividade mineradora também traz consigo desafios e riscos significativos, especialmente no que diz respeito ao gerenciamento de resíduos e de rejeitos resultantes dos processos de beneficiamento do minério, devido aos seus impactos ambientais e sociais (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017).

A gestão de rejeitos de mineração é uma questão crítica que requer abordagens inovadoras e tecnologias avançadas para garantir a segurança e a sustentabilidade ambiental das operações (Environmental Protection Agency, 2019). Pois a má gestão dos rejeitos pode levar a uma série de consequências adversas, incluindo mudanças ambientais, desvalorização de imóveis e até mesmo desastres como os que ocorreram em Mariana e Brumadinho (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017), que serviram como um chamado de alerta para a necessidade urgente de melhorar os sistemas de segurança e prevenção em barragens de rejeitos.

Nesse contexto, a engenharia da computação oferece uma variedade de soluções inovadoras que podem ser aplicadas para aumentar a segurança e reduzir os riscos associados às barragens de rejeitos. A prevenção de desastres em barragens de rejeitos requer a implementação de tecnologias modernas e sistemas de monitoramento sofisticados para identificar e mitigar os riscos potenciais (International Council on Mining and Metals, 2021).

Objetivo

Este trabalho teve como objetivo utilizar como exemplo um higrômetro de resistência para solo, implementado por meio da plataforma Arduino, de forma a representar as diversas instrumentações geotécnicas como uma ferramenta na detecção precoce

de problemas que pudessem comprometer a segurança de uma barragem de rejeito para gerar alertas de forma a prevenir desastres. O sistema proposto foi desenvolvido utilizando a plataforma open-source Arduino, equipada com sensores higrométricos de alta precisão, proporcionando assim um monitoramento contínuo e de baixo custo das condições de umidade do solo nas estruturas da barragem. A arquitetura do sistema contempla, adicionalmente, um módulo de comunicação para transmissão automática dos dados coletados, bem como a integração com as bases de dados meteorológicos disponibilizadas pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esta integração permite correlacionar os níveis de umidade detectados in loco com parâmetros climatológicos críticos, como precipitação acumulada e previsões pluviométricas para a região monitorada.

Ao integrar tecnologias de engenharia da computação com instrumentação geotécnica é possível desenvolver um sistema de segurança robusto e eficiente que possa ajudar a prevenir desastres semelhantes aos de Mariana e Brumadinho. O sistema implementado possibilita a emissão automatizada de alertas graduais de segurança para autoridades competentes e população potencialmente afetada, estabelecendo diferentes níveis de risco baseados na análise integrada dos dados higrométricos e meteorológicos. Esta pesquisa tem o potencial de contribuir significativamente para a segurança das operações de mineração e para a proteção do meio ambiente e das comunidades afetadas por essas atividades, oferecendo uma solução tecnologicamente acessível e metodologicamente consistente para o monitoramento preventivo em barragens de rejeitos.

Estrutura do Trabalho

No capítulo 1 foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a atividade de mineração, o PIB nacional, a geração de empregos e a produção de resíduos. Ainda nesse capítulo foi abordado os tipos de barragens de rejeitos, as legislações vigentes, um breve resumo sobre os acidentes de Mariana e Brumadinho e os sistemas de alerta existentes. No capítulo 2 foi descrito o objetivo geral e os objetivos específicos relacionando as medições com a análise de dados e tomada de decisões, assim como a notificação de sistemas de alerta e as APIs. No capítulo 3 foi realizada uma análise dos materiais e métodos, fazendo uso de diagramas, componentes do Arduino e obtenção de dados externos. No capítulo 4 foi apresentado os resultados e conclusões com base nos materiais e métodos utilizados e no capítulo 5 foi apresentada a conclusão final do trabalho.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na América Latina, historicamente marcada por colônias de exploração, o extrativismo mineral teve início para atender aos interesses dos países colonizadores, continuando ao longo dos anos. No final da década de 1990, com a expansão da globalização e o aumento do consumo de metais, a indústria mineral começou a se expandir em ritmo acelerado, tanto em termos de volumes extraídos quanto na abertura de novas minas (??).

Em 2023, o Brasil estava entre um dos principais produtores de minerais do mundo, ocupando a nona posição no ranking dos 20 principais países em termos de valor na produção de minerais metálicos e carvão (??). Este setor possui significativa importância na economia nacional, gerando emprego e desempenhando um papel crucial nas exportações do país, com uma alta comercialização de commodities (??).

A atividade mineral apresenta potencial significativo para incrementar a arrecadação tributária e fomentar o crescimento econômico, além de proporcionar melhorias na qualidade de vida da população e promover o desenvolvimento regional, conforme argumentam ?? (??, p. 1), o setor mineral possui relevância estratégica por sua presença em diversos segmentos econômicos, “produzindo bens primários, que irão suprir as mais variadas atividades econômicas, desde a agricultura até indústrias de tecnologia de ponta”. Os autores ressaltam ainda, que economias que possuem como base a extração dos recursos minerais têm a mineração como fator fundamental.

1.1 Atividade de Mineração

A história da mineração no território brasileiro remonta ao período colonial e se configura como um pilar fundamental na formação socioeconômica e política do país (BARRETO et al., 2001; DOMINGUES, 2022). A busca por riquezas minerais, inicialmente com o ouro no século XVIII, impulsionou a ocupação do território e moldou as primeiras estruturas de exploração (BARRETO et al., 2001). Contudo, é a partir do século XX que a relação entre o Estado e o setor mineral se institucionaliza de forma mais complexa, com a criação de códigos e regulamentos específicos para normatizar a atividade (DOMINGUES, 2022).

No início do século XX, o Estado brasileiro intensificou sua intervenção e regulamentação no setor mineral, culminando na promulgação de códigos específicos (DOMINGUES, 2022). Exemplos dessas intervenções incluem o Decreto Federal nº 24.642, de 10 de julho de 1934, que regulamenta o uso das jazidas na mineração (BRASIL, 1934b), o Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934, que trata da utilização das águas e continua em vigor até os dias atuais (BRASIL, 1934c), e

o Código Florestal de 1934, estabelecido pelo Decreto Federal nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934 (BRASIL, 1934a).

O Código de Mineração de 1934 buscou consolidar a legislação existente e remover obstáculos para o aproveitamento racional das riquezas do subsolo (BRASIL, 1934b). Essa legislação conferiu ao Governo o papel de fiscalizar a execução dos planos de trabalho e orientar a marcha das atividades (BRASIL, 1934b; DOMINGUES, 2022), evidenciando uma preocupação crescente com o controle estatal sobre os recursos minerais. Essa intervenção legal e econômica do Estado no setor tornou-se uma marca da política mineral brasileira.

O arcabouço legal estabelecido pelo Código de 1934 definiu conceitos fundamentais e delineou o processo para a obtenção de direitos minerários (BRASIL, 1934b). Distinguiu-se formalmente “jazida”, como a massa de substâncias minerais, de “mina”, a jazida na extensão concedida e o conjunto de direitos associados à exploração (BRASIL, 1934b). O código classificou as jazidas, como por exemplo os minérios metálicos em jazidas primárias (BRASIL, 1934b), e instituiu a necessidade de autorização prévia para a pesquisa mineral (BARRETO et al., 2001).

A concessão de lavra, ou seja, os trabalhos de extração e beneficiamento (BRASIL, 1934b), só seria outorgada após a pesquisa ter apresentado resultados satisfatórios e a jazida ser considerada lavrável pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) (BRASIL, 1934b). Essa estruturação legal visava garantir um aproveitamento mais ordenado das riquezas minerais.

A partir da década de 1930, sob o governo de Getúlio Vargas, a questão mineral foi integrada a um projeto nacionalista de desenvolvimento, visando à industrialização e à segurança nacional (VILLAS-BÔAS, 1995; FONSECA, 2012; DOMINGUES, 2022). Essa política representou uma ruptura estrutural nas relações entre o Estado e a economia, estabelecendo novos paradigmas para a autodeterminação do desenvolvimento nacional (VILLAS-BÔAS, 1995). O setor mineral, reconhecido como estratégico para países em processo de industrialização, recebeu não apenas atenção prioritária, mas também investimentos significativos para sua expansão (VILLAS-BÔAS, 1995).

Nesse período, foram criadas empresas estatais estratégicas para garantir o controle e o desenvolvimento de setores minerais considerados vitais para a economia nacional. A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) em 1942 e a Petrobrás em 1954 são exemplos dessa política estatal. Essa estratégia visava garantir o monopólio estatal para a exportação de minério de ferro e manganês e o regime estatal para a exploração da siderurgia, alinhando a política mineral à defesa econômica e militar da nação (VILLAS-BÔAS, 1995; FONSECA, 2012).

De acordo com VILLAS-BÔAS 1995, a política nacionalista e intervencionista da era Vargas se contrapôs à visão liberal que defendia a maior participação do capital estrangeiro e a menor intervenção estatal na economia. O debate entre essas correntes

ideológicas marcou a discussão sobre o caminho do desenvolvimento brasileiro, com o setor mineral frequentemente no centro das tensões.

Enquanto a corrente nacionalista via o capital estrangeiro como complementar, desde que rigidamente controlado, a corrente liberal pregava a atração irrestrita de investimentos externos, mesmo para setores estratégicos. Essa polarização influenciou as decisões sobre o aproveitamento dos recursos minerais ao longo de décadas.

Após o segundo governo Vargas, especialmente durante o período de Juscelino Kubitschek (JK) e seu Plano de Metas, observou-se uma mudança na política econômica, com uma maior abertura e integração com o capital estrangeiro. Embora o período JK tenha focado no desenvolvimento industrial, a política econômica passou a fortalecer e expandir as bases de um “capitalismo associado”, resultando em um aumento da importância das empresas associadas e multinacionais. Essa fase foi marcada por debates sobre a “desnacionalização” da economia e a crescente dependência, inclusive no setor mineral (VILLAS-BÔAS, 1995).

O período da Ditadura Militar (1964-1985) manteve uma forte presença estatal no setor mineral e impulsionou grandes projetos, muitos deles voltados para a exportação e com participação de capital estrangeiro, especialmente na Amazônia (FERNANDES; ARAUJO, 2016; DOMINGUES, 2022). Descobertas como o minério de ferro de Carajás (1967), a bauxita do Vale do Trombetas e a cassiterita de Pitinga exemplificam essa fase de expansão e direcionamento para o mercado global (FERNANDES; ARAUJO, 2016).

Os Códigos de Mineração de 1940 e 1967 (BRASIL, 1967) representam marcos fundamentais neste processo de normatização e intervenção estatal no setor mineral brasileiro. Estas legislações estabeleceram um sofisticado sistema regulatório que, enquanto preservava elementos estruturais do ordenamento anterior, introduziu inovações significativas para atender às novas demandas desenvolvimentistas do país (DOMINGUES, 2022).

A partir da redemocratização, em 1985, o Brasil consolidou-se como um dos principais produtores e exportadores globais de minerais e metais. No período entre 1985 e 2015, o país exportava cerca de 85% de sua produção mineral, com o minério de ferro constituindo a maior parte (89%) dessa pauta exportadora. A mineração, juntamente com o agronegócio, tornou-se um setor estratégico para o equilíbrio da economia brasileira. Contudo, o forte direcionamento para a exportação de *commodities* minerais, muitas vezes sem agregação de valor, e a concentração em poucos bens primários foram temas recorrentes na literatura (FERNANDES; ARAUJO, 2016).

Na década de 1990, o conceito de desenvolvimento sustentável ganhou relevância nas discussões sobre a mineração no Brasil, impulsionado por reflexões globais e nacionais. O projeto Mineração, Minerais e Desenvolvimento Sustentável (MMSD - *Mining, Minerals and Sustainable Development Project*), iniciado no final da década de

1990 sob a coordenação brasileira do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), constituiu uma iniciativa estratégica que objetivou construir um diagnóstico contemporâneo do setor mineral através do prisma da sustentabilidade.

Esta abordagem inovadora permitiu uma reavaliação sistemática das práticas e políticas minerárias nacionais, estabelecendo novos parâmetros para a análise integrada do desenvolvimento sustentável na indústria extrativa, englobando também as dimensões econômica, institucional e social (BARRETO et al., 2001).

Um dos eixos centrais na discussão sobre mineração e desenvolvimento sustentável é a gestão dos impactos ambientais gerados pela atividade extractiva. A alteração da paisagem, a poluição da água e do solo, e a produção de grandes volumes de rejeitos são inerentes à natureza da mineração. Para mitigar esses efeitos, o gerenciamento ambiental tornou-se um instrumento crucial adotado pelas empresas, definido como o conjunto de técnicas e procedimentos para administrar demandas ambientais potencialmente geradoras de conflitos (BARRETO et al., 2001).

A promoção de tecnologias limpas e sustentáveis para otimizar o aproveitamento dos recursos, gerenciar rejeitos, minimizar impactos ambientais e maximizar a satisfação social é outro desafio fundamental. A efetivação de práticas mais sustentáveis na mineração brasileira exige um esforço contínuo para integrar as dimensões econômica, social e ambiental em todas as etapas do empreendimento. A jornada rumo a uma mineração verdadeiramente sustentável no Brasil, portanto, demanda a evolução contínua das políticas públicas, das práticas empresariais e do engajamento da sociedade civil (BARRETO et al., 2001).

Atualmente, o Brasil mantém-se como um dos principais produtores e exportadores de minérios do mundo: cerca de 80% de tudo o que produz é exportado, gerando expressivo montante de divisas. Juntamente com o agronegócio, a mineração constitui-se um dos setores estratégicos para o equilíbrio da balança comercial brasileira. Apesar da diversificação crescente, o minério de ferro ainda representa aproximadamente 60% das exportações do setor mineral brasileiro (ANM, 2023c).

Hoje, segundo o IBRAM 2024, a indústria mineral do Brasil se destaca por:

- Em 2024, o setor mineral registrou alta de 9,1% no faturamento em relação a 2023, totalizando R\$ 270,8 bilhões (excluindo-se petróleo e gás);
- As exportações minerais brasileiras alcançaram US\$ 43,43 bilhões, um aumento de 0,9%;
- As importações minerais caíram 23,1% em US\$ (totalizando US\$ 8,5 bilhões) e 1,6% em toneladas (totalização 41,2 milhões de toneladas);
- O saldo comercial mineral, de US\$ 34,9 bilhões equivale a 47% do saldo comercial brasileiro, que foi de US\$ 74,5 bilhões;

- São mais de 221 mil empregos diretos no setor, desse total, foram geradas 8.703 novas vagas, no período de Janeiro e Novembro de 2024;
- As principais substâncias produzidas, com participação no faturamento do setor, são: Minério de ferro (59,35%), Minério de ouro (8,81%), minério de cobre (7,49%), bauxita (2,11%), água mineral (2,81%), granito (2,81%), calcário dolomítico (3,36%), areia (1,36%), fosfato (1,41%), minério de níquel (0,83%), minério de manganês (0,18%), e minério de nióbio (0,44%);
- Os principais Estados produtores em 2024, em bilhões R\$, e a participação dos mesmos no faturamento, respectivamente são: MG (R\$ 108,3; 40%), PA (R\$ 97,6; 36,1%), SP (R\$ 10,3; 3,8%), BA (R\$ 10,1; 3,7%), GO (R\$ 9,6; 3,6%), MT (R\$ 7,5; 2,8%), e outros (R\$ 27,4; 10,1%).

1.1.1 O papel da atividade mineradora na economia

1.1.1.1 Percentual do PIB devido à mineração

A relevância de um setor produtivo na economia de um país é geralmente medida por sua contribuição ao produto interno bruto (PIB) (LEÃO; RABELO, 2023). A participação do setor mineral no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro constitui um elemento significativo para a compreensão da estrutura econômica nacional (LEÃO; RABELO, 2023). A mineração e a siderurgia representam conjuntamente aproximadamente 3,1% do PIB nacional, com a mineração contribuindo isoladamente com cerca de 1,2% e a siderurgia com 1,9%, conforme demonstram os dados setoriais (APC, 2024). Entre os anos 2000 e 2019, essa participação oscilou entre 2,5% e 4%, refletindo tanto os ciclos econômicos internos quanto as flutuações nas cotações internacionais das commodities minerais, evidenciando a vulnerabilidade deste setor às dinâmicas do mercado global (LEÃO; RABELO, 2023; IPEA, 2023; APC, 2024).

A mensuração precisa da contribuição econômica da cadeia produtiva mineral apresenta desafios metodológicos significativos devido à complexa interconexão entre diversos setores (LEÃO; RABELO, 2023; IPEA, 2023). As abordagens tradicionais, que calculam apenas a participação direta no PIB, mostram-se insuficientes para capturar as vinculações setoriais diretas e indiretas que caracterizam a economia mineral. Estudos anteriores indicaram contribuições de aproximadamente 3,19% do PIB em 2019, porém não contemplaram explicitamente o conceito de cadeia produtiva em sua totalidade. A delimitação do setor frequentemente baseia-se em critérios físicos de presença mineral nos produtos finais, metodologia que pode resultar em superdimensionamento setorial e dificulta o rastreamento preciso do impacto econômico mineral (LEÃO; RABELO, 2023).

A metodologia desenvolvida pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em dezembro de 2023 trouxe

avanços significativos para a análise econômica do setor mineral brasileiro. Este estudo, detalhado no trabalho de Leão e Rabelo (2023), baseia-se na técnica de Matriz Insumo-Produto (MIP) adaptada para calcular o PIB sob o enfoque do valor adicionado, definindo a “economia mineral” como o conjunto das atividades extrativas e manufatureiras cuja função principal é transformar minerais em bens úteis. A metodologia permite capturar o “arrasto produtivo” — a parcela do PIB gerada em outros setores econômicos que é estimulada pelas atividades centrais da economia mineral — superando limitações de estudos anteriores e oferecendo uma visão mais abrangente da cadeia produtiva mineral.

Os resultados da aplicação desta metodologia revelam a dinâmica e extensão da cadeia produtiva mineral na economia brasileira ao longo de duas décadas (LEÃO; RABELO, 2023). A cadeia produtiva da economia mineral oscilou entre 2,5% e 4,1% do PIB brasileiro entre 2000 e 2019, representando entre R\$ 150 bilhões e R\$ 340 bilhões em valores constantes de 2021 (APC, 2024). A extração de minério de ferro destaca-se como setor-chave, apresentando capacidade de arrasto produtivo superior a 1 durante todo o período analisado, indicando que cada real de PIB gerado neste setor provoca mais de um real de PIB no restante da economia. O segmento de transformação mineral, especialmente a metalurgia de metais não ferrosos, também demonstrou expressivo poder multiplicador econômico, embora com trajetória mais volátil que a extração (LEÃO; RABELO, 2023).

1.1.1.2 Mineração em números

Segundo dados da Mineração em Números (Instituto Brasileiro de Mineração, 2023) apud (FONSECA, 2024), o setor apresentou os resultados abaixo, e que se encontram representados nas Figuras 1, 2 e 3:

- O faturamento da indústria da mineração brasileira se manteve estável em 2023, em relação ao ano anterior, passando de R\$ 250 bilhões para R\$ 248,2 bilhões, uma redução de 0,7%;
- Minas Gerais aparece com a maior participação no faturamento: 41,7% em 2023 – passando de R\$ 100,5 bilhões em 2022 para R\$ 103,6 bilhões, (crescimento de 3%). O Pará apresentou redução de 7,6%, passando de R\$ 92,4 bilhões para R\$ 85,4 bilhões;
- Entre as principais substâncias na participação do faturamento, destacam-se: minério de ferro (59,6%) e ouro (8,5%). Cobre (6,5%), calcário (3,8%), granito (2,6%), bauxita (2,3%) e nióbio (0,5%) completam as substâncias de maior relevância;

- As exportações minerais totais, tiveram alta de 3,1% em relação a 2022, alcançando quase US\$ 43 bilhões, enquanto as importações minerais tiveram queda de 34,2% (US\$ 11 bilhões);
- O saldo comercial do setor, portanto, se situou em US\$ 31,95 bilhões, 28,3% a mais do que em 2022 – isso significa que o saldo mineral corresponde a 32% do saldo total da balança comercial de 2023, que foi de US\$ 98,84 bilhões;
- O minério de ferro respondeu por 71% dos minérios exportados em 2023, passando de 344,1 milhões de toneladas em 2022 para 378,5 milhões de toneladas em 2023, um aumento de 10%. As exportações do minério de ferro somaram US\$ 30,5 bilhões em 2023, registrando um aumento de 5,7% frente aos US\$ 28,9 bilhões de 2022;
- A coleta de impostos e encargos seguiu a tendência do volume de vendas em 2023. Houve uma diminuição de 0,7%, com o montante passando de R\$ 86,2 bilhões em 2022 para R\$ 85,6 bilhões. A receita proveniente da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM), que é o royalty do setor mineral, manteve-se praticamente constante, reduzindo de R\$ 7 bilhões para R\$ 6,9 bilhões de um ano para o outro;
- Em termos de emprego, com 9 mil vagas a mais em 2023, o setor mineral manteve mais de 210 mil postos de trabalho diretos, conforme levantamento realizado em novembro de 2023 pelo Novo Caged, órgão vinculado ao Ministério do Trabalho e Emprego;
- Destaca-se, ainda, o aumento nos aportes financeiros planejados pelas empresas mineradoras no país. Inicialmente projetados em US\$ 50 bilhões para o período de 2023 a 2027, os investimentos agora estão estimados em até US\$ 64,5 bilhões para o período de 2024 a 2028.
- A sustentabilidade operacional está em foco nos investimentos. Até 2028, a indústria da mineração planeja aumentar em 62,7% os recursos destinados a iniciativas socioambientais. Esses investimentos constituem a segunda maior proporção dos recursos setoriais previstos até 2028, correspondendo a 16,6% do total, equivalente a US\$ 10,7 bilhões, comparados aos US\$ 6,6 bilhões projetados para o período de 2023 a 2027.

1.1.1.3 Geração de empregos

A análise do mercado de trabalho no setor mineral brasileiro requer a delimitação das atividades econômicas relevantes, que, conforme metodologia da Agência Nacional

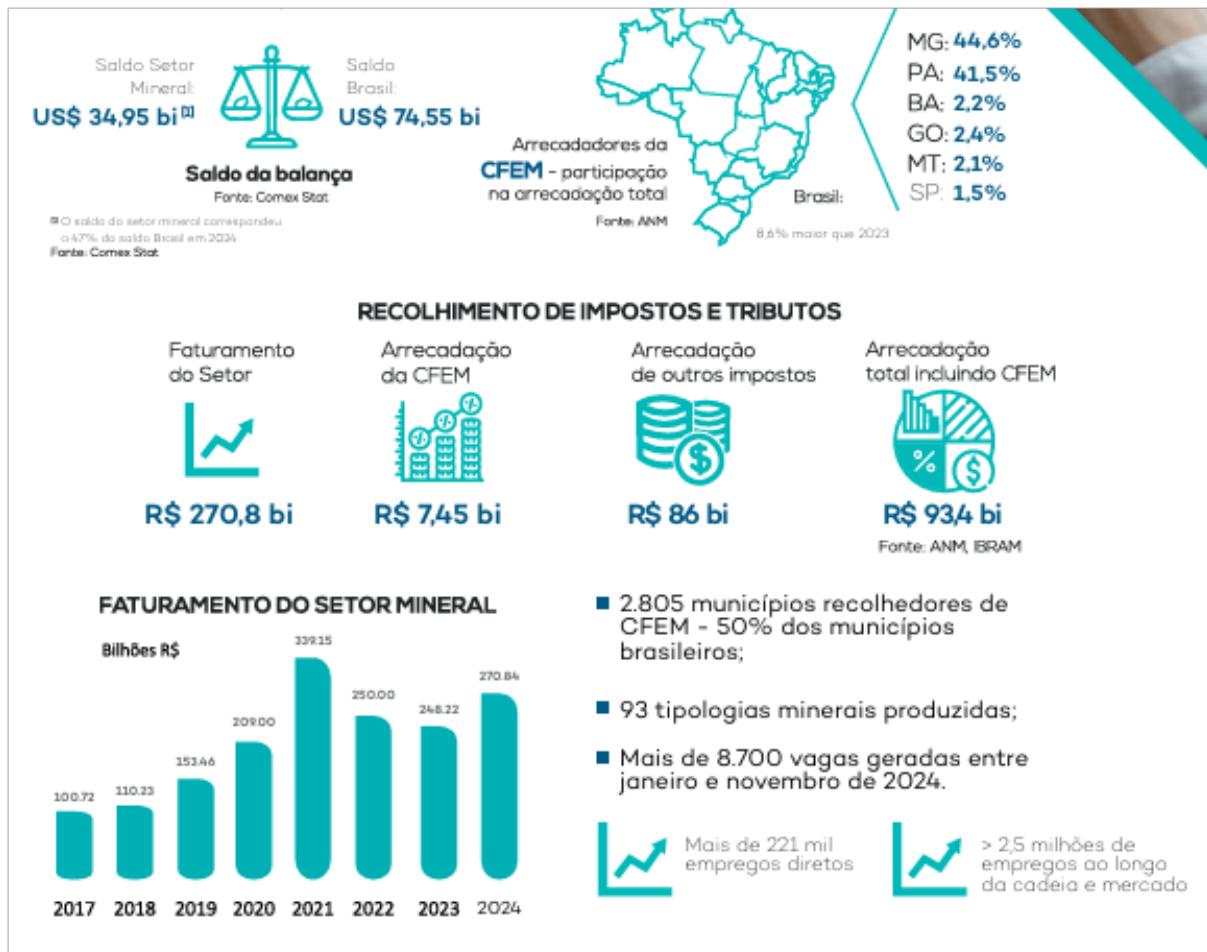
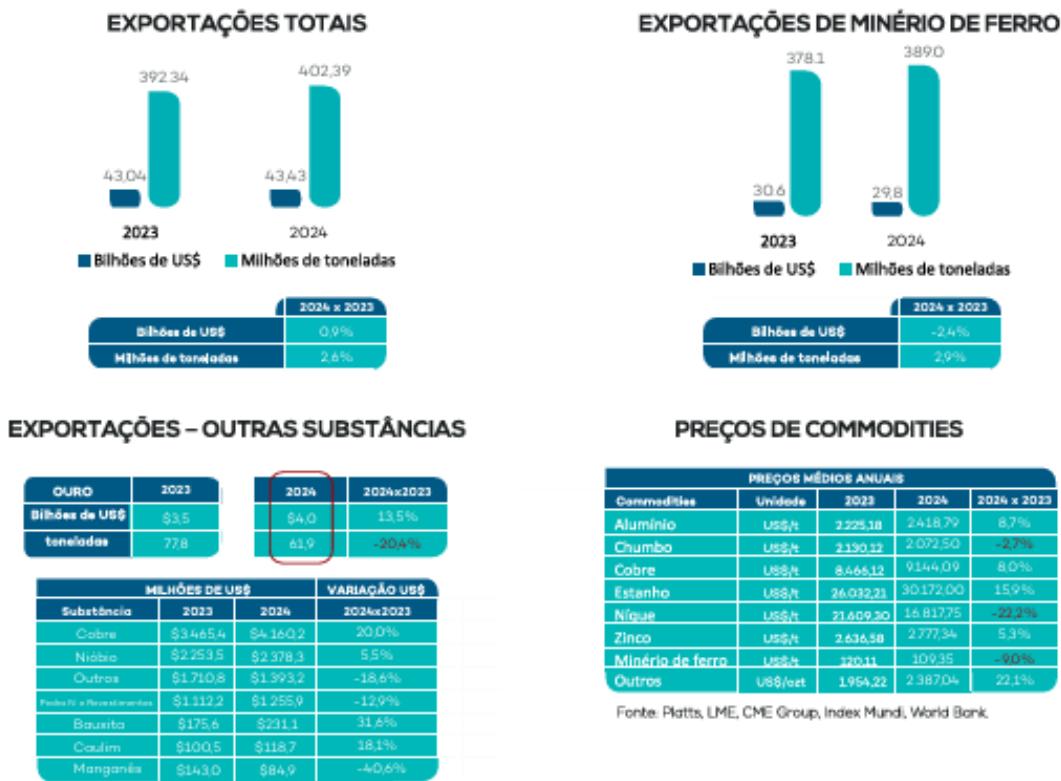


Figura 1 – Mineração em Números (2024) – Saldo comercial, impostos e faturamento

Fonte: Mineração em Números (IBRAM, 2024)

de Mineração (ANM), abrangem a Indústria Extrativa Mineral (IEM) e a Indústria de Transformação Mineral (ITM). A IEM contempla atividades como extração de carvão mineral, minério de ferro, minerais metálicos e não metálicos, além de atividades de apoio, enquanto a ITM inclui a fabricação de produtos cerâmicos, artefatos de concreto, siderurgia, fundição, entre outras. Desde 2020, o monitoramento do emprego formal para o setor mineral, assim como para as demais atividades econômicas no Brasil, passou a ser realizado com base nos dados do Novo CAGED (eSocial), que substituiu o Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (CAGED) e ampliou a base de trabalhadores formais avaliados (ANM, 2023d; ANM, 2023e). A análise conjunta ou separada dessas duas indústrias (IEM e ITM) é fundamental para entender a contribuição total do setor mineral para o emprego no país, o que será detalhado adiante.



Fonte: Platts, LME, CME Group, Index Mundi, World Bank.



Fonte: Comex Stat, Elaboração IBRAM.

Fonte: Platts, LME, CME Group, Index Mundi, World Bank.

Figura 2 – Mineração em Números (2024) – Exportação e Importação

Fonte: Mineração em Números (IBRAM, 2024)



Figura 3 – Mineração em Números (2024) – Principais substâncias produzidas – Participação no faturamento do setor

Fonte: Mineração em Números (IBRAM, 2024)

1.1.1.3.1 Emprego Formal na Indústria Extrativa Mineral (IEM)

O mercado de trabalho formal na Indústria Extrativa Mineral (IEM), excluindo petróleo e gás, é acompanhado trimestralmente pela ANM, evidenciando seu estoque de mão de obra e o saldo de contratações e desligamentos no período. No 3º trimestre de 2023, o estoque de trabalhadores da IEM no Brasil alcançou 208.447 postos (Figura 4), enquanto no 4º trimestre de 2023, esse estoque foi de 208.176 postos (Figura ??). O saldo de emprego formal na IEM foi positivo no 3º trimestre de 2023, com 1.869 vagas criadas (Figura 4), mas registrou uma leve variação negativa de -119 vagas no 4º trimestre de 2023 (Figura ??). Estes números refletem as flutuações na absorção de mão de obra direta pela atividade extrativa ao longo do ano (ANM, 2023d; ANM, 2023e).

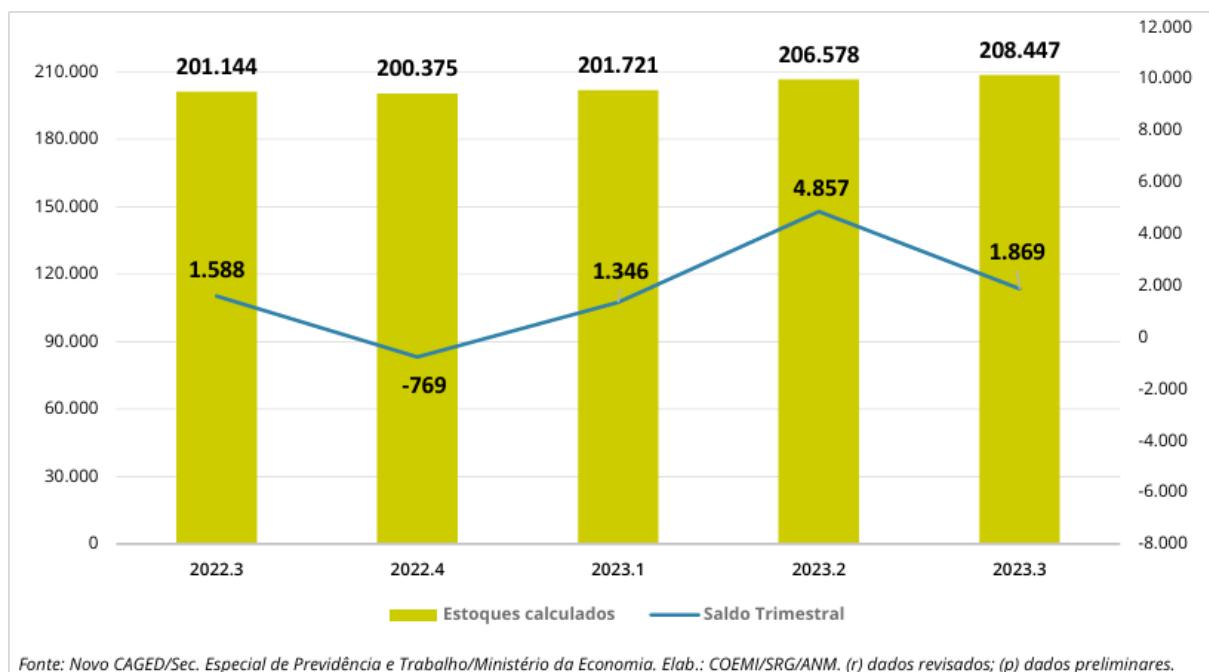


Figura 4 – Saldo ajustado e estoque trimestral de mão de obra do setor de extração mineral (exceto petróleo e gás) – 03TRI2023

Fonte: ANM (2023d)

As variações no saldo de emprego formal na IEM em 2023 foram influenciadas por dinâmicas distintas entre seus subgrupos, conforme a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0) (ANM, 2023d; ANM, 2023e). No 3º trimestre de 2023, a Extração de Pedra, Areia e Argila apresentou um saldo positivo de 856 vagas, e a Extração de Minério de Ferro teve o maior saldo positivo, com 1.171 vagas (Figura 6). Em contrapartida, a Extração de Minerais Metálicos Não-Ferrosos registrou um saldo negativo de -653 vagas no mesmo período, impactada pela suspensão das operações de extração de ouro pela AngloGold Ashanti em Santa Bárbara (MG), que resultou no encerramento de 754 postos de trabalho, e pela falência da Buritirama

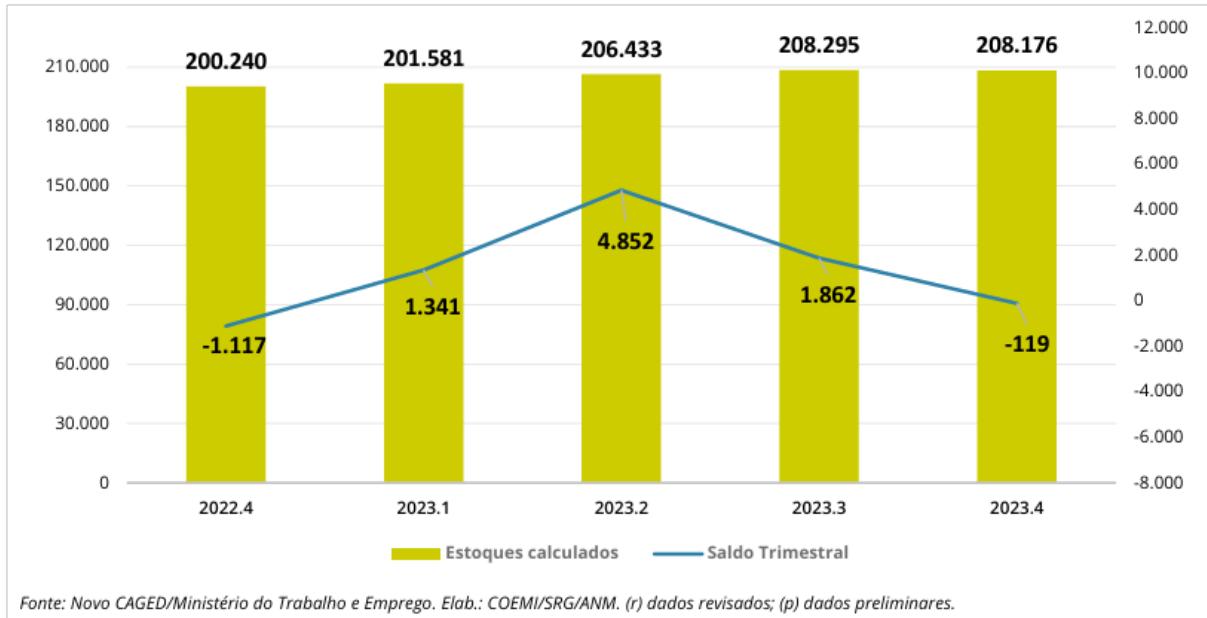


Figura 5 – Saldo ajustado e estoque trimestral de mão de obra do setor de extração mineral (exceto petróleo e gás) – 04TRI2023

Fonte: ANM (2023e)

Mineração (manganês) em Marabá (PA), com fechamento de 408 postos (ANM, 2023d). A variação interanual (4º trimestre de 2023 vs 4º trimestre de 2022) mostrou crescimento expressivo na Extração de Minério de Ferro (+12,7%), mas quedas significativas nas Atividades de Apoio à Extração de Minerais (-38,6%) e Extração de Outros Minerais Não-Metálicos (-5,3%) (Figura 7). Essas especificidades por subgrupo evidenciam a heterogeneidade da geração de emprego dentro da própria indústria extrativa.

A maior parte da distribuição da força de trabalho da IEM está concentrada nos estados de Minas Gerais (35%), Pará (13%), Bahia (7%) e São Paulo (7%) (Figura 8) (ANM, 2023c).

1.1.1.3.2 Indústria de Transformação Mineral (ITM)

Por outro lado, a Indústria de Transformação Mineral (ITM) concentra a maior parte da mão de obra formal do setor mineral brasileiro, apresentando um estoque de trabalhadores significativamente superior ao da indústria extrativa (ANM, 2023d; ANM, 2023e). No 4º trimestre de 2023, a ITM registrou 718.631 postos de trabalho (Figura 9), enquanto no 3º trimestre de 2023, o estoque era de 655.078 postos (Figura 10). Os principais setores empregadores dentro da ITM são a Fabricação de Produtos Cerâmicos, Fabricação de Artefatos de Concreto, Cimento, Fibrocimento, Gesso e Materiais Semelhantes, Aparelhamento de Pedras e Fabricação de Outros Produtos de Minerais Não Metálicos, e Siderurgia (ANM, 2023d; ANM, 2023e). Embora o estoque de mão de obra na ITM seja maior, sua variação trimestral tem sido discreta, como a leve queda de 0,3% no 4º trimestre de 2023 em relação ao mesmo trimestre de

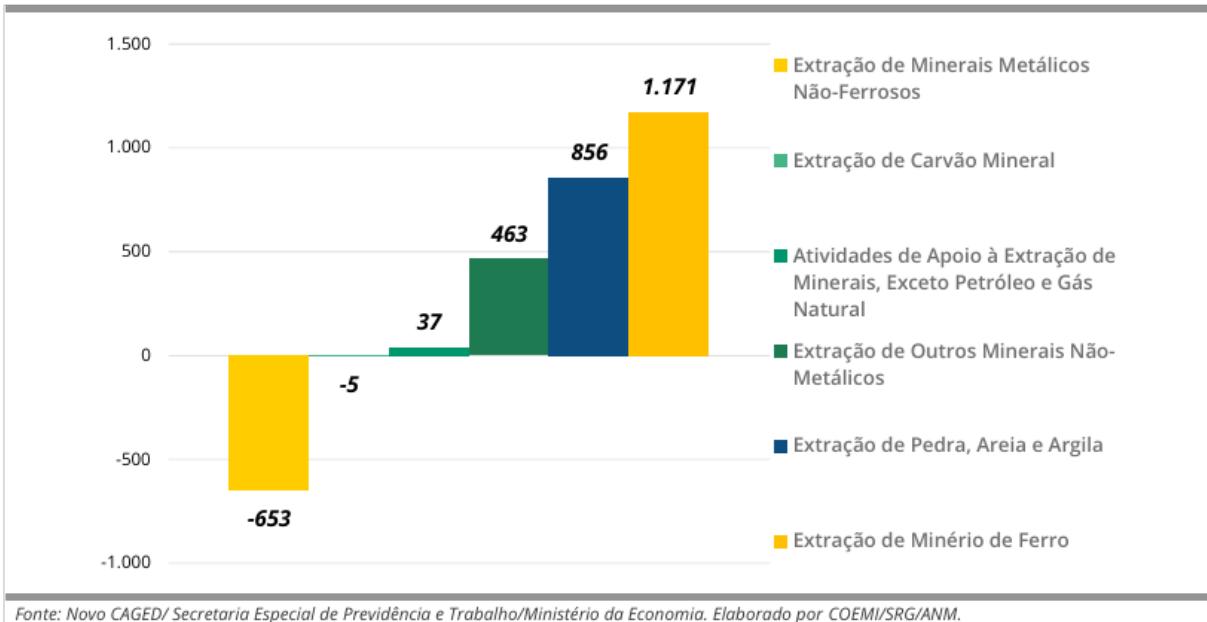


Figura 6 – Saldo de mão de obra da indústria extractiva mineral (exceto petróleo e gás), por grupo CNAE 2.0 – 03TRI2023

Fonte: ANM (2023d)

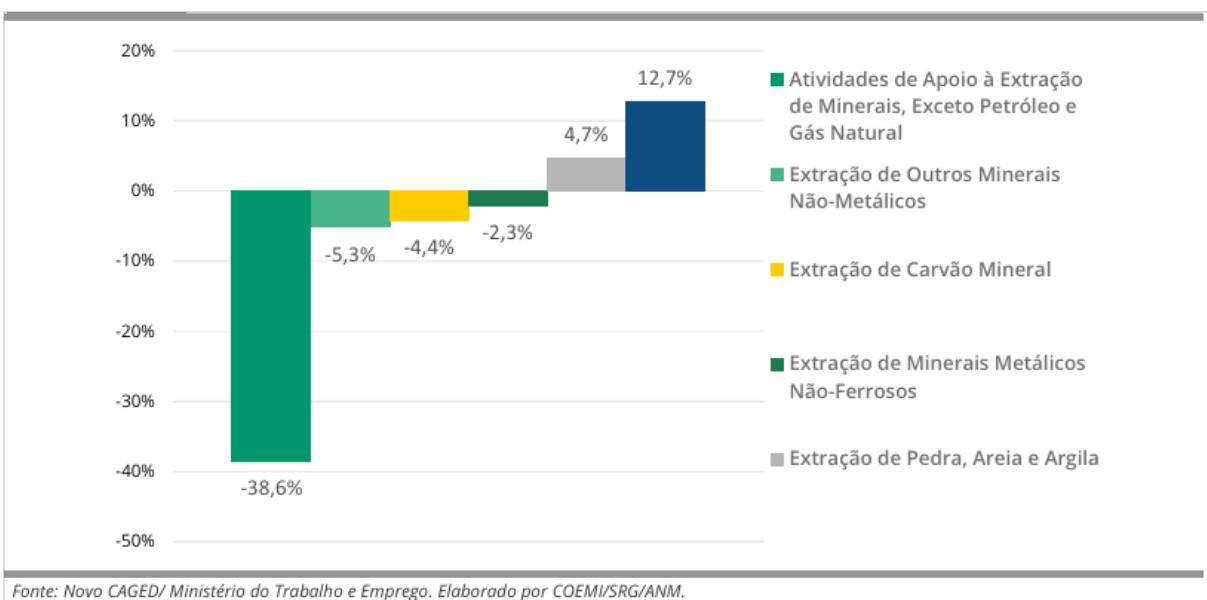


Figura 7 – Variação interanual do emprego formal na indústria extractiva (exceto petróleo e gás), por grupo CNAE 2.0 – 04TRI2023

Fonte: ANM (2023e)

2022, indicando uma estabilidade relativa em comparação com as flutuações mais acentuadas observadas em alguns grupos da IEM.

Apesar da menor quantidade de postos de trabalho diretos na IEM em comparação com a ITM, essa indústria extractiva se destaca pela geração de rendimentos elevados para seus trabalhadores. A mediana dos salários de admissão na Indústria Extractiva Mineral, considerando todos os grupos CNAE 2.0 exceto petróleo e gás, foi de

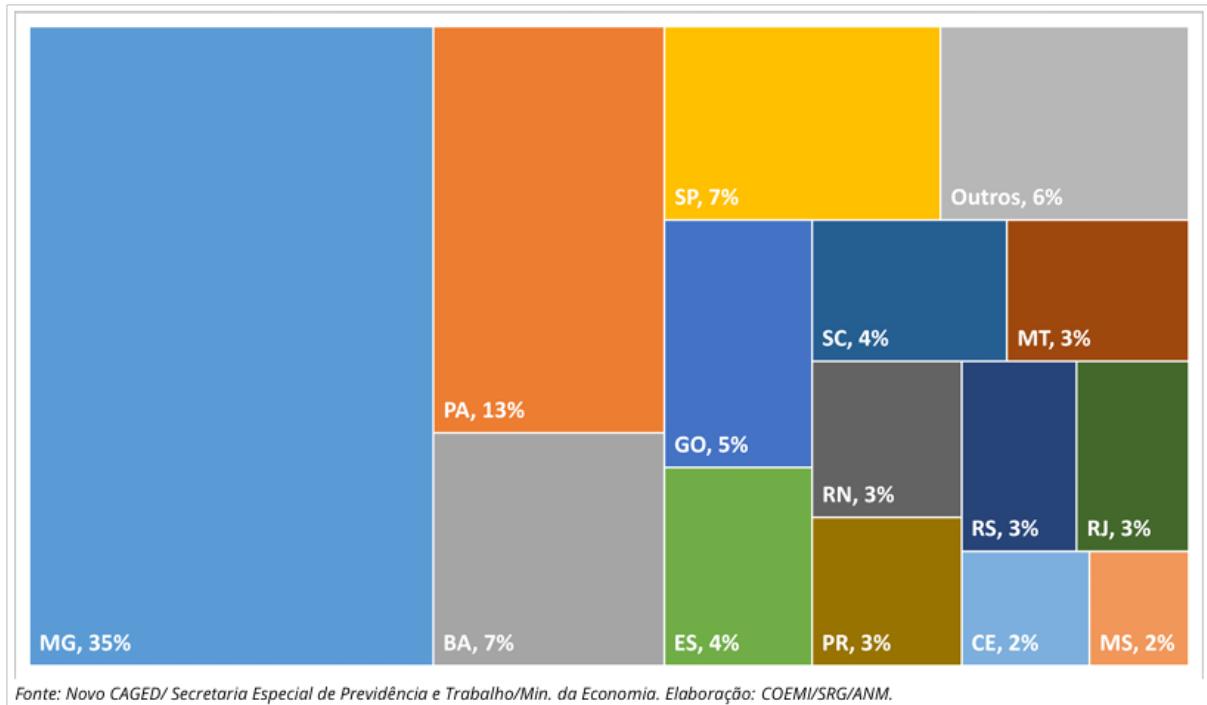


Figura 8 – Estoque de mão de obra da IEM (exceto petróleo e gás) por estado

Fonte: ANM (2023d)

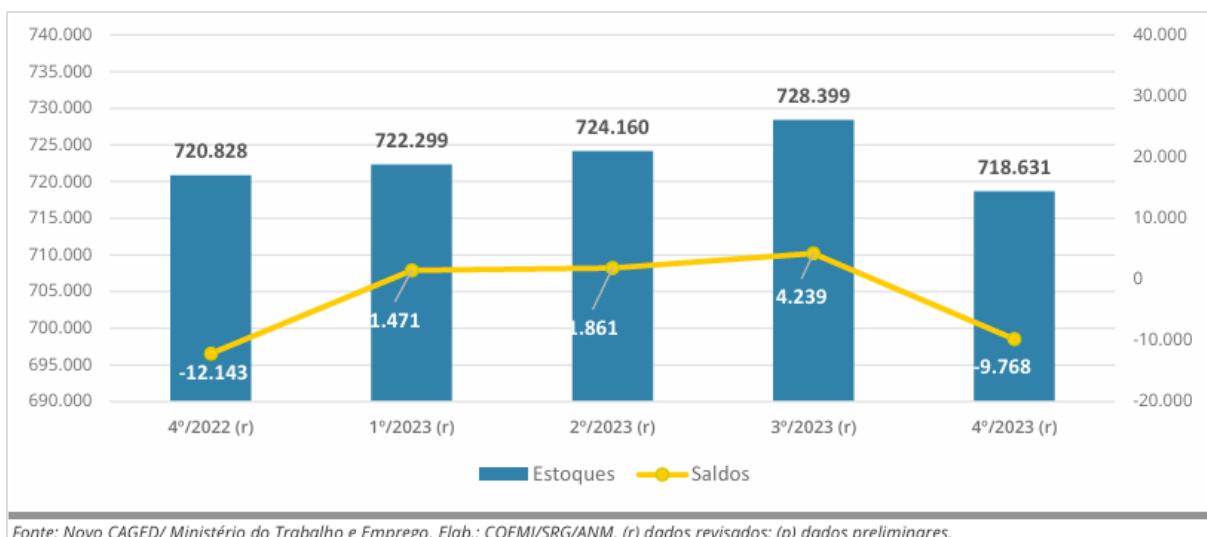


Figura 9 – Evolução do saldo e do estoque de trabalhadores da ITM – 04TRI2022 a 04TRI2024

Fonte: ANM (2023e)

R\$ 1.988,67 no 4º trimestre de 2023. Salários medianos mais altos foram observados em grupos específicos como Extração de Carvão Mineral (R\$ 3.370,31), Extração de Minério de Ferro (R\$ 2.300,43) e Extração de Minerais Metálicos Não-Ferrosos (R\$ 2.250,00) no mesmo período (Figura 11). Esta característica de alta remuneração por posto de trabalho direto reforça a contribuição econômica do setor, que vai além da mera quantidade de empregos gerados (ANM, 2023e).

Complementarmente, a Indústria Extrativa Mineral contribui de forma expressiva

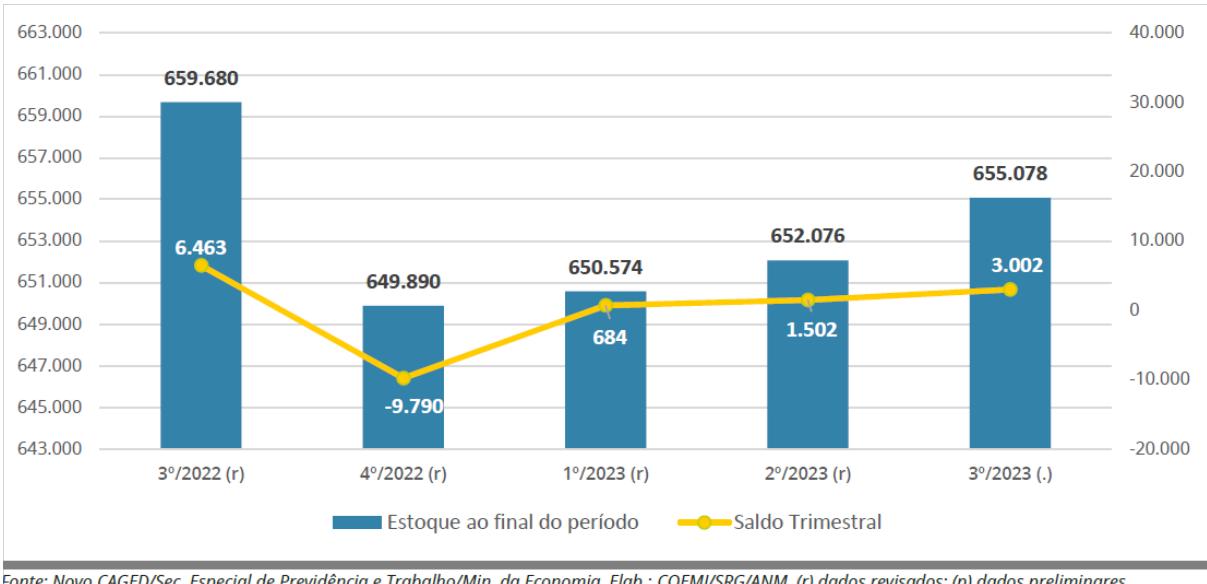


Figura 10 – Evolução do saldo e do estoque de trabalhadores da ITM – 03TRI2022 a 03TRI2024

Fonte: ANM (2023d)

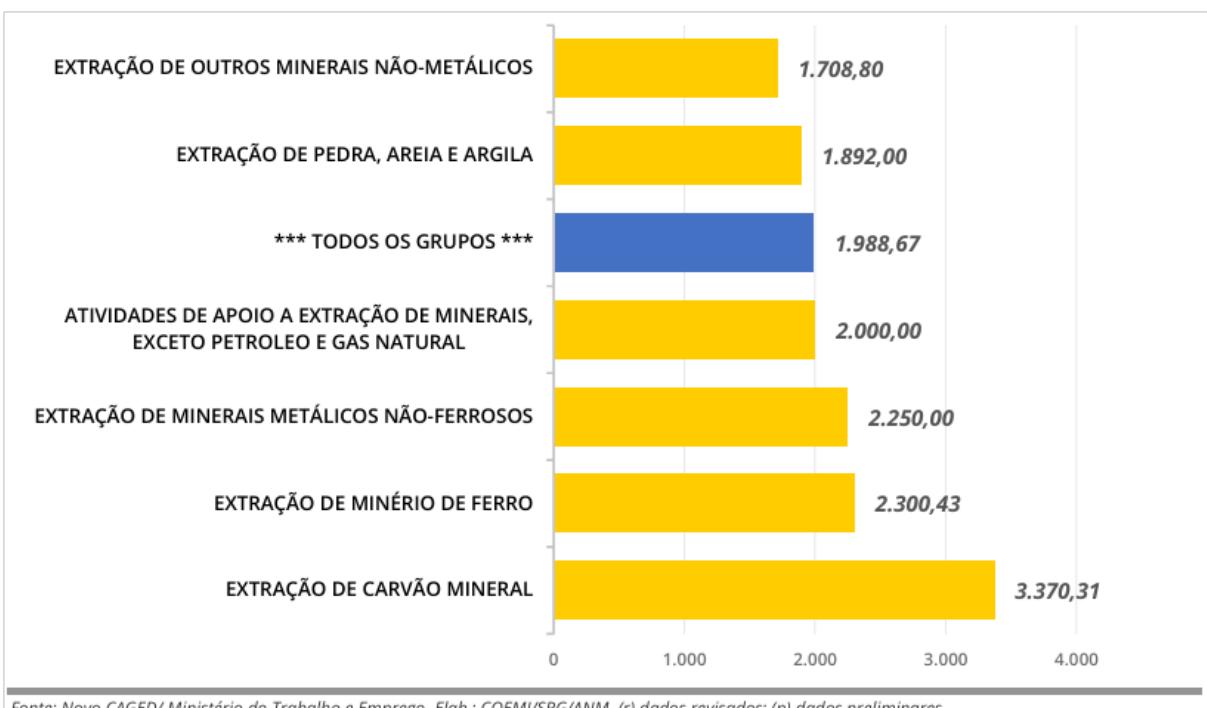


Figura 11 – Salários de admissão na extração mineral na IEM – 04TRI2023

Fonte: ANM (2023e)

para as finanças públicas por meio da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), um royalty devido pela utilização econômica dos recursos minerais (ANM, 2023a). No 3º trimestre de 2023, a arrecadação da CFEM totalizou R\$ 1,76 bilhão (ANM, 2023d), enquanto no 4º trimestre de 2023, foi de R\$ 1,80 bilhão (ANM, 2023e), em valores nominais. Os estados de Minas Gerais e Pará concentram a maior parte da arrecadação da CFEM, respondendo por 85,4% no 3º trimestre de

2023 (ANM, 2023d) e 87,4% no 4º trimestre de 2023 (ANM, 2023e), com destaque para municípios como Parauapebas (PA) e Canaã dos Carajás (PA) (ANM, 2023d; ANM, 2023e). O minério de ferro é a substância mineral que mais contribui para a CFEM (ANM, 2023d; ANM, 2023a). Estes recursos fiscais, gerados diretamente pela atividade extractiva, representam um potencial significativo para investimento em desenvolvimento local e regional.

Baseada nos informes recentes da ANM, a análise corrobora que a Indústria Extrativa Mineral no Brasil, embora menos intensiva em mão de obra direta em comparação com a Indústria de Transformação Mineral, gera postos de trabalho com rendimentos acima da média e contribui substancialmente para a arrecadação fiscal via CFEM. A dinâmica do emprego direto na IEM é granular e sujeita a eventos específicos em subgrupos de substâncias, como observado nos saldos trimestrais de 2023. A ITM, por sua vez, mantém um estoque de mão de obra maior e mais estável. Portanto, a análise da geração de emprego na mineração brasileira deve considerar a dualidade entre a natureza da extração e da transformação, bem como o potencial de encadeamento e investimento decorrente da alta geração de valor e tributos da indústria extractiva (ANM, 2023d; ANM, 2023e).

1.1.2 Geração de resíduos

Nessa sessão apresenta-se uma visão da geração de resíduos minerais.

1.1.2.1 Etapas da Mineração

A atividade de mineração compreende um conjunto de processos técnicos e operacionais, conforme estabelecido pelo Decreto nº 9.406/2018, Art. 5º, que incluem pesquisa geológica, desenvolvimento da mina, lavra, beneficiamento dos minérios, transporte, comercialização, gestão (aproveitamento) de resíduos, o armazenamento de estéreis e rejeitos e o fechamento da mina (BRASIL, 2018).

Esse processo é geralmente dividido em etapas sequenciais que orientam o planejamento e a execução dos empreendimentos. As principais fases identificadas na literatura (Figura 12) incluem a Prospecção, a Pesquisa Mineral, a Lavra e o Descomissionamento/Fechamento da Mina. Outras atividades cruciais como o Beneficiamento, a Comercialização e o aproveitamento de resíduos são por vezes incluídas no ciclo ou consideradas partes da Lavra ou etapas subsequentes (CARVALHO et al., 2018; FREIRE et al., 2020).

A seguir, são descritos os processos e as atividades associadas a cada etapa, com ênfase particular nas fases de lavra e descomissionamento de mina, devido ao seu significativo impacto nos ambientes mineiros (CARVALHO et al., 2018).

A Prospecção constitui a fase inicial do ciclo, focada na busca por concentrações de minério de interesse econômico. Nesta etapa, são realizados estudos preliminares

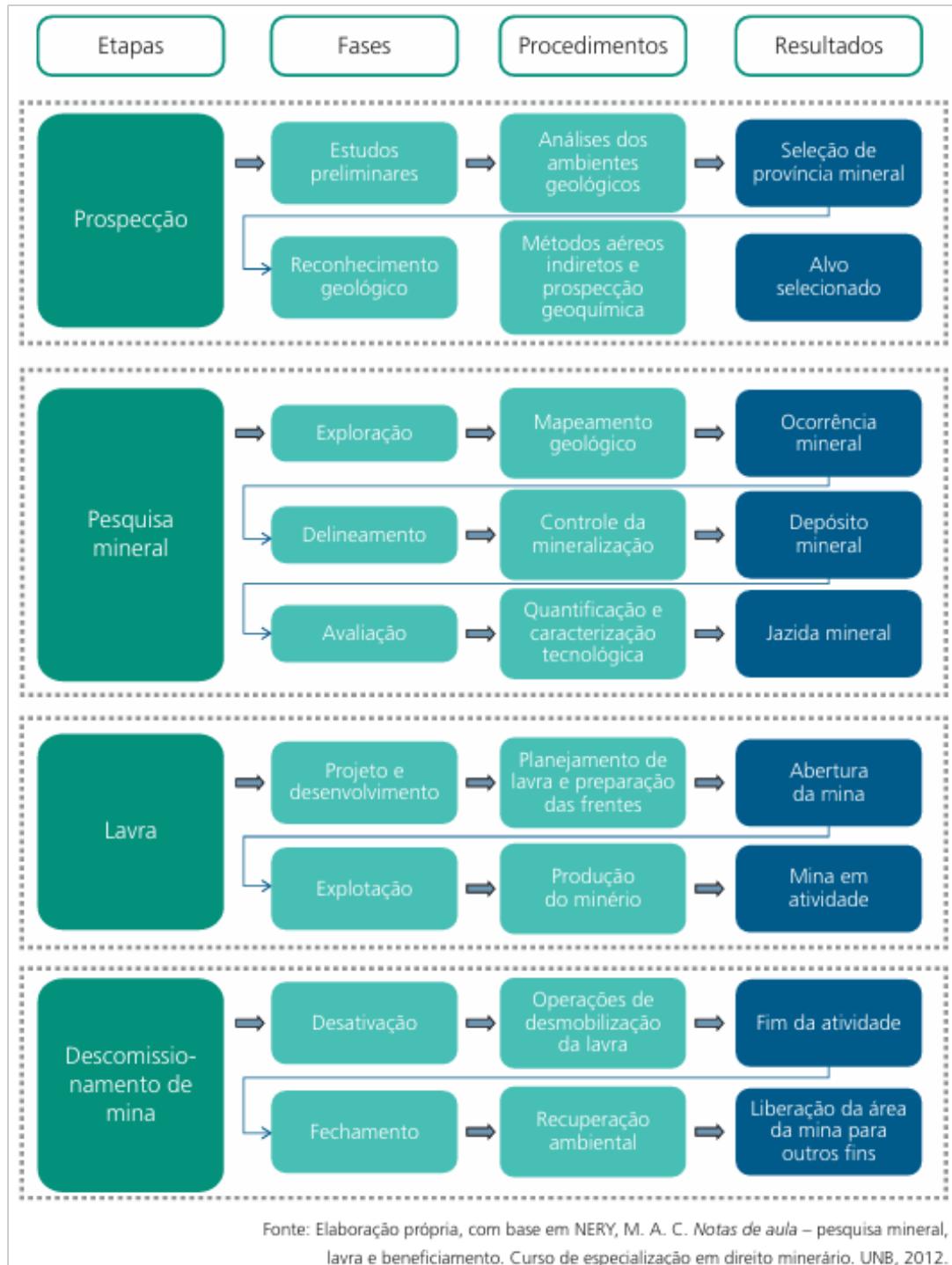


Figura 12 – Etapas da mineração.

Fonte: CARVALHO et al. (2018)

e reconhecimento geológico da área, que podem incluir análises de ambientes geológicos, métodos aéreos indiretos e prospecção geoquímica. O principal resultado da prospecção é a seleção de províncias minerais e alvos potenciais para investigações mais aprofundadas. Embora inicial, essa fase já pode gerar aspectos ambientais como mapeamento e estudos de campo, e potenciais impactos adversos como especulação financeira e pressão sobre propriedades (FREIRE et al., 2020).

Após a identificação de alvos promissores, segue-se a fase de Pesquisa Mineral, que visa caracterizar a ocorrência mineral, o depósito e a jazida. Procedimentos como mapeamento geológico, exploração, delineamento e avaliação são conduzidos para controlar a mineralização, quantificar e caracterizar tecnologicamente o material encontrado. Esta fase é fundamental para determinar a exequibilidade econômica do aproveitamento da jazida (FREIRE et al., 2020). A pesquisa mineral precede a fase de lavra e é regulada pelo Regime de Autorização (ANM, 2022).

A lavra constitui o conjunto de operações coordenadas que visam o aproveitamento industrial de uma jazida, englobando desde a extração das substâncias minerais úteis até o seu beneficiamento (HARTMAN; MUTMANSKY, 2019). Conforme estabelecido pelo Código Brasileiro de Mineração (BRASIL, 1967), essa fase essencial da mineração abrange diversas atividades (Figura 13), como o projeto e desenvolvimento da mina, a preparação das frentes de lavra, a abertura da mina e a extração do mineral, culminando no beneficiamento (CARVALHO et al., 2018; FREIRE et al., 2020). Reconhecida como a etapa mais intensiva na geração de efluentes, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos (CARVALHO et al., 2018; FREIRE et al., 2020), a lavra representa o ponto central do ciclo produtivo mineral. A complexidade das operações de lavra exige uma análise cuidadosa das características do depósito mineral e dos fatores externos para a seleção do método mais adequado.



Figura 13 – Operações de lavra.

Fonte: CARVALHO et al. (2018), p. 344 apud FREIRE et al. (2020)

Por envolver atividades com alto impacto ambiental, o início da etapa de lavra depende, em geral, de estudo de impacto ambiental (EIA), e seu respectivo relatório de impacto ambiental (Rima), e da licença ambiental dos órgãos competentes (CARVALHO et al., 2018).

A escolha do método de lavra é um fator determinante para o sucesso da operação de extração e é intrinsecamente limitada pelas características físicas do depósito mineral. Fatores como profundidade, extensão e inclinação do corpo mineralizado são primordiais para delinear as possibilidades de aplicação dos diferentes métodos de lavra (CARVALHO et al., 2018). Além das condições geológicas intrínsecas à jazida, uma série de outros aspectos devem ser considerados no planejamento, incluindo a

relação estéril-minério, a segurança das operações, a viabilidade econômica do empreendimento e critérios geológicos, sociais, geográficos e ambientais. A estabilidade da mina, a máxima recuperação do minério e a produtividade máxima também são elementos cruciais que orientam a decisão sobre qual técnica de lavra será implementada. Com base nesses fatores e nas características da jazida, a lavra é classificada em dois grandes grupos principais (CARVALHO et al., 2018; HARTMAN; MUTMANSKY, 2019).

De acordo com (HARTMAN; MUTMANSKY, 2019), esse processo é classificado em dois grandes grupos: lavra subterrânea e superficial (a céu aberto). Esta classificação baseia-se nas distintas técnicas de extração do minério, denominadas métodos de lavra, utilizadas em cada grupo (Figura 14).

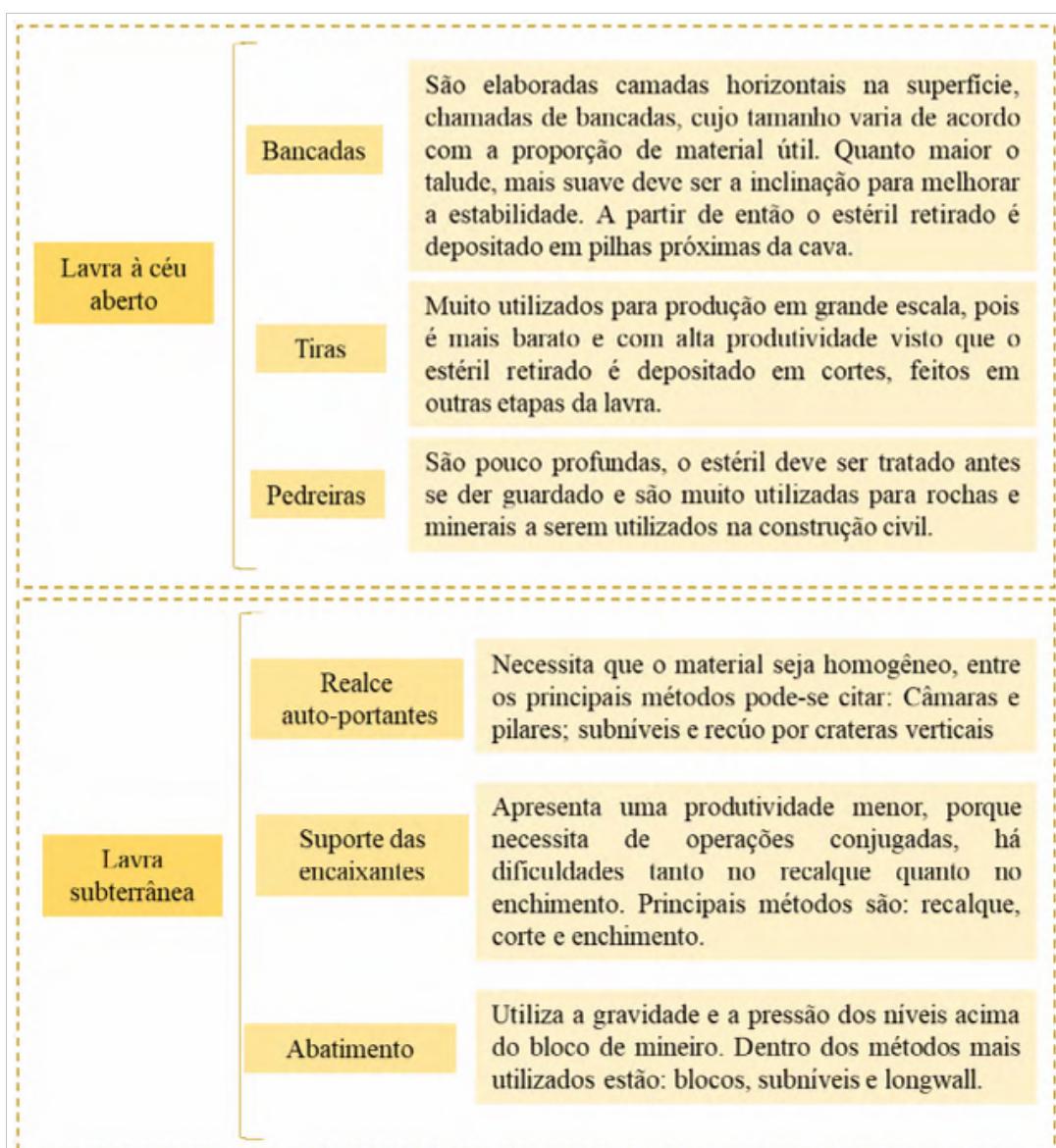


Figura 14 – Métodos de Lavra.

Fonte: HARTMAN; MUTMANSKY (2019) apud FREIRE et al. (2020)

Um dos grandes grupos de métodos é a lavra a céu aberto, também conhecida

como lavra superficial, que se caracteriza pela extração do material mineral diretamente em uma escavação realizada na superfície terrestre (HARTMAN; MUTMANSKY, 2019; FREIRE et al., 2020). Este método é tipicamente indicado para depósitos minerais que se encontram próximos à superfície, apresentando estrutura, mergulho, espessura e forma que favoreçam o acesso e a extração por meio de escavações abertas. As operações de lavra a céu aberto frequentemente envolvem a remoção de camadas de material estéril que recobrem o corpo de minério. Após a extração, o material passa por etapas subsequentes de manuseio e processamento (FREIRE et al., 2020). No Brasil, a maioria das minas opera a céu aberto (CARVALHO et al., 2018; FREIRE et al., 2020), sendo regida pelo Regime de Concessão (ANM, 2022).

O outro grande grupo de métodos de lavra é a lavra subterrânea, que, diferentemente da lavra a céu aberto, realiza a extração do minério abaixo da superfície terrestre. O acesso ao corpo de minério em uma mina subterrânea é feito através da abertura de poços, túneis e galerias, que se desenvolvem nas rochas encaixantes. Este método é usualmente adotado quando a profundidade do depósito mineral torna a lavra a céu aberto inviável economicamente ou logisticamente. A complexidade e os custos da lavra subterrânea são geralmente maiores do que os da lavra a céu aberto, mas permitem o acesso a jazidas localizadas em maiores profundidades. A decisão entre esses dois métodos principais é um ponto crítico no planejamento da mina (HARTMAN; MUTMANSKY, 2019; FREIRE et al., 2020).

Dentro da fase de Lavra, processos como Desmonte da Rocha, Carregamento e Transporte são essenciais. O desmonte envolve a extração mineral, frequentemente utilizando técnicas como perfuração e detonação. O material desmontado, chamado de *run of mine* (ROM), é então carregado e transportado para a unidade de beneficiamento, geralmente localizada próxima à mina ou para pilhas de deposição. Estes procedimentos envolvem grande movimentação de material e equipamentos pesados, gerando impactos ambientais como ruído, emissões atmosféricas e alteração da paisagem (CARVALHO et al., 2018; FREIRE et al., 2020).

O Beneficiamento (ou Tratamento ou Produção) é um processo fundamental, muitas vezes considerado etapa integrante do conjunto de operações de Lavra, que se realiza sobre o ROM (CARVALHO et al., 2018). O objetivo é separar fisicamente os minerais úteis da ganga (a parte sem interesse econômico), utilizando uma série de processos que podem incluir fragmentação (britagem, moagem), classificação (peneiramento), concentração (separação magnética, flotação) e desaguamento (FREIRE et al., 2020). Este processo gera uma grande quantidade de resíduos finos e ultrafinos, conhecidos como rejeitos, que, misturados à água do processo, formam a polpa (lama) de rejeito. A quantidade e as características dos rejeitos variam significativamente dependendo do tipo de minério, da composição da jazida e dos processos de beneficiamento adotados (IBRAM, 2016).

As fases finais do ciclo incluem o Armazenamento, Distribuição e Comercialização dos produtos minerais. O material beneficiado (concentrado) é armazenado e preparado para distribuição e venda. A comercialização é a etapa onde o produto final alcança o mercado, gerando valor econômico e impostos. Embora voltadas para o produto final, essas fases também podem gerar impactos ambientais associados ao transporte e à infraestrutura necessária. O Brasil é um grande produtor de minério de ferro, com destino principal para a China (FREIRE et al., 2020).

Finalmente, o ciclo culmina com o Descomissionamento e Fechamento da Mina. Esta fase envolve a desativação das operações, desmobilização de equipamentos e instalações, e a recuperação ambiental da área impactada (CARVALHO et al., 2018). O objetivo é devolver o local para outros usos pela comunidade, minimizando os riscos ambientais de longo prazo. O plano de fechamento deve ser elaborado e atualizado periodicamente, e o monitoramento dos efeitos posteriores, mesmo após a reabilitação inicial, é crucial para a segurança e sustentabilidade (LOZANO, 2006).

1.1.2.2 Resíduos sólidos de extração - Estéril

A atividade de mineração, conforme delineada acima, compreende diversas etapas que intrinsecamente geram materiais residuais, destacando-se entre eles o estéril e os rejeitos. O estéril é o material sólido removido durante a extração mineral (como o decapeamento superficial ou a retirada da sobrecarga) que não possui valor econômico. Geralmente mantidos na própria mina em forma de pilhas ou utilizados estratégicamente para o preenchimento de cavas exauridas. O volume de estéril produzido é influenciado pelas características geológicas da região, pela concentração da substância mineral na rocha matriz e pela localização da jazida. Este volume é determinado pela razão de estéril/minério, que representa a relação entre a quantidade de estéril a ser removida e a quantidade de minério bruto lavrado (FREIRE et al., 2020); essa produção bruta de minério, frequentemente referida como Run-of-Mine (ROM), representa a quantidade total de minério extraído diretamente da mina em um determinado ano, sem passar por qualquer processo de beneficiamento ou tratamento (ANM, 2022). Por regulamentação, os relatórios anuais de atividades mineradoras devem detalhar a relação observada entre a substância útil e o estéril, conforme estabelecido pela legislação brasileira (BRASIL, 1967).

1.1.2.3 Resíduos sólidos de beneficiamento - Rejeito

A atividade de mineração, em sua essência, compreende um conjunto de operações que vão desde a extração das substâncias minerais úteis até o seu beneficiamento. O rejeito é a porção do minério bruto que é descartada após passar pelo processo de beneficiamento ou tratamento. Este material geralmente não tem valor econômico nas condições vigentes, possuem características variáveis conforme o tipo de mineral

processado e os métodos mecânicos e/ou químicos empregados no beneficiamento, e frequentemente se apresenta misturado à água, formando uma polpa (FREIRE et al., 2020).

Os rejeitos podem apresentar-se em duas formas principais: rejeitos finos, compostos por siltes (partículas com diâmetro entre $4 \mu\text{m}$ e $64 \mu\text{m}$ segundo a escala de Wentworth, ou conforme a NBR 6502 da ABNT, solo com baixa ou nenhuma plasticidade e reduzida resistência quando seco), geralmente depositados na forma de lama ou polpa; e rejeitos granulares, com granulometria mais grossa e características arenosas. A distinção entre estas categorias é significativa do ponto de vista geotécnico, pois os rejeitos granulares apresentam elevada permeabilidade, resistência significativa ao cisalhamento e eficiente capacidade de sedimentação, facilitando sua estabilização em depósitos, enquanto os rejeitos finos apresentam desafios consideráveis no processo de sedimentação (CARVALHO et al., 2018).

O material residual proveniente do beneficiamento mineral pode ser disposto mediante duas modalidades distintas: na forma de material granular sólido, cuja transferência ocorre por meio de caminhões ou correias transportadoras; ou na forma de polpa (composta por partículas sólidas em meio aquoso), a qual é conduzida através de sistemas tubulares, valendo-se de mecanismos de bombeamento hidráulico ou do princípio físico do gradiente gravitacional (DUARTE, 2008).

A quantidade gerada está diretamente associada não apenas à concentração do mineral útil na rocha matriz, mas também ao método de lavra empregado, que influencia a geração de efluentes sólidos, líquidos e gasosos. A adequada gestão destes materiais residuais representa um desafio histórico para o setor minerário (CARVALHO et al., 2018).

1.1.2.4 Geração de resíduos sólidos (Sólidos, líquidos, gasosos)

A mineração, desde a extração das substâncias minerais úteis até o seu beneficiamento, gera invariavelmente uma grande quantidade de resíduos sólidos. Esses resíduos são principalmente categorizados como estéril e rejeito (FREIRE et al., 2020).

No Brasil, as substâncias metálicas possuem grande importância na indústria mineral, respondendo por cerca de 82% do valor total da produção mineral em 2022 (ANM, 2023a) e cerca de 89% em 2021 (ANM, 2022). Onze substâncias metálicas destacam-se por constituírem a ampla maioria do valor econômico da produção mineral brasileira, representando mais de 99% do valor total gerado nesta classe de recursos. Estas substâncias são: alumínio (extraído da bauxita), cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco (ANM, 2023a).

A produção bruta, beneficiada e comercializada dos principais minerais metálicos no Brasil está apresentada na Tabela 1, que consolida os dados de 2023.

Tabela 1 – Produção Bruta, Beneficiada e Comercializada - Principais Substâncias Metálicas 2023

Substância	Produção Bruta		Produção Beneficiada		Produção Comercializada				Valor Total (R\$)
	Quantidade (ROM)	Teor (%)	Quantidade	Teor (%)	Bruta	Valor (R\$)	Beneficiada	Valor (R\$)	
Alumínio (Bauxita)	44.245.579	41,00	31.608.694	48,00	1.214.221	52.167.556	31.753.849	5.736.766.460	5.788.934.016
Chumbo	2.971.893	1,14	29.417	28,23	-	-	26.718	167.202.096	167.202.096
Cobre	84.627.605	0,55	1.024.418	35,38	5.194	3.312.424	1.038.309	14.252.345.082	14.255.657.506
Columbita-Tantalita	0	-	10.977	34,52	-	-	10.400	237.870.337	237.870.337
Cromo	1.424.312	17,11	565.575	38,66	-	-	570.450	479.264.446	479.264.446
Estanho	-	-	28.167.100	68,08	-	-	29.878.602	1.931.850.703	1.931.850.703
Ferro	554.089.729	53,96	411.681.935	62,41	56.820.207	1.342.784.848	400.193.563	161.228.089.878	162.570.874.726
Grafita	799.100	5,11	72.780	-	187.189	4.296.564	66.352	433.404.413	437.700.977
Lítio	900.757	1,06	143.720	4,88	-	-	143.634	1.736.369.463	1.736.369.463
Manganês	2.275.200	35,18	1.172.511	38,81	147.310	58.851.555	927.079	387.119.456	445.971.011
Níobio	14.758.997	1,29	200.940	52,52	-	-	119.404	1.071.873.989	1.071.873.989
Níquel	12.392.049	0,87	360.616	17,77	113.647	28.605.629	362.082	9.042.426.931	9.071.032.560
Ouro - Concessão	67.199.488 kg	0,99 g/t	57.376 kg	99,46%	-	-	58.511 kg	16.538.812.304	16.538.812.304
Ouro - Permissão (CFEM)	-	-	-	-	-	-	29.519 kg	7.567.428.532	7.567.428.532
Vanádio	1.359.927	0,81	406.951	2,56	-	-	402.534	236.758.254	236.758.254
Zinco	2.971.892	5,82	417.964	37,13	-	-	402.774	864.595.391	864.595.391

Notas:

1. Valores em toneladas, exceto onde indicado kg (ouro)
2. Para o ouro, o teor é apresentado em g/t (gramas por tonelada)
3. ROM = Run of Mine (minério bruto)
4. O valor total representa a soma dos valores da produção comercializada bruta e beneficiada
5. Os dados apresentados correspondem ao total Brasil em 2023

A produção em larga escala desses minerais metálicos, e em particular do minério de ferro, está diretamente associada à geração do maior volume de rejeitos minerais no país. O minério de ferro é o mineral metálico com o maior volume de produção no Brasil, tornando o país o segundo maior produtor mundial, e sua produção é concentrada principalmente nos estados do Pará e Minas Gerais (FREIRE et al., 2020; IBRAM, 2023).

A Figura 15 apresenta a tabela com o cálculo da geração de estéril e rejeitos da produção de minério de ferro no Brasil, com base nos relatórios anuais de lavra apresentados ao DNPM¹ e em estimativas de produção futura (CARVALHO et al., 2018).

Entre os minerais não metálicos, os agregados para construção civil, como brita, cascalho, areia e calcário são consumidos quase em seu estado bruto, já a produção de minério de ferro requer processos de concentração. Esses processos fazem com que o minério de ferro gere o maior volume de rejeitos minerais no país (CARVALHO et al., 2018).

A razão para essa associação significativa entre a produção dos principais minerais metálicos no Brasil e a geração de resíduos é que a produção dos minerais metálicos, ao contrário de alguns não metálicos que podem ser usados com mínimo beneficiamento, requer processos intensos de beneficiamento (tratamento). É esse processo de beneficiamento que gera a maior quantidade de rejeitos. Por exemplo,

¹ Departamento Nacional de Produção Mineral, órgão federal responsável pela gestão e fiscalização das atividades de mineração no Brasil até 2017, quando foi substituído pela Agência Nacional de Mineração (ANM), criada pela Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017.

Ano	Produção	Produção	Produção	Rejeito	Rejeito	Rejeito	Rejeito	Estéril
	beneficiada	MG	PA	MG	PA	unidades	Brasil	Brasil
	Brasil					federativas		
2010	298	207	86	82,8	6,9	2,5	92,2	255,0
2011	372	260	101	104,0	8,1	5,5	117,6	321,5
2012	398	275	110	110,0	8,8	6,5	125,3	343,0
2013	401	277	107	110,8	8,6	8,5	127,9	347,5
2014	386	265	105	106,0	8,4	8,0	122,4	333,5
2015*	420	275	128	110,0	10,2	8,5	128,7	356,0
2016*	430	283	140	127,4	11,2	3,5	142,1	360,0
2017*	470	280	180	126,0	14,4	5,0	145,4	380,0
2018*	520	280	230	126,0	18,4	5,0	149,4	405,0
2019*	530	290	230	130,5	18,4	5,0	153,9	415,0
2020*	540	300	230	150,0	18,4	5,0	173,4	425,0
2021*	540	300	230	150,0	18,4	5,0	173,4	425,0
2022*	550	310	230	155,0	18,4	5,0	178,4	435,0
2023*	550	310	230	155,0	18,4	5,0	178,4	435,0
2024*	560	320	230	160,0	18,4	5,0	183,4	445,0
2025*	560	320	230	160,0	18,4	5,0	183,4	445,0
2026*	560	320	230	160,0	18,4	5,0	183,4	445,0
2027*	570	330	230	165,0	18,4	5,0	188,4	455,0
2028*	570	330	230	165,0	18,4	5,0	188,4	455,0
2029*	580	340	230	170,0	18,4	5,0	193,4	465,0
2030*	580	340	230	170,0	18,4	5,0	193,4	465,0
Soma	8.110,0	4.653,0	3.310,0	2.269,9	264,8	73,5	2.608,2	6.455,0
2016-2030								

Fonte: SANTOS, A. A.; HEIDER, M. *Aproveitamento dos resíduos da mineração de ferro.*
In: III CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIREITO MINERÁRIO. Brasília, 10 maio 2017. *Anais eletrônicos* (acesso restrito).

* Estimativa.

Figura 15 – Produção beneficiada de minério de ferro, volume de rejeito e de estéril (milhões de t).

Fonte: CARVALHO et al. (2018)

no caso do minério de ferro, o teor médio de ferro contido no minério beneficiado é de 63,72%, sendo o restante do material resultante geralmente sem valor comercial, conhecido como rejeito. Os rejeitos de minério de ferro representam 35% do volume total armazenado em barragens no Brasil, segundo dados de 2018 (IBRAM, 2016; FREIRE et al., 2020); compondo 36,30% das barragens incluídas na Política Nacional de Segurança de Barragens em 2015 (CARVALHO et al., 2018).

A vasta produção anual brasileira de ferro resulta, portanto, em um grande volume de rejeitos de minério de ferro. A Vale S/A, a maior mineradora brasileira,

produziu 320 milhões de toneladas apenas de minério de ferro em 2022 (IBRAM, 2023). O aumento da demanda por insumos minerais e a viabilidade de lavrar minérios com teores mais baixos nos últimos anos também contribuíram para um crescimento igualmente crescente na geração de resíduos da mineração (IBRAM, 2016).

A mineração, e consequentemente a geração de resíduos, está prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei 12.305/2010), sendo os resíduos de mineração uma das categorias de resíduos sólidos abrangidas pela lei (FREIRE et al., 2020).

Portanto, a produção em alta escala dos principais minerais metálicos, impulsionada pelo minério de ferro, demanda processos de beneficiamento que, por sua natureza, resultam na geração de grandes volumes de resíduos (estéril da extração e rejeito do beneficiamento), tornando a gestão desses materiais um aspecto crucial e desafiador da atividade mineradora no Brasil (FREIRE et al., 2020).

1.1.2.5 Gestão de resíduos e métodos de disposição de rejeitos

A atividade minerária, desde suas origens históricas com métodos rudimentares, tem enfrentado o desafio intrínseco da gestão dos resíduos gerados, principalmente os rejeitos provenientes do processo de beneficiamento do minério. A extração e o tratamento mineral implicam na movimentação de volumes massivos de material, dos quais apenas uma fração é a substância mineral útil, gerando um grande volume de materiais sem valor econômico imediato que requerem destinação adequada (FREIRE et al., 2020). A disposição desses rejeitos, que frequentemente se apresentam misturados à água (LOZANO, 2006), é um desafio significativo na mineração e exige a seleção de métodos adequados (CARDOZO et al., 2017).

Os métodos para a disposição dos rejeitos podem ser categorizados principalmente em três formas: a céu aberto, subterrânea e subaquática. A disposição a céu aberto é a modalidade mais comum e amplamente utilizada, ocorrendo geralmente em pilhas controladas ou em estruturas de contenção, como barragens de rejeitos, localizadas em bacias ou vales que requerem barreiras. Alternativamente, a disposição subterrânea é realizada preenchendo câmaras que sobram após a extração do minério, para onde os rejeitos são bombeados. Já a disposição subaquática não é frequentemente empregada devido aos impactos negativos, muitas vezes irreversíveis, que gera nos ecossistemas aquáticos (LOZANO, 2006).

Dentre as formas de disposição a céu aberto, as barragens de rejeitos são estruturas de contenção de rejeitos e água oriundos do beneficiamento de minério (LOZANO, 2006), e são o método mais comum de disposição de rejeitos no Brasil (IBRAM, 2016).

A construção dessas estruturas é realizada em etapas sucessivas (alteamen-
tos) utilizando diferentes metodologias, sendo as três principais: método a montante,

método a jusante e método de linha de centro (IBRAM, 2006). O método a montante, por ser considerado o mais antigo, simples e econômico, tornou-se amplamente empregado na mineração brasileira. A escolha entre esses métodos de alteamento impacta diretamente a segurança, o custo e a viabilidade da estrutura ao longo de sua vida útil (CARDOZO et al., 2017). Além desses métodos tradicionais, outras tecnologias de disposição a céu aberto incluem pilhas controladas e o preenchimento de cavas exauridas, além de métodos que visam reduzir o teor de água dos rejeitos para empilhamento, como o empilhamento drenado ou "perVIOUS dam" e o empilhamento a seco ("dry stacking") (IBRAM, 2016).

Diante dos riscos e impactos associados às barragens de rejeitos, especialmente após acidentes graves, novas abordagens para a destinação desses materiais ganharam destaque (FREIRE et al., 2020). Uma importante rota é a recuperação e reaproveitamento dos rejeitos, considerando que o rejeito de hoje pode se tornar o minério de amanhã. A busca por alternativas tecnológicas sem barragens e o desenvolvimento de tecnologia para o aproveitamento econômico desses materiais têm sido recomendados (CARVALHO et al., 2018).

O aproveitamento de rejeitos exige rigorosa caracterização técnica para garantir que sua reutilização não transfira problemas ambientais ou técnicos para outros setores. Normas técnicas brasileiras estabelecem procedimentos para amostragem (NBR 10007) e classificação ambiental de resíduos (NBR 10004), com ensaios de lixiviação e solubilização (NBR 10005, NBR 10006). A granulometria e propriedades químicas, que variam conforme o mineral e o beneficiamento, são fatores cruciais. Estudos sobre rejeitos de minério de ferro são particularmente relevantes pela sua importância econômica e volume gerado (FREIRE et al., 2020).

Pesquisas têm demonstrado a viabilidade técnica do uso de rejeitos de minério de ferro na construção civil, como agregado em microrrevestimento asfáltico, em argamassas substituindo areia ou cimento, e na produção de blocos de concreto intertravados com resultados mecânicos promissores. Além do desempenho técnico, o rejeito de ferro pode conferir estética avermelhada às peças (FREIRE et al., 2020). Além disso, alguns novos projetos de mineração já incluem, desde o início, a preocupação ambiental e utilizam métodos como filtragem e empilhamento a seco para a disposição de rejeitos, evitando barragens. Há também foco na recuperação de partículas finas e grossas por flotação para melhor aproveitamento do recurso mineral e diminuição do material a ser depositado em barragens (IBRAM, 2023). Estes exemplos ilustram o potencial de valorização dos rejeitos, representando o próximo estágio para uma mineração sustentável no Brasil. A continuidade em pesquisa, regulamentação clara e fiscalização eficaz são indispensáveis para transformar os rejeitos de um passivo em um recurso (IBRAM, 2022).

A determinação do método de disposição de rejeito mais adequado para um

empreendimento mineral é um processo complexo que exige a análise de múltiplos fatores, indo além da simples escolha entre barragens ou outros sistemas (LOZANO, 2006). Fatores como a natureza do processo de mineração, as condições geológicas e topográficas da região, as propriedades mecânicas dos materiais de rejeito e estéril, a presença de contaminantes perigosos nos rejeitos e as condições climáticas locais são essenciais (IBRAM, 2016). O planejamento rigoroso e a análise multicriterial, juntamente com a experiência dos profissionais e a consideração dos custos para minimizar riscos versus custos de acidentes, são fundamentais para uma decisão assertiva (LOZANO, 2006).

1.1.3 Tipos de barragens de rejeitos

Barragens de rejeitos constituem estruturas de engenharia essenciais para a indústria mineral, servindo como depósitos para os materiais residuais gerados durante o beneficiamento do minério. Estas obras são projetadas para reter o volume de sólidos e a água remanescente dos processos industriais, que são compostos por lama, areia e água (LOZANO, 2006; WARZYNSKI et al., 2023). A função primordial dessas estruturas é confinar os rejeitos de forma segura, prevenindo sua dispersão descontrolada no ambiente e mitigando os significativos impactos negativos associados a vazamentos ou rupturas (WARZYNSKI et al., 2023).

De acordo com a NBR 13028/2017, as barragens de mineração são definidas como:

Barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito mineral, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas. (ABNT, 2017)

Historicamente, a forma de lidar com os rejeitos minerais passou por uma evolução, desde práticas rudimentares até a adoção de técnicas de contenção mais sofisticadas. Até o século XV, a geração de rejeitos pela mineração e seus impactos ambientais eram considerados insignificantes (JÚNIOR et al., 2018; FREIRE et al., 2020). Contudo, com o advento da força a vapor e o substancial aumento na capacidade de processamento de minerais, o volume de rejeitos cresceu exponencialmente, levando à busca por métodos de disposição, com as barragens de contenção emergindo como a técnica mais comumente adotada por mineradoras e profissionais de geotecnia (JÚNIOR et al., 2018).

O planejamento e a concepção dessas barragens requerem um conhecimento profundo das características dos materiais envolvidos e do meio físico, iniciando-se idealmente com a seleção de um local adequado, considerando uma ampla gama de variáveis, incluindo aspectos geológicos, hidrológicos, geotécnicos, ambientais e de risco. A forma como essas estruturas são projetadas e construídas, incluindo os métodos de alteamento utilizados para aumentar sua capacidade ao longo do tempo, tem um impacto direto em sua estabilidade e segurança operacional (LOZANO, 2006).

1.1.3.1 Métodos de Alteamento de Barragens de Contenção de Rejeitos

A necessidade crescente de dispor grandes volumes de rejeitos de forma segura impulsionou o desenvolvimento de distintos métodos construtivos para as barragens. Do ponto de vista da engenharia geotécnica e das práticas convencionais, a literatura descreve três métodos principais de construção e alteamento para barragens de rejeitos. Estes métodos são denominados alteamento a montante, alteamento a jusante e alteamento pela linha de centro, refletindo a direção do deslocamento do eixo da barragem à medida que sua altura é aumentada (SOARES, 2010).

Segundo Warzynski et al. (2023), as barragens de rejeitos são estruturas utilizadas na indústria de mineração para armazenar os resíduos resultantes do processo de extração e beneficiamento do minério. Elas têm como objetivo conter os rejeitos, compostos por lama, areia e água, evitando sua dispersão no ambiente e os impactos negativos associados.

A escolha entre estes métodos é influenciada por uma complexa interação de fatores, tais como as características topográficas do local de implantação, o regime hidrológico, a geologia e as propriedades geotécnicas do subsolo, as características específicas dos rejeitos (granulometria, concentração), a taxa de deposição, a variação da capacidade de armazenamento e a disponibilidade de equipamentos e materiais. Entender as particularidades de cada método é fundamental para avaliar a segurança e a viabilidade de uma barragem de rejeitos específica (SOARES, 2010; WARZYNSKI et al., 2023).

1.1.3.1.1 Método de Alteamento a Montante

O método de alteamento a montante (Figura 16) é frequentemente citado como o mais antigo, simples e, historicamente, o mais econômico em termos de custos iniciais, podendo ser até 70% mais barato que alternativas (IBRAM, 2016; THOMÉ; PASSINI, 2018). Este método começa com a construção de um dique de partida, geralmente feito de material argiloso ou enrocamento (blocos de pedra) compactado. Subsequentemente, os rejeitos são lançados a partir da crista desse dique inicial, formando uma "praia" a montante que, após adensamento, serve de fundação para os

alteamentos futuros, os quais são construídos com o próprio material mais grosso dos rejeitos segregados (IBRAM, 2016; CARVALHO et al., 2018).

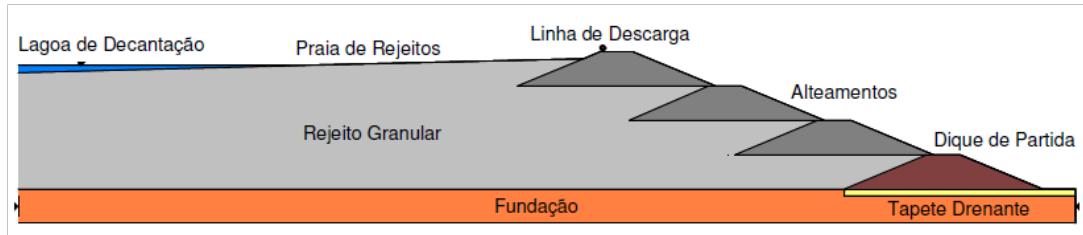


Figura 16 – Seção típica de uma barragem alteada para montante.

Fonte: FILHO (2004)

No entanto, essa prática de construir sobre rejeito previamente depositado, que ainda pode estar em processo de adensamento ou saturado, torna o método a montante altamente suscetível a problemas de estabilidade, incluindo escorregamentos e potencial de liquefação (ARAUJO, 2006). Embora econômico, o método a montante apresenta desafios técnicos significativos que têm sido associados a um maior risco de ruptura (THOMÉ; PASSINI, 2018).

Conforme destaca Araujo (2006), o método de alteamento a montante, apesar de ser amplamente adotado pela indústria mineradora, apresenta graves deficiências quanto à segurança estrutural. Sua principal vulnerabilidade reside na prática de realizar alteamentos sucessivos sobre rejeitos não consolidados, os quais, em condições de saturação e baixa compactação, demonstram reduzida resistência ao cisalhamento e elevada susceptibilidade à liquefação quando submetidos a carregamentos dinâmicos ou estáticos. Adicionalmente, este método construtivo impõe obstáculos significativos à implementação de sistemas de drenagem interna eficientes, comprometendo o controle do nível d'água na estrutura e, consequentemente, aumentando os riscos de instabilidade da barragem como um todo.

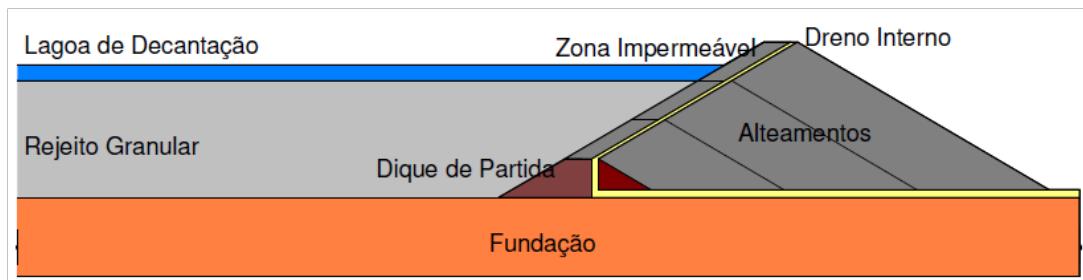


Figura 17 – Seção de um alteamento para montante sobre barragem existente.

Fonte: FILHO (2004)

1.1.3.1.2 Método de Alteamento a Jusante

Em contraste com o método a montante, o alteamento a jusante (Figura 18) é amplamente reconhecido por sua maior segurança intrínseca, decorrente principalmente do controle construtivo e do fato de os alteamentos não serem realizados sobre a massa de rejeitos previamente depositada, embora geralmente associado a custos mais elevados. Neste método, o dique de partida, construído com materiais convencionais como solo ou enrocamento compactado, serve de base, e os alteamentos subsequentes são edificados integralmente para jusante, distanciando-se do reservatório de rejeitos, expandindo a barragem para fora (IBRAM, 2016; CTS UFSJ - CAP, 2017).

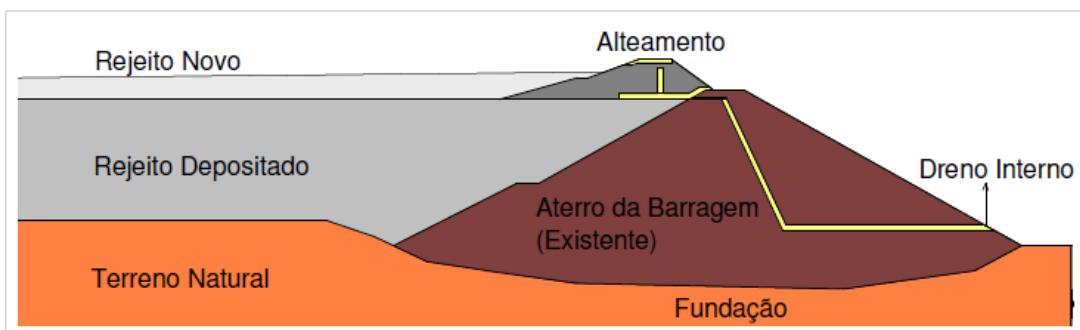


Figura 18 – Seção típica de uma barragem alteada para jusante.

Fonte: FILHO (2004)

As vantagens do método a jusante incluem a possibilidade de maior controle sobre a compactação dos materiais constituintes e a facilidade de instalação e extensão de sistemas de drenagem interna durante a construção, o que permite um controle mais eficaz da linha freática dentro do maciço da barragem, aumentando sua estabilidade. Barragens construídas a jusante geralmente requerem um maior volume de material de construção, especialmente a fração mais grossa (areia) obtida por ciclonagem. Apesar do custo potencialmente mais alto, a capacidade de projetar e construir a estrutura com a resistência necessária desde o início, inclusive para resistir a eventos sísmicos, faz deste método uma opção tecnicamente mais robusta (ARAUJO, 2006; IBRAM, 2016).

1.1.3.1.3 Método de Alteamento pela Linha de Centro

Situado como uma alternativa intermediária em termos de custo e risco entre os métodos a montante e a jusante, encontra-se o alteamento pela linha de centro (Figura 19). Este método começa com um dique de partida, e os alteamentos subsequentes são construídos de forma que o eixo da crista da barragem permaneça aproximadamente na mesma posição horizontal (linha de centro) enquanto a altura da estrutura aumenta. O crescimento ocorre tanto verticalmente quanto ligeiramente para fora, sobre a linha de centro ou sutilmente a jusante (SOARES, 2010; CTS UFSJ - CAP, 2017).

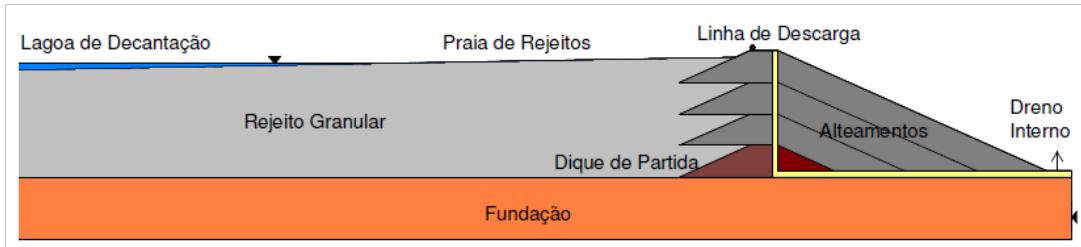


Figura 19 – Seção típica de uma barragem alteada pela linha de centro.

Fonte: FILHO (2004)

Embora apresente um risco inferior ao método a montante por não avançar continuamente sobre o rejeito saturado mais mole, pode ainda envolver a construção de diques sobre rejeitos parcialmente consolidados na área da linha de centro, o que o torna potencialmente menos seguro que o alteamento a jusante (DUARTE, 2008).

Neste caso, a construção dos alteamentos ocorre a partir de um eixo central, com os alteamentos subsequentes avançando para jusante, mas de forma que a crista da barragem se mantenha aproximadamente na mesma posição horizontal inicial. A fundação dos alteamentos repousa parcialmente sobre a "praia" de rejeitos já depositados, e parcialmente sobre o dique original ou materiais de empréstimo (IBRAM, 2016). Barragens construídas por este método recebem uma classificação de risco intermediária em alguns sistemas de avaliação (DUARTE, 2008).

A escolha do método a ser utilizado depende de diversos fatores, como o tipo de rejeito, área disponibilizada e abalos sísmicos. Dessa maneira, a Tabela 2 mostra um comparativo entre esses três métodos, evidenciando suas características distintas; e a Tabela 3 mostra as vantagens e desvantagens dos três tipos de barragens de rejeitos.

Além dos três modelos construtivos citados anteriormente, existe o método “Etapa Única” (Single Stage), no qual não há alteamentos após a construção inicial. Neste sistema, a barragem é construída em solo compactado ou enrocamento, até a sua altura final em uma única etapa, sendo mais comumente utilizado para instalações de rejeitos menores. Este método difere fundamentalmente dos demais por não permitir expansões futuras da capacidade de armazenamento, exigindo dimensionamento preciso desde a fase inicial do projeto (Vale, 2024; Teck Resources Limited, 2019).

Segundo consulta realizada no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) em maio de 2025, conforme mostra a Figura 20, a distribuição das barragens por método construtivo revela uma predominância significativa da construção em etapa única, representando 492 estruturas (53,9% do total cadastrado). O método de alteamento a jusante aparece como a segunda opção mais utilizada, com 217 barragens (23,8%), seguido pelo alteamento por linha de centro com 113 estruturas (12,4%). Em contraste, o método de alteamento a montante, reconhecido pela literatura técnica como potencialmente mais vulnerável, corresponde a apenas 51 barragens (5,6% do total). Observa-se ainda a existência de 38 barragens classificadas como

Tabela 2 – Características dos principais métodos construtivos de barragens de rejeitos

Características	Montante	Jusante	Linha de Centro
Tipo de rejeito recomendado	Baixa densidade para que ocorra segregação. Mais de 40% de areia	Qualquer tipo	Áreas ou lamas de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente. De acordo com o projeto	Periférica, conservando o eixo da barragem
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável. Não recomendado para armazenamento permanente
Resistência sísmica	Baixa. Fraca em áreas de alta sísmicidade	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos 10 m/ano. Recomendável menos de 5 a 10 m/ano, perigoso mais alto que 15 m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Requisitos de alteamento	Solo natural e/ou rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril
Custo relativo do corpo do aterro	Baixo V_m . Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Alto (3 V_m). Grande quantidade de material requerido	Moderado (2 V_m). Flexibilidade construtiva

Fonte: Adaptado de FREIRE et al. (2020) (pag. 111) e LOZANO (2006) (pag. 29).

“indefinido” (4,2%) e 7 como “desconhecido” (0,8%), indicando a necessidade de complementação de informações técnicas para essas estruturas (ANM SISTEMA, 2020).

Em suma, enquanto o método a montante oferece vantagens econômicas iniciais notáveis, o método a jusante é tecnicamente mais robusto e seguro, especialmente em termos de estabilidade e controle de percolação, embora apresente um custo mais elevado (JÚNIOR et al., 2018). Por sua vez, o método pela linha de centro busca um equilíbrio, combinando aspectos dos outros dois, e seu comportamento geotécnico se aproxima mais do método a jusante. Portanto, a análise comparativa desses métodos é fundamental para orientar a tomada de decisão técnica mais adequada a cada contexto específico (ARAUJO, 2006).

A segurança e a gestão de barragens de rejeitos ganharam foco global e nacional após acidentes catastróficos, como os de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) no Brasil, que foram associados a barragens com alteamento a montante. Estes eventos trágicos

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos três tipos de barragens de rejeitos

	Método de Montante	Método de Jusante	Método da Linha de Centro
Método construtivo	Método mais antigo, e o mais empregado. Construção de dique inicial e os diques do alteamento periféricos com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com “underflow” de ciclonagem. Lançamento a partir da crista por ciclonagem ou “spigots”.	Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. Dreno interno e impermeabilização a montante.	Variação do método de jusante.
Vantagens	Menor custo. Maior velocidade de alteamento. Utilizado em lugares onde há limitante de área.	Maior segurança. Compactação de todo o corpo da barragem. Pode-se misturar os estéreis da lavra.	Variação do volume de “underflow” necessário com relação ao método da jusante.
Desvantagens	Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de “piping”.	Necessidade de grandes quantidades de “underflow” (problemas nas 1 ^{as} etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).	Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante.

Fonte: Adaptado de LOZANO (2006) (pag. 29).

evidenciaram a necessidade urgente de revisão e fortalecimento das regulamentações e padrões de segurança (WARZYNSKI et al., 2023). A legislação brasileira, por exemplo, foi atualizada, com a NBR 13028 (2017) estabelecendo requisitos mínimos para projetos, incorporando critérios mais rigorosos para fatores de segurança, análises de risco, estudos tecnológicos e sísmicos, e a obrigatoriedade de Planos de Ações Emergenciais (PAE) para barragens com alto Dano Potencial Associado (DPA) (??). De acordo com a Lei nº 12.334/2010, é obrigatório “exigir do empreendedor a anotação de responsabilidade técnica, por profissional habilitado pelo Sistema Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (Confea) / Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (Crea), bem como o cumprimento das recomendações presentes nos relatórios de inspeção e revisão de segurança” (BRASIL, 2010).

Em Minas Gerais, berço de grande parte desses acidentes, o Decreto estadual

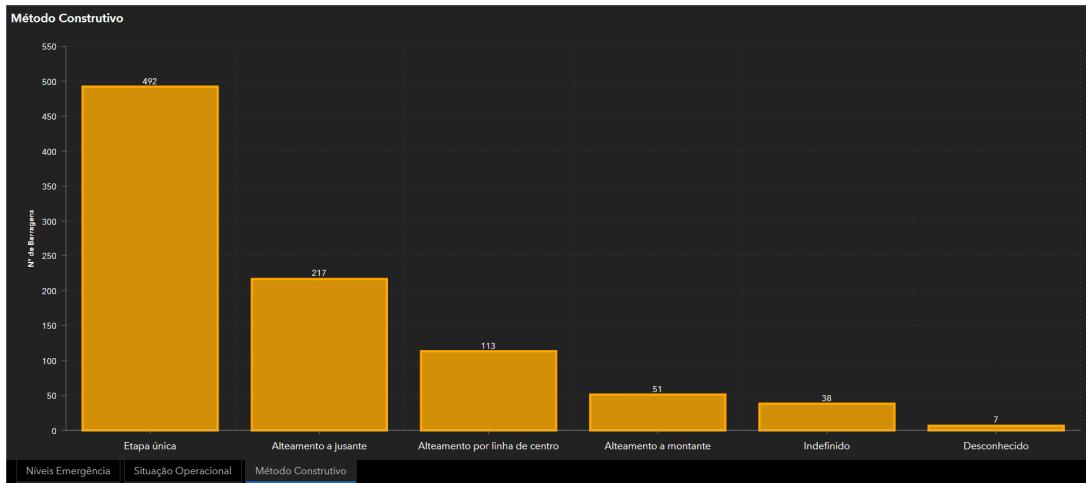


Figura 20 – Distribuição das barragens por método construtivo

Fonte: ANM SISTEMA (2020)

46.993/2016, fundamentado nas características técnicas e na maior suscetibilidade do método a montante, instituiu medidas mais rigorosas e suspendeu o licenciamento ambiental para novas barragens que utilizassem essa técnica. Essas mudanças regulatórias refletem uma clara tendência para desencorajar ou proibir os métodos de disposição considerados de maior risco (IBRAM, 2016; THOMÉ; PASSINI, 2018).

"Em relação ao dano potencial associado (DPA) pode-se afirmar que representa uma avaliação que relaciona entre o volume de rejeitos no reservatório e os impactos sociais, ambientais e econômico."(JÚNIOR et al., 2018)

A avaliação contínua da segurança estrutural e ambiental das barragens é garantida, em grande parte, pela implementação e monitoramento de sistemas de instrumentação. Estes sistemas são projetados para medir parâmetros geotécnicos e ambientais cruciais que indicam o comportamento da estrutura ao longo do tempo (SOARES, 2010). Instrumentos como piezômetros (do tipo "Stand pipe" ou elétricos de corda vibrante) monitoram os níveis de água no interior da barragem, placas de recalque e marcos de deslocamentos superficiais medem deformações, e medidores de vazão controlam a percolação. O acompanhamento desses dados, idealmente com frequência regular (semanal ou quinzenal, ou diária em situações críticas), permite identificar anomalias e tomar medidas corretivas em tempo hábil para manter a segurança (SOARES, 2010; JÚNIOR et al., 2018).

Complementar à instrumentação e ao monitoramento de campo, a análise de estabilidade, frequentemente realizada com o auxílio de ferramentas de modelagem numérica, é fundamental nas fases de projeto e operação. A avaliação da estabilidade de barragens de rejeitos, conforme diretrizes normativas como a NBR 13028 (ABNT, 2017), exige análises rigorosas do maciço, da fundação e das interações entre eles. Essas análises abrangem o dique de partida, a fundação, os alteamentos e o próprio corpo de rejeito, visando identificar superfícies potenciais de ruptura. A modelagem

numérica, particularmente utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), tornou-se uma ferramenta padrão para simular o comportamento tensão-deformação da estrutura, prevendo recalques, deformações e potenciais zonas de ruptura (JÚNIOR et al., 2018).

A análise de percolação também é vital para entender o fluxo de água dentro e sob a barragem, utilizando redes de fluxo para estimar poropressões que influenciam a estabilidade em condições drenadas. A contínua pesquisa e aplicação dessas técnicas são cruciais para aprimorar tanto os projetos de barragens quanto as soluções de disposição alternativas. Projetistas utilizam rotineiramente softwares comerciais que implementam métodos de equilíbrio limite para realizar essas verificações, como os métodos de Bishop simplificado, Janbu, Spencer, e Morgenstern & Price (ARAUJO, 2006; JÚNIOR et al., 2018).

A análise dos acidentes históricos e a literatura especializada sobre falhas em barragens de rejeitos indicam que, embora as causas técnicas (como liquefação e entubamento) sejam bem definidas, a origem primária dos problemas frequentemente reside em falhas de gestão. As principais causas de acidentes são atribuídas à liquefação (46,7%) e ao entubamento (24,4%) (SOARES, 2010). No entanto, o gerenciamento inadequado ou a má execução de projetos e administração são vistos como os fatores que permitem que as condições técnicas desfavoráveis se desenvolvam e levem à ruptura (DUARTE, 2008; CARNEIRO, 2018).

A evolução das normas, a busca por métodos construtivos mais seguros e a crescente exploração do reaproveitamento de rejeitos refletem uma maior maturidade do setor mineral em relação aos desafios ambientais e de segurança. O setor reconhece a necessidade de aprender com os acidentes e aprimorar suas práticas de gestão. A preocupação com o meio ambiente transcendeu a teoria e se manifesta em ações para reduzir impactos. Apesar dos avanços, persistem desafios como a complexidade regulatória e a necessidade de formar profissionais qualificados (IBRAM, 2023).

1.1.4 Panorama Brasil vs. Mundo

A implementação de diferentes metodologias construtivas para barragens de contenção de rejeitos constitui uma prática amplamente difundida no cenário mineralício internacional, incluindo o contexto brasileiro, onde é adotada sistematicamente por empresas de grande porte do setor. A Vale S.A., uma das maiores corporações mineradoras globais, emprega estratégicamente os métodos de alteamento a jusante, a montante e por linha de centro em suas diversas operações, adaptando a escolha técnica às características geotécnicas específicas de cada empreendimento (Vale, 2024). Similarmente, a Teck Resources Limited diversifica sua abordagem construtiva, utilizando os métodos upstream (a montante), downstream (a jusante), centreline (linha de centro) e single stage (etapa única), além de combinações híbridas desses sistemas, distribuídos entre suas unidades operacionais no Canadá, Estados Unidos

e Chile, demonstrando a versatilidade e adaptabilidade regional dessas tecnologias (Teck Resources Limited, 2019).

Contudo, a análise crítica dos métodos revela disparidades significativas em termos de desempenho técnico e segurança operacional. O método de alteamento a montante, apesar de apresentar vantagens econômicas substanciais que o tornam amplamente adotado na mineração brasileira devido aos menores custos de implementação e menor demanda de materiais de construção, manifesta limitações estruturais consideráveis. Estas limitações se traduzem em menor confiabilidade geotécnica, maior suscetibilidade a instabilidades e elevada propensão a falhas catastróficas, particularmente quando submetido a condições adversas como eventos sísmicos, variações do nível freático ou saturação excessiva dos materiais depositados (CARDOZO et al., 2017).

O método de alteamento a montante tem enfrentado crescentes restrições em diversos países devido às suas vulnerabilidades estruturais intrínsecas. Segundo (THOMÉ; PASSINI, 2018), esta técnica construtiva tornou-se proibida em algumas jurisdições internacionais, particularmente em regiões geologicamente instáveis. O Chile e o Peru, países situados na zona de convergência das placas tectônicas de Nazca e Sul-Americana, exemplificam essa tendência restritiva ao não admitirem a aplicação dessa metodologia em seus territórios. A decisão técnica desses países fundamenta-se na incompatibilidade entre o método a montante e as condições sísmicas características dessas regiões, onde a atividade tectônica intensa gera tremores de terra que podem comprometer severamente a estabilidade estrutural das barragens construídas por essa técnica.

No contexto brasileiro, a regulamentação do método a montante evoluiu gradualmente, inicialmente através de medidas de controle e auditoria. O Decreto n. 46.993, de 2 de maio de 2016, do Estado de Minas Gerais, representou um marco inicial ao instituir a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem especificamente para empreendimentos que utilizassem ou tivessem utilizado o método de alteamento a montante para disposição de rejeitos de mineração. Esta medida reconhecia implicitamente os riscos associados a essa metodologia construtiva, estabelecendo mecanismos de monitoramento mais rigorosos para estruturas consideradas menos seguras em relação aos demais métodos disponíveis (THOMÉ; PASSINI, 2018).

A legislação brasileira experimentou uma transformação radical em 2019, quando foi estabelecida a proibição completa da construção e alteamento de barragens de mineração pelo método a montante. Esta decisão legislativa foi diretamente motivada pelos desastres ambientais de proporções catastróficas ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), considerados os maiores acidentes ambientais da história do país (ANM, 2023b; Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2020; Agência Brasil, 2019). A Lei nº 14.066/2020, que alterou substancialmente a Política Nacional

de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), formalizou essa proibição através de seu artigo 2º-A, estabelecendo de forma inequívoca que "fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante"(ANM, 2023b; Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2020). A definição legal caracteriza este método como aquele no qual os diques de contenção se apoiam diretamente sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente depositado, configuração que apresenta riscos estruturais significativos (ANM, 2023b).

Além da proibição de novas construções, a legislação determinou a descaracterização obrigatória das estruturas preexistentes construídas ou alteadas por esse método, processo que envolve a eliminação completa da função de barragem de rejeitos. O prazo inicial estabelecido foi de 25 de fevereiro de 2022 para conclusão da descaracterização, independentemente do volume de material armazenado. Contudo, reconhecendo a complexidade técnica e operacional envolvida nesse processo, a legislação previu a possibilidade de prorrogação do prazo pela ANM, mediante comprovação de inviabilidade técnica para execução no período determinado, desde que referendada pela autoridade licenciadora ambiental competente (ANM, 2023b; Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2020).

No âmbito estadual, Minas Gerais adotou uma postura ainda mais restritiva através da Lei Estadual nº 23.291/2019, estabelecendo prazo mais exíguo até 25 de fevereiro de 2021 para a descaracterização. No entanto, a complexidade técnica inerente a esses processos resultou em numerosos casos de prorrogação, formalizados mediante termos de compromisso estabelecidos com o Ministério Público, demonstrando a necessidade de equilibrar urgência regulatória com viabilidade técnica de execução (FEAM, 2024).

O sistema de fiscalização das barragens de mineração opera através de uma estrutura dual, envolvendo a ANM e os órgãos ambientais estaduais. As empresas mineradoras estão sujeitas a um conjunto rigoroso de obrigações, incluindo a notificação imediata de qualquer alteração nas condições de segurança das barragens, garantindo resposta rápida a situações de risco potencial (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2020). A documentação técnica relacionada aos processos de descaracterização deve ser elaborada por profissionais habilitados e submetida à revisão por consultoria externa especializada, assegurando independência técnica na avaliação dos projetos (ANM, 2023b).

As empresas devem ainda cumprir obrigações abrangentes de transparéncia, segurança e acompanhamento das obras, conforme especificado nos termos de compromisso firmados com os órgãos de controle competentes (FEAM, 2024). O descumprimento dessas determinações legais pode resultar em sanções severas, incluindo embargo ou suspensão integral das atividades do complexo mineral até a regularização das não-conformidades identificadas. Este sistema de penalidades visa

garantir a aderência às normas de segurança e a priorização da proteção ambiental e social sobre interesses econômicos de curto prazo (ANM, 2023b).

1.2 Classificação de risco das barragens de rejeitos

A gestão da segurança de barragens, especialmente aquelas destinadas à acumulação de água, disposição de rejeitos e resíduos industriais, constitui um tema de crescente relevância no Brasil, impulsionado por desafios inerentes à atividade e, notavelmente, por eventos accidentais de grande impacto (CARVALHO et al., 2018; Geoscan, 2020). A mineração, por exemplo, gera volumes substanciais de resíduos sólidos, grande parte dos quais é disposta em barragens de rejeitos, demandando mecanismos aprimorados de gestão e desenvolvimento de tecnologias de baixo risco. A gestão desses resíduos envolve desde o planejamento e destinação adequada até o monitoramento contínuo das estruturas de deposição (CARVALHO et al., 2018). A necessidade de regulamentação robusta para garantir a segurança dessas estruturas, minimizando riscos e impactos ambientais e sociais, culminou na criação de um marco legal específico (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012; CARVALHO et al., 2018).

Em resposta à crescente preocupação com a segurança e após acidentes significativos, foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012; MOECKE, 2019). A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu a PNSB, definindo padrões mínimos de segurança para barragens de múltiplos usos (acumulação de água, disposição de rejeitos e resíduos industriais) que possuam características como altura maior ou igual a 15 m, volume maior ou igual a 3 hm³, contenham resíduos perigosos, ou apresentem dano potencial associado médio ou alto (CARVALHO et al., 2018; MOECKE, 2019). O objetivo primordial da PNSB é reduzir a ocorrência de acidentes e suas consequências, visando à proteção da população e do meio ambiente. Este marco legal inicial criou a base para um sistema de classificação que auxiliaria na implementação de medidas de segurança adequadas (MOECKE, 2019).

Com base no que foi estabelecido pela PNSB, o detalhamento dos critérios de classificação foi elaborado pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012, publicada em 04/09/2012, estabeleceu os critérios gerais para a classificação das barragens (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012). Conforme esta resolução, a classificação é realizada principalmente por três vertentes: Categoria de Risco (CRI), Dano Potencial Associado (DPA) e pelo volume do reservatório (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012; MOECKE, 2019). A classificação de barragens é uma atividade fundamental, concentrada na fase inicial da implementação da PNSB, permitindo que as entidades fiscalizadoras conheçam o estado das estruturas sob sua jurisdição, embora a

classificação possa ser alterada ao longo dos anos (MOECKE, 2019).

A Categoria de Risco (CRI) é classificada como alta, média ou baixa, leva em conta aspectos da própria barragem que podem influenciar a possibilidade de ocorrência de um acidente, baseando-se na avaliação de três parâmetros principais (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012; Geoscan, 2020):

1. **Características Técnicas (CT):** Avalia aspectos estruturais e de projeto da barragem, incluindo altura, comprimento, tipo de barragem, tipo de fundação, idade da barragem e vazão de projeto.
2. **Estado de Conservação (EC):** Considera as condições físicas atuais da estrutura, incluindo a existência de percolação, deformações, deterioração dos taludes, e existência de dispositivos de controle.
3. **Plano de Segurança da Barragem (PSB):** Verifica a existência e conformidade da documentação de segurança, incluindo o próprio Plano de Segurança, inspeções regulares, regras operacionais e relatórios de monitoramento.

Cada um destes parâmetros recebe uma pontuação específica de 0 a 10 com base nos dados da barragem em estudo. A soma destas pontuações determina a faixa da Categoria de Risco. Um aspecto crítico nesta metodologia é que uma pontuação ≥ 8 em qualquer coluna de Estado de Conservação implica automaticamente na classificação como de Alto Risco, exigindo providências imediatas pelo responsável da barragem (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012).

Enquanto a Categoria de Risco (CR) foca nas condições da barragem em si, o Dano Potencial Associado (DPA) olha para as potenciais consequências de uma falha (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012).

Conforme definido na legislação, o Dano Potencial Associado (DPA) refere-se ao impacto que pode ocorrer em caso de rompimento, vazamento, infiltração ou mau funcionamento.

“V - dano potencial associado: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais;” (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012).

A classificação quanto ao DPA é subdividida em alto, médio ou baixo, sendo função do potencial de perda de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes de um rompimento, além da capacidade de armazenamento do reservatório (BRASIL, 2010; Geoscan, 2020).

O artigo 5º da legislação vigente estabelece sete critérios fundamentais para a classificação do dano potencial associado em estruturas de contenção de rejeitos minerais, organizados em uma hierarquia que prioriza a proteção da vida humana e dos recursos ambientais estratégicos (BRASIL, 2010):

1. **Risco à vida humana:** presença de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
2. **Infraestrutura habitacional:** existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos e comunitários;
3. **Infraestrutura geral:** presença de sistemas de infraestrutura ou serviços essenciais;
4. **Serviços públicos:** existência de equipamentos de serviços públicos considerados essenciais;
5. **Patrimônio ambiental:** presença de áreas protegidas definidas na legislação ambiental;
6. **Características dos materiais:** natureza específica dos rejeitos ou resíduos armazenados; e
7. **Dimensão física:** volume total da estrutura de contenção.

A determinação do Dano Potencial Associado fundamenta-se em uma análise sistemática e multidisciplinar que consolida os sete critérios legais em quatro dimensões analíticas principais, cada uma contribuindo de forma ponderada e complementar para a classificação final da estrutura (BRASIL, 2010; CARNEIRO, 2018; Geoscan, 2020):

1. **Dimensão física:** volume do reservatório e características técnicas da estrutura;
2. **Dimensão humana:** existência e densidade populacional a jusante da estrutura;
3. **Dimensão ambiental:** impacto potencial sobre ecossistemas e áreas protegidas;
4. **Dimensão socioeconômica:** impacto sobre infraestrutura, serviços públicos e atividades econômicas regionais.

O processo de classificação do DPA utiliza uma metodologia quantitativa na qual cada um dos quatro critérios mencionados recebe uma pontuação que varia de 0 a 10, baseada nas características específicas da barragem em estudo (BRASIL, 2010; CARNEIRO, 2018). É importante notar que a legislação em vigor no Brasil classifica o DPA como alto sempre que houver ocupação permanente na área afetada a jusante da barragem, independentemente de outras características (MOECKE, 2019). Barragens

classificadas com DPA Alto devem sempre conter um Plano de Ação de Emergência (PAE) (FREIRE et al., 2020).

A classificação das barragens pela matriz de categoria de risco (CRI) e dano potencial (DPA) associado direciona a elaboração do Plano de Segurança de Barragem (PSB) e outros documentos regulatórios, como o Plano de Ação de Emergência (PAE) (MOECKE, 2019).

As Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam o sistema de classificação da Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) proposto pelo CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012).

1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS [CT]					
Altura [a]	Comprimento [b]	Tipo de Barragem [c]	Tipo de Fundação [d]	Idade da Barragem [e]	Vazão de Projeto [f]
≤ 15 m [0]	≤ 200 m [2]	Concreto Convencional - CCV [1]	Rocha sã [1]	entre 30 e 50 anos [1]	CMP ou TR 10.000 [3]
15m < H < 30m [1]	> 200 m [3]	Alvenaria de Pedra / Concreto Ciclopico / CCR [2]	Rocha alterada dura com tratamento [2]	entre 10 e 30 anos [2]	TR 1.000 [5]
30m ≤ H ≤ 60m [2]	-	Terra homogênea / Enrocamento / Terra e Enrocamento [3]	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento [3]	entre 5 e 10 anos [3]	TR 500 [8]
H > 60m [3]	-	-	Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto [4]	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação [4]	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável [10]
-	-	-	Solo residual / aluvião [5]	-	-

CT = Σ (a até f):

Figura 21 – Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Características Técnicas

Fonte: Moecke (2019) de acordo com Resolução nº 143 CNRH

O método de classificação estabelecido utiliza um total de 21 critérios técnicos, cujos valores são somados para a definição da classe de risco e de dano potencial associado (CRUZ, 2024b). A metodologia segue as equações apresentadas a seguir:

$$\text{Classe de risco} = \sum CT + \sum EC + \sum PS \quad (1)$$

$$\text{Classe de dano} = \sum DPA \quad (2)$$

onde:

- CT = Características Técnicas;
- EC = Estado de Conservação;
- PS = Plano de Segurança da Barragem;
- DPA = Dano Potencial Associado.

2. ESTADO DE CONSERVAÇÃO [EC]					
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras [g]	Confiabilidade das Estruturas de Adução [h]	Percolação [i]	Deformação e Recalques [j]	Deterioração dos taludes / Parâmetros [k]	Eclusa [l]*
Estruturas civis e hidroeletrônicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos [0]	Estruturas civis e dispositivos hidroeletrônicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento [0]	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem [0]	Inexistente [0]	Inexistente [0]	Não possui eclusa [0]
Estruturas civis e hidroeletrônicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente. [4]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente. [7]	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas [4]	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo [3]	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. [1]	Estruturas civis e hidroeletrônicas bem mantidas e funcionando [1]
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente. [7]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas [6]	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico [5]	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento [5]	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva [5]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação [2]
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas [10]	-	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente [8]	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança [8]	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança [7]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e sem medidas corretivas [4]

EC = Σ (g até l):

Figura 22 – Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Estado de Conservação

Fonte: Moecke (2019) de acordo com Resolução nº 143 CNRH

3. PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGENS [PS]					
Existência de documentação de projeto [n]	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem [o]	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento [p]	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem [q]	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação [r]	
Projeto executivo e <i>as built</i> [0]	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem [0]	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento [0]	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre [0]	Emite regularmente os relatórios [0]	
Projeto executivo OU <i>as built</i> [2]	Possui técnico responsável pela segurança da barragem [4]	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção [3]	Não [6]	Emite os relatórios sem periodicidade [3]	
Projeto básico [4]	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem [8]	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento [5]	-	Não emite os relatórios [5]	
Anteprojeto ou projeto conceitual [6]	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento [6]	-	-	
Documentação inexistente [8]	-	-	-	-	

PS = Σ (n até r):

Figura 23 – Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Plano de Segurança de Barragens

Fonte: Moecke (2019) de acordo com Resolução nº 143 CNRH

4. DANO POTENCIAL ASSOCIADO [DPA]			
Volume total do reservatório [a]	Potencial de perdas de vidas humanas [b]	Impacto ambiental [c]	Impacto socioeconômico [d]
Pequeno < = 5 milhões m ³	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descharacterizada de suas condições naturais)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem)
[1]	[0]	[3]	[0]
Médio: 5 milhões a 75 milhões m ³	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação)
[2]	[4]	[5]	[4]
Grande: 75 milhões a 200 milhões m ³	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas)	-	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação)
[3]	[8]	-	[8]
Muito Grande: > 200 milhões m ³	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)	-	-
[5]	[12]	-	-
DPA = Σ (a até d):			

Figura 24 – Matriz de classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA)

Fonte: Moecke (2019) de acordo com Resolução nº 143 CNRH

	CRI	DPA
ALTO	≥ 60 ou EC* ≥ 8	≥ 16
MÉDIO	35 a 60	10 a 16
BAIXO	≤ 35	≤ 10

* Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.

Figura 25 – Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

Fonte: (MOECKE, 2019) de acordo com Resolução nº 143 CNRH

A partir dos valores resultantes dos somatórios, classifica-se a barragem quanto à sua categoria de risco e dano potencial associado, de acordo com a Figura 25 (MOECKE, 2019).

A Resolução nº 91 da Agência Nacional de Águas (ANA), de 02 de abril de 2012, apresenta o Plano de Segurança de Barragens (PSB) como um dos instrumentos da PNSB e regulamenta sua implementação. A resolução introduziu como instrumento central a Matriz de Classificação da Barragem, ferramenta que articula sistematicamente a Categoria de Risco com o Dano potencial Associado, estabelecendo um sistema de agrupamento das barragens em classes distintas (CARVALHO et al., 2018; MOECKE, 2019). Este sistema classificatório passou a orientar a elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB) de acordo com o nível de risco específico de cada empreendimento mineral. Posteriormente, a matriz originalmente proposta em 2012

foi reformulada pela Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017, que promoveu uma simplificação do sistema ao reduzir o número de classes de risco de cinco categorias (A, B, C, D e F) para quatro classificações (A, B, C e D), proporcionando maior objetividade na aplicação dos critérios de segurança (CARVALHO et al., 2018; MOECKE, 2019).

A Figura 26 apresenta a Matriz de Categoria de Risco e o Dano Potencial Associado, presente no Anexo I da Resolução nº 236 da ANA, que classifica a barragem em 4 classes e direciona o plano de segurança para cada uma delas.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	D	D

Figura 26 – Matriz de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial associado

Fonte: (MOECKE, 2019) de acordo com Resolução nº 236 - ANA

As Resoluções nº 91/2012 e nº 236/2017 da Agência Nacional de Águas (ANA) estabeleceram diretrizes específicas para a elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB), diferenciando as exigências conforme a classificação de risco de cada estrutura. Neste contexto regulatório, as barragens enquadradas nas classes de risco “A” ou “B” devem atender não apenas aos requisitos documentais estabelecidos pela Lei nº 12.334/2010, mas também apresentar obrigatoriamente o Plano de Ações Emergenciais (PAE), instrumento complementar que detalha os procedimentos específicos para situações de emergência (MOECKE, 2019).

1.2.1 Classificação das barragens de rejeitos

A classificação de risco das barragens de rejeitos é um processo que envolve a análise minuciosa de diversos fatores técnicos, estruturais e ambientais. Esta avaliação busca identificar potenciais vulnerabilidades e quantificar os riscos associados à estabilidade dessas estruturas complexas e críticas (CRUZ, 2024b).

No Brasil, após os desastres de Mariana e Brumadinho em Minas Gerais, houve significativas mudanças nas leis e normas relacionadas à segurança de barragens, tornando os processos de classificação e monitoramento mais rigorosos (Geoscan, 2020).

A classificação de risco é aplicada para avaliar sistematicamente os riscos relacionados à estabilidade e segurança das barragens de rejeitos, analisando múltiplos elementos como geometria da barragem, método construtivo empregado, características específicas do rejeito armazenado, condições operacionais e sistemas de drenagem implementados. Estes parâmetros, quando avaliados em conjunto, permitem

categorizar as estruturas em diferentes níveis de risco, estabelecendo prioridades para ações de monitoramento e intervenção (CRUZ, 2024b).

A Agência Nacional de Mineração (ANM) implementou o Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) como ferramenta para gerenciamento e classificação das barragens de rejeitos no Brasil. Suas principais funcionalidades incluem o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, onde empreendedores registram informações detalhadas sobre suas estruturas, como categoria de risco, dano potencial associado, altura, volume e método construtivo. O sistema também permite o envio de documentos obrigatórios, como a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) e a Declaração de Conformidade e Operacionalidade do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Além disso, o SIGBM oferece painéis interativos com mapas georreferenciados e análises estatísticas, desenvolvidos com ferramentas de Business Intelligence (BI), proporcionando uma visualização clara e atualizada da situação das barragens. Essas funcionalidades visam aumentar a transparência, padronizar procedimentos fiscalizatórios e promover a segurança das barragens de mineração em todo o território nacional (ANM SISTEMA, 2020).

Buscando aprimorar a classificação e a gestão de risco, pesquisas contemporâneas exploram metodologias baseadas em dados disponíveis. Cruz (CRUZ, 2024b) propôs uma metodologia de classificação de barragens de mineração utilizando dados do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) da ANM. Esta metodologia adaptou conceitos de trabalhos anteriores com o objetivo de criar uma ferramenta para categorizar riscos e auxiliar na priorização da fiscalização pela ANM. A proposta visou quantificar a vulnerabilidade, o potencial de risco e a consequência de um evento indesejado utilizando informações reportadas no SIGBM.

A avaliação de risco em barragens de rejeitos constitui um processo complexo que considera múltiplos fatores para determinar a vulnerabilidade e o potencial de danos dessas estruturas críticas (CRUZ, 2024b). Este processo analítico baseia-se na investigação sistemática de quatro elementos principais, cada um contribuindo de forma significativa para a compreensão do comportamento estrutural e dos riscos associados a essas obras de engenharia:

- 1. Aspectos Geométricos e Construtivos:** A geometria da barragem, incluindo altura, inclinação dos taludes e largura da crista, influencia diretamente sua estabilidade estrutural. Diferentes métodos construtivos (a montante, a jusante ou linha de centro) apresentam níveis variados de segurança, sendo as barragens a montante consideradas potencialmente mais vulneráveis (CRUZ, 2024b).
- 2. Características do Material Armazenado:** As propriedades físicas e químicas dos rejeitos impactam significativamente o comportamento geotécnico da estrutura. Fatores como granulometria, densidade, teor de umidade e potencial de

liquefação são avaliados para determinar possíveis mecanismos de falha (CRUZ, 2024b).

3. **Sistemas de Drenagem e Monitoramento:** A eficiência dos sistemas de drenagem interna e superficial é crucial para controlar a pressão da água nos poros do material, prevenindo instabilidades. Da mesma forma, a existência e funcionalidade de sistemas de monitoramento adequados permitem a detecção precoce de anomalias (CRUZ, 2024b).
4. **Condições Operacionais:** As práticas de operação, incluindo velocidade de alteamento, controle do nível freático e manutenção preventiva, influenciam diretamente a segurança da estrutura ao longo do tempo (CRUZ, 2024b).

A metodologia desenvolvida por Cruz (2024b) empregou a Análise Hierárquica de Processos (AHP) para atribuir pesos a parâmetros relevantes (Design, Auscultação e Severidade) com base no julgamento de especialistas em segurança de barragens da ANM. A Escala Fundamental de Saaty foi utilizada para converter comparações paritárias em valores numéricos. As notas para os atributos foram extraídas ou adaptadas dos dados do SIGBM, permitindo uma classificação quantitativa do risco.

A aplicação da metodologia de Cruz (2024b) a 203 barragens em Minas Gerais resultou em uma distribuição de níveis de risco, com a maioria classificada como Baixo (79,4%) ou Moderado (13,8%), e uma parcela menor como Alto (4,4%) ou Muito Alto (2,4%).

A análise dos dados do SIGBM no estudo de Cruz (2024b) identificou que 25% das barragens analisadas careciam de informações sobre compactação em seus dados de Design, e 38% estavam fundadas em solo residual/aluvião. Quanto aos dados de Auscultação (inspeções regulares), 50,24% das barragens apresentaram algum tipo de ocorrência, sendo percolação, drenagem superficial e deterioração dos taludes as mais frequentes.

A adequada classificação de risco das barragens de rejeitos é fundamental para orientar as ações de gestão de segurança, estabelecendo prioridades de intervenção e definindo a frequência e abrangência das inspeções necessárias. Estruturas classificadas como de alto risco demandam monitoramento mais intensivo e medidas preventivas mais rigorosas (Geoscan, 2020; CRUZ, 2024b).

Apesar dos avanços nos sistemas de classificação, a gestão de segurança em barragens de rejeitos apresenta limitações substanciais que comprometem a eficácia dos sistemas de classificação existentes. A complexidade dos processos geotécnicos e hidrológicos, aliada à escassez de dados técnicos confiáveis, constitui obstáculo fundamental para avaliações precisas de risco estrutural. A heterogeneidade dos métodos construtivos empregados e as características específicas dos rejeitos minerais em diferentes localidades impossibilitam a implementação de sistemas padronizados de

classificação, conforme evidenciado pela diversidade de abordagens regulamentares adotadas internacionalmente (CRUZ, 2024b).

Adicionalmente, as mudanças climáticas intensificam eventos meteorológicos extremos, introduzindo variáveis imprevistas nos cálculos de estabilidade estrutural. A incorporação de critérios socioambientais representa desafio adicional, uma vez que as metodologias tradicionais de avaliação focam predominantemente em aspectos técnicos, negligenciando impactos potenciais sobre comunidades locais e ecossistemas circundantes. Essa limitação metodológica evidencia a necessidade de desenvolvimento de frameworks integrados que contemplem múltiplas dimensões de risco, conforme destacado por Cruz (2024b) e Moecke (2019).

1.2.2 Panorama Atual de Classificação das Barragens de Mineração

A gestão da segurança de barragens de mineração representa um pilar fundamental para a sustentabilidade da indústria extractiva, exigindo monitoramento contínuo e regulamentação rigorosa. O “Relatório Mensal - Barragens de Mineração - Fevereiro 2025” da Agência Nacional de Mineração (2025) oferece um panorama atualizado da situação dessas estruturas no Brasil, detalhando o número de barragens cadastradas, sua classificação de risco, níveis de emergência declarados e as atividades de fiscalização realizadas. Este documento, elaborado pela Superintendência de Segurança de Barragens de Mineração da ANM, baseia-se em dados atualizados em tempo real e disponíveis no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) Público, refletindo as atualizações ocorridas no intervalo de 02/02/2025 a 05/03/2025. A análise desses dados permite uma compreensão da dinâmica do setor e dos desafios regulatórios e operacionais enfrentados, preparando o terreno para uma investigação mais aprofundada sobre a eficácia das políticas de segurança vigentes (Agência Nacional de Mineração, 2025).

Segundo a Agência Nacional de Mineração (2025), o país contava, em março de 2025, com 917 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), das quais 467 estavam enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Esta configuração representa aproximadamente 51% do total de estruturas sob supervisão direta da política nacional, evidenciando a magnitude do desafio regulatório enfrentado pelo setor. A distribuição geográfica e os níveis de risco associados a essas estruturas constituem elementos fundamentais para compreender as dinâmicas regionais de segurança mineral (Agência Nacional de Mineração, 2025).

Lista – Dados Consolidados do Cadastro Nacional:

- Total de barragens cadastradas: 917
- Barragens inseridas na PNSB: 467 (51%)

- Barragens não inseridas na PNSB: 450 (49%)
- Período de análise: 02/02/2025 a 05/03/2025

A análise da distribuição geográfica das barragens de mineração (Figura 27) revela concentrações específicas que refletem a geografia mineral brasileira e suas tradições extractivas históricas. A análise por estados revela que Minas Gerais concentra o maior número de barragens de mineração em função de sua vocação minerária centenária e da presença do Quadrilátero Ferrífero. O Mato Grosso apresenta-se como segunda região de maior concentração, impulsionado pela expansão da mineração aurífera e pela presença significativa de pequenos empreendimentos, seguido por Pará, Bahia e São Paulo, refletindo a histórica predominância da atividade mineradora nessas regiões (Agência Nacional de Mineração, 2025).

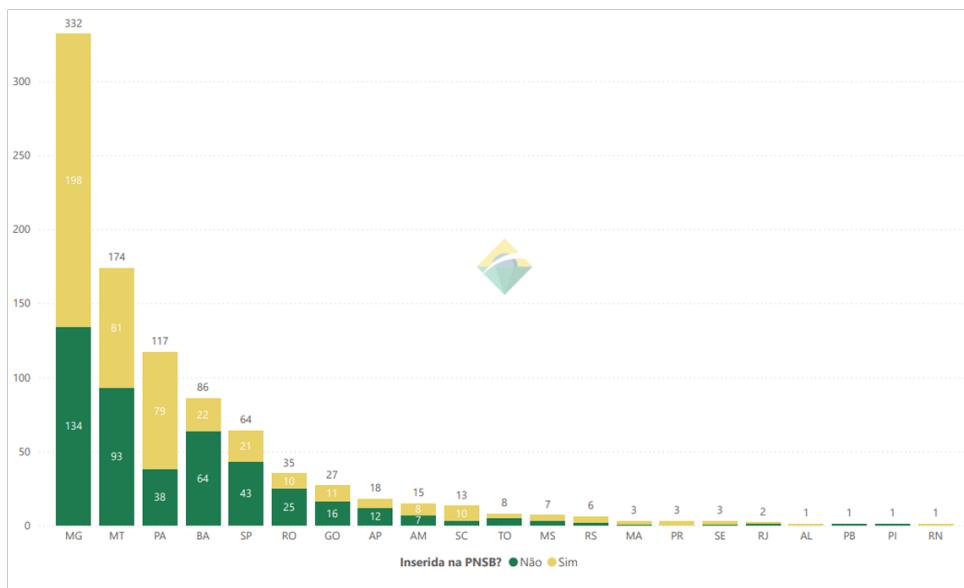


Figura 27 – Distribuição das barragens cadastradas no SIGBM em 05/03/2025.

Fonte: (Agência Nacional de Mineração, 2025)

1.2.3 Categoria de Risco das Barragens

A Categoria de Risco (CRI) é um indicador crucial na avaliação da segurança de barragens, determinando o nível de atenção regulatória e as exigências de monitoramento para as estruturas enquadradas na PNSB. As barragens inseridas na PNSB estão classificadas em relação à Categoria de Risco - CRI de acordo com a Figura 28 e a distribuição nacional das barragens por estado e CRI (Figura 29) mostra a concentração de estruturas em diferentes categorias nas principais regiões mineradoras do Brasil (Agência Nacional de Mineração, 2025).

Conforme ilustrado nas Figuras 28 e 29, Minas Gerais se destaca não apenas em quantidade, mas também em número absoluto de barragens classificadas como

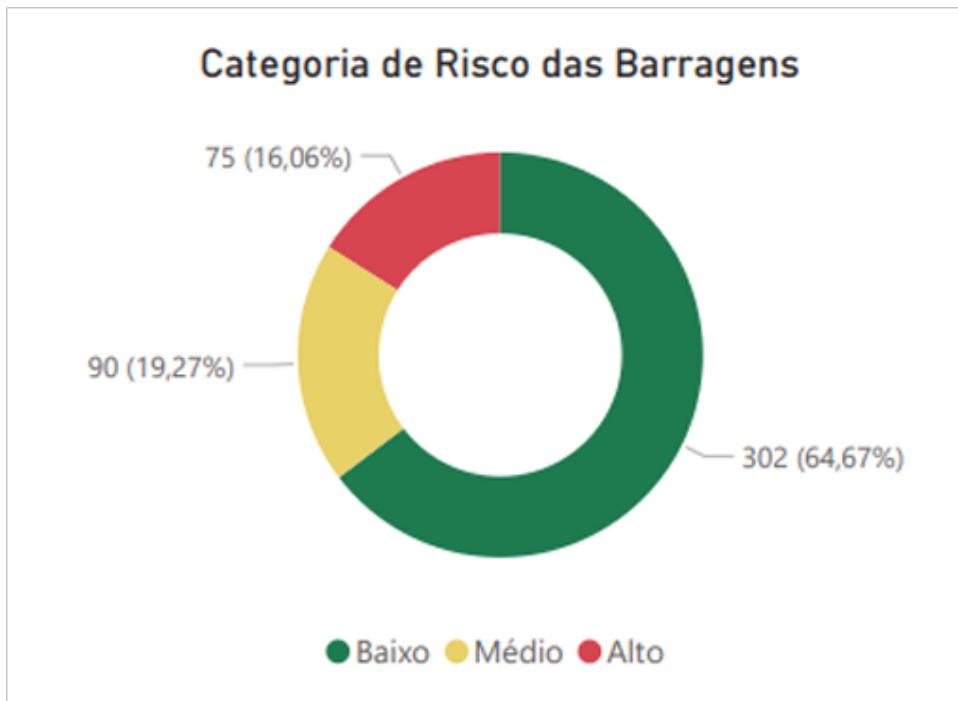


Figura 28 – Distribuição de barragens cadastradas de acordo com sua classificação de CRI.

Fonte: (Agência Nacional de Mineração, 2025)

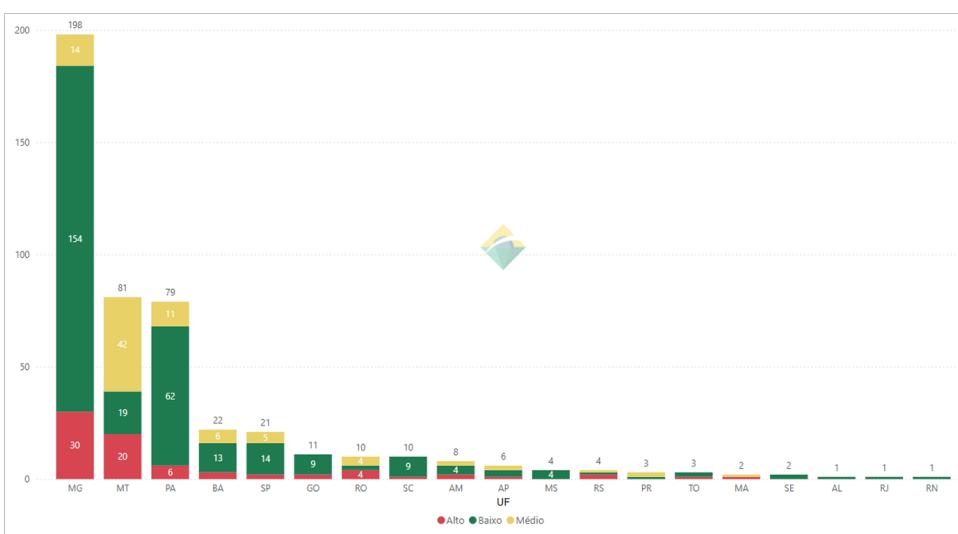


Figura 29 – Distribuição das barragens inseridas na PNSB por estado, segundo a classificação de CRI.

Fonte: (Agência Nacional de Mineração, 2025)

CRI alto, o que se explica pela presença de grandes complexos mineradores e pelo histórico de acidentes recentes, como os de Mariana e Brumadinho. O Pará, por sua vez, apresenta um perfil de barragens com maior proporção de risco médio e baixo, em função do predomínio de estruturas mais recentes e de métodos construtivos alternativos, como o empilhamento a seco. Mato Grosso e Goiás, embora possuam menor número absoluto, têm apresentado crescimento nas reclassificações para risco alto, especialmente em barragens de pequeno e médio porte operadas por empresas de menor capitalização (Agência Nacional de Mineração, 2025).

O mês de fevereiro de 2025 testemunhou alterações significativas na classificação de risco de 14 barragens, revelando a natureza dinâmica dos sistemas de avaliação e as consequências das mudanças regulamentares recentes. Entretanto, o relatório destaca um fator regulatório preponderante no aumento do número de barragens classificadas com CRI Alto: a implementação de uma regra no SIGBM conforme o inciso II do § 1º do Art. 5º da Resolução ANM nº 95/2022, alterada pela Resolução ANM nº 175/2024. Esta norma estabelece que a falta de envio da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) da Revisão Periódica de Segurança de Barragem resulta na classificação automática da barragem como CRI Alto e, consequentemente, em nível de emergência 1. Por exemplo, a barragem "Bacia de Acumulação 01", em Urussanga/SC, passou de risco baixo para alto, enquanto a "Barragem B", em Patos de Minas/MG, foi reclassificada de alto para baixo risco. Essas alterações demonstram a dinamicidade do sistema de classificação, que responde tanto a fatores técnicos quanto administrativos (Agência Nacional de Mineração, 2025).

Essa nova regra foi incorporada ao SIGBM em 13/02/2025, após o término do prazo de seis meses para os empreendedores se adequarem, impactando diretamente as classificações e elevando o número de barragens em CRI Alto. A alteração da Categoria de Risco de Baixo ou Médio para Alto para diversas barragens demonstra o efeito imediato dessa medida regulatória, sublinhando a importância do cumprimento dos prazos de entrega documental para a manutenção de uma classificação de risco adequada. A evolução do número de barragens em cada categoria de risco ao longo dos últimos 12 meses (Figura 30) ilustra essa dinâmica e as tendências temporais na classificação de segurança das estruturas (Agência Nacional de Mineração, 2025).

Complementar à classificação de risco, a situação de alerta ou emergência declarada indica um estado de atenção ou criticidade que demanda ações imediatas por parte dos empreendedores e acompanhamento intensivo pela ANM. Em março de 2025, 104 barragens se encontravam nessa situação, distribuídas em diferentes níveis de emergência (Nível 1, Nível 2 e Nível 3) ou em situação de alerta. A distribuição dessas barragens por estado (Figura 31) revela que a maioria se localiza em Minas Gerais, Mato Grosso, Pará e Rondônia (Agência Nacional de Mineração, 2025).

A evolução do número de barragens em nível de alerta ou emergência ao longo

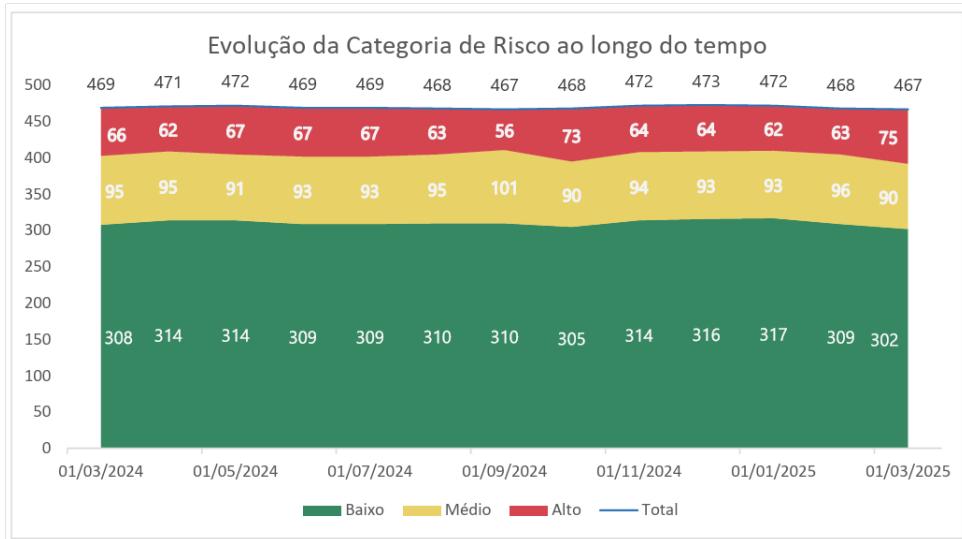


Figura 30 – Evolução da classificação de CRI ao longo dos últimos 12 meses.

Fonte: ANM (2025)

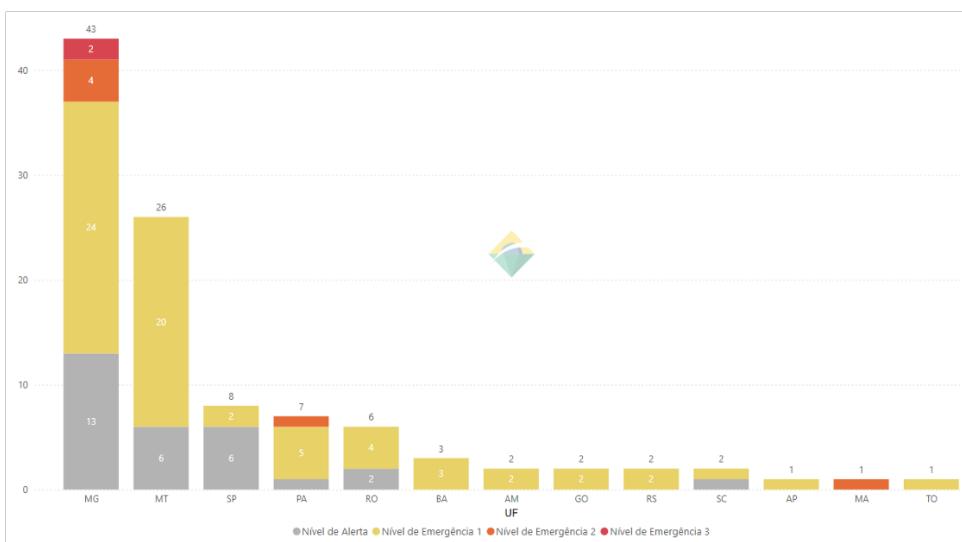


Figura 31 – Distribuição das barragens em nível de alerta ou emergência por estado em 05/03/2025.

Fonte: ANM (2025)

dos últimos meses revela um aumento significativo a partir da implementação das novas regras de classificação automática por descumprimento de obrigações legais. Esse fenômeno, embora possa inflar artificialmente o número de barragens em emergência, reflete a importância da gestão documental e da cultura de segurança nas empresas mineradoras. Destaca-se que apenas duas barragens, ambas em Minas Gerais, encontravam-se em Nível de Emergência 3, o mais crítico, enquanto seis estavam em Nível 2, distribuídas entre Minas Gerais, Pará e Maranhão. O Nível de Emergência 1 é o nível inicial dentro do estado de emergência declarada, frequentemente acionado por não conformidades regulatórias ou pela necessidade de investigações mais aprofundadas, mesmo na ausência de um risco estrutural imediato; 67 barragens se encontram

em Nível 1 (Agência Nacional de Mineração, 2025).

Lista – Barragens em Nível de Emergência 3 (março/2025):

- Barragem Serra Azul (ArcelorMittal Brasil S.A.) – Itatiaiuçu/MG
- Forquilha III (Vale S.A.) – Ouro Preto/MG

Lista – Barragens em Nível de Emergência 2 (março/2025):

- Bacia do Castanheira (Buritirama Mineração S.A.) – Marabá/PA
- Barragem do Vené (Mineração Aurizona S/A) – Godofredo Viana/MA
- Forquilha I, Forquilha II, Sul Superior, Xingu (Vale S.A.) – Ouro Preto, Barão de Cocais, Mariana/MG

A presença de empreendedores como VALE S.A. e BURITIRAMA MINERACAO S.A. na lista dos níveis de emergência mais altos aponta para a necessidade de atenção contínua, independentemente do porte da empresa, e destaca a responsabilidade dos grandes players do setor na gestão da segurança (Agência Nacional de Mineração, 2025).

A recorrência de situações de emergência em barragens localizadas em Minas Gerais, como exemplificado acima, está associada tanto ao envelhecimento das estruturas quanto à complexidade geotécnica da região, marcada por solos residuais e regimes pluviométricos variáveis. Por outro lado, em estados como Pará e Mato Grosso, o desafio reside na rápida expansão da atividade mineradora e na necessidade de adaptação das pequenas empresas às exigências regulatórias mais rigorosas. A seguir, será discutida a evolução temporal do número de barragens em situação de emergência, com ênfase nas tendências observadas nos últimos anos (Agência Nacional de Mineração, 2025).

A evolução do número de barragens em nível de alerta ou emergência ao longo dos últimos 24 meses, conforme ilustrado na Figura 6 do relatório da ANM (2025), revela um aumento significativo a partir da implementação das novas regras de classificação automática por descumprimento de obrigações legais. Esse fenômeno, embora possa inflar artificialmente o número de barragens em emergência, reflete a importância da gestão documental e da cultura de segurança nas empresas mineradoras. Em contrapartida, observa-se uma tendência de redução dos casos mais críticos (Nível 2 e 3), resultado do esforço conjunto entre órgãos fiscalizadores e setor produtivo para descomissionamento de estruturas instáveis e adoção de tecnologias mais seguras, como o empilhamento a seco. A análise desses dados evidencia que a gestão de barragens de mineração no Brasil é um processo dinâmico, que exige constante atualização normativa e investimento em capacitação técnica. No próximo parágrafo,

serão sugeridas imagens e gráficos que podem enriquecer a compreensão do tema (Agência Nacional de Mineração, 2025).

1.2.4 Risco: Severidade x Probabilidade

O conceito de risco é fundamental na gestão de segurança, sendo definido como a combinação entre a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso e a severidade das consequências desse evento. A probabilidade refere-se à chance estimada de que o risco se concretize, enquanto a severidade diz respeito ao grau de dano ou prejuízo que o evento pode causar, variando de lesões leves até consequências fatais. Essa relação é frequentemente expressa matematicamente como o produto entre probabilidade e severidade, formando o chamado nível de risco, ferramenta essencial para priorização e tomada de decisões em ambientes ocupacionais e de saúde (Sistema ESO, 2021a; Sistema ESO, 2021b; ??).

A quantificação de riscos no setor minerário baseia-se fundamentalmente na relação matemática entre probabilidade e severidade das consequências. O setor de mineração quantifica o risco através do produto da probabilidade pela severidade, sendo a probabilidade definida pela soma de quatro componentes principais que caracterizam diferentes cenários de falha (IRAMINA et al., 2009). Esta abordagem sistemática permite uma avaliação mais precisa dos perigos inerentes às operações de extração mineral, considerando variáveis como condições geotécnicas, processos operacionais e fatores ambientais. A metodologia de análise RBPS exemplifica essa abordagem, permitindo aferir a probabilidade de um rompimento e suas prováveis consequências a partir da formulação de quatro cenários mais frequentes: estático, hidrológico, sísmico e operação e manutenção (CONCEIÇÃO, 2018).

A definição operacional de risco na mineração transcende a simples multiplicação de fatores, incorporando aspectos multidimensionais que afetam a segurança operacional. Segundo Iramina et al. (2009), os riscos presentes nas operações unitárias do processo produtivo de pedra britada em uma mina a céu aberto devem ser sistematicamente identificados e controlados através de programas estruturados de gerenciamento. Esta perspectiva multifacetada reconhece que os riscos minerários envolvem não apenas aspectos técnicos, mas também dimensões sociais, ambientais e econômicas que influenciam tanto a probabilidade quanto a severidade dos eventos adversos.

As metodologias para determinação da probabilidade de ocorrência em operações minerárias empregam abordagens tanto qualitativas quanto quantitativas. A APR e a BTA constituem ferramentas fundamentais para identificação dos cenários potenciais indesejáveis, causas e efeitos potenciais, graduação dos efeitos e estimativa de probabilidade (VILAÇA, 2021). Essas metodologias permitem classificar eventos conforme sua probabilidade temporal, estabelecendo categorias que variam desde eventos

improváveis até aqueles com possibilidade de ocorrência em períodos específicos de 5 a 10 anos (VILAÇA, 2021).

A quantificação probabilística na mineração deve considerar a variabilidade temporal e espacial dos fatores de risco presentes nas diferentes operações. Os principais riscos envolvidos na mineração incluem soterramento, detonação, contato com substâncias químicas, explosões de gases, desabamentos de minas, trabalho em espaço confinado e exposição ao ruído (VENDRAME, 2023). Cada uma dessas categorias de risco apresenta características probabilísticas distintas, influenciadas por fatores como condições geológicas, métodos de extração empregados, condições climáticas e qualidade dos procedimentos operacionais. A metodologia RBPS demonstra essa complexidade ao considerar múltiplos cenários de falha, em que diferentes barragens podem apresentar índices de falha com variação significativa, como observado em estudos que identificaram valores entre 375,66 e 455,18 pontos para diferentes estruturas (CONCEIÇÃO, 2018).

A severidade das consequências em eventos minerários manifesta-se através de múltiplas dimensões que afetam trabalhadores, comunidades e meio ambiente. A avaliação da severidade considera consequência máxima ou alta para segurança, meio ambiente, social, legal, financeiro e reputacional (VILAÇA, 2021), estabelecendo uma classificação multidimensional que transcende os impactos puramente operacionais. Esta abordagem sistêmica reconhece que eventos adversos na mineração podem gerar consequências em cascata, afetando desde a integridade física dos trabalhadores até aspectos socioambientais mais amplos. O estudo de barragens minerárias exemplifica essa complexidade, demonstrando que uma única estrutura pode potencialmente afetar 12.900 pessoas, resultando em um Índice de Risco Total de 969,20 pontos (CONCEIÇÃO, 2018).

A graduação da severidade requer metodologias específicas que considerem tanto os efeitos imediatos quanto os impactos de longo prazo. As operações de desmonte de rochas ilustram essa complexidade, envolvendo riscos como explosões acidentais, vibrações sísmicas, lançamento de fragmentos e exposição a produtos químicos perigosos (VENDRAME, 2023). Cada uma dessas consequências apresenta características distintas em termos de área de impacto, duração dos efeitos e possibilidade de reversão dos danos causados. A classificação de uma barragem como possível causadora de danos extremos (CONCEIÇÃO, 2018) exemplifica como a severidade pode atingir níveis catastróficos, justificando a implementação de medidas de controle proporcionalmente rigorosas.

Os estudos contemporâneos demonstram a aplicação prática das metodologias de avaliação de risco em diferentes contextos minerários brasileiros. A pesquisa realizada em pedreiras da região metropolitana de São Paulo evidencia como a identificação dos principais riscos associados às operações de perfuração, desmonte, carregamento

e transporte, britagem e peneiramento (IRAMINA et al., 2009) pode ser sistematicamente conduzida através de medições de campo e análise de registros empresariais. Esta abordagem empírica permite não apenas a identificação dos riscos, mas também a validação das estimativas probabilísticas através de dados operacionais reais. A aplicação da metodologia em seis barragens do estado do Pará demonstra a viabilidade de comparações sistemáticas entre diferentes estruturas, permitindo a priorização de ações de controle baseada em critérios objetivos (CONCEIÇÃO, 2018).

As metodologias modernas de avaliação de risco, fundamentadas em normas como a ISO 31000, estabelecem um método para identificar antecipadamente os riscos inerentes a cada organização, avaliar a probabilidade e severidade de incidentes e implementar medidas de controle eficientes (CRUZ, 2024a). Esta norma busca servir como guia de gestão de riscos, fornecendo uma abordagem clara e comum que pode ser aplicada em diversos ramos, auxiliando os tomadores de decisão a terem escolhas corretas e conscientes, priorizar ações e identificar soluções adequadas (Ministério dos Transportes, 2018).

A implementação de sistemas de gestão de risco baseados na ISO 31000 exemplifica a evolução das práticas contemporâneas na mineração. O estudo de taludes em minerodutos demonstra como a aplicação sistemática de conceitos da ISO 31000, com estabelecimento do contexto, processos de avaliação de riscos e tratamento dos riscos, pode resultar em reduções significativas do grau de risco, passando de 22 (Alto) para 19 (Significativo) (VILAÇA, 2021). Esta redução quantitativa ilustra a eficácia das metodologias estruturadas de gestão de risco quando adequadamente implementadas. A transformação da probabilidade de "possível" para "improvável" demonstra como intervenções técnicas específicas podem alterar fundamentalmente o perfil de risco operacional (VILAÇA, 2021).

1.3 Legislação ambiental: população e ambiente (Brasil x Exterior)

A primeira fase da regulamentação minerária brasileira caracterizou-se pela vinculação entre propriedade do solo e subsolo estabelecida pela Constituição republicana de 1891. Essa Constituição determinou que a propriedade do subsolo estava vinculada à propriedade do solo, refletindo uma concepção liberal de direitos proprietários típica do período (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

Tal abordagem permitia aos proprietários rurais a exploração irrestrita dos recursos minerais encontrados em suas terras, sem considerações específicas sobre impactos ambientais ou interesse nacional. Posteriormente, o marco de 1907 representou uma mudança institucional significativa com a criação e instalação do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, evidenciando a necessidade crescente de conhecimento técnico-científico sobre os recursos minerais nacionais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

O período getulista marcou uma ruptura fundamental na concepção jurídica dos recursos minerais, estabelecendo o controle estatal sobre o subsolo nacional. Em 1930, foi criada a Companhia Petróleos do Brasil, sinalizando a intenção governamental de assumir maior protagonismo no setor energético (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

O presidente Getúlio Vargas defendeu enfaticamente “*a necessidade de se nacionalizarem as reservas minerais do Brasil*” em 1931, promulgando decretos que “*suspenderam a alienação ou oneração de qualquer jazida mineral*” (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025). A Constituição de 1934 consolidou juridicamente esta transformação ao separar definitivamente “*as propriedades do solo e do subsolo*”, estabelecendo o controle estatal sobre os recursos minerais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

Esta mudança paradigmática culminou com a criação do DNPM pelo Decreto n. 23.979, de 8 de março de 1934, institucionalizando a gestão estatal dos recursos minerais e preparando o caminho para regulamentações mais específicas sobre atividades extractivas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

A Constituição outorgada durante o Estado Novo aprofundou o controle nacionalista sobre a mineração, restringindo significativamente a participação estrangeira no setor. A Constituição de 1937 estabeleceu que “*o aproveitamento de jazidas minerais passou a ser autorizado somente a brasileiros ou empresas constituídas por brasileiros*”, consolidando a política nacionalista iniciada na década anterior (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

Em 1938, foi criado o Conselho Nacional do Petróleo (CNP), que inicialmente mantinha “*livre a iniciativa de pesquisa e exploração de petróleo e gás natural*”, mas posteriormente promoveu “*a nacionalização do refino de petróleo e a regulação da importação e do transporte*” (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

A Lei Constitucional nº 4, de 19 de junho de 1940, introduziu “*a cobrança de um imposto único sobre minerais no Brasil, de competência da União*”, instituindo tributação específica “*sobre o carvão nacional, os combustíveis e os lubrificantes de qualquer origem*” (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025). Paralelamente, o Decreto-lei nº 1.985, de 29 de março de 1940, denominado Código de Minas, definiu formalmente “*os direitos sobre as jazidas*” minerais, estabelecendo as bases jurídicas que posteriormente influenciariam a legislação ambiental (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil), 2025).

A partir da década de 1970, observou-se uma intensificação da preocupação governamental e jurídica relacionada à preservação ambiental e à qualidade de vida, motivada pela percepção dos danos ambientais crescentes e pela compreensão de que os recursos naturais são limitados.

No âmbito internacional, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente

Humano, ocorrida em Estocolmo em junho de 1972, simbolizou a formalização dessa nova perspectiva, sendo sua declaração reconhecida como o marco fundador do Direito Ambiental em escala global. O documento estabeleceu o direito a um ambiente ecologicamente equilibrado como direito essencial, colocando-o no mesmo patamar de outros direitos fundamentais como liberdade e igualdade, conforme expresso no Princípio nº 1, que reconhece o direito humano fundamental a condições de vida adequadas em ambiente de qualidade, além da responsabilidade de preservá-lo para as futuras gerações. Simultaneamente à Conferência de Estocolmo, foi instituído o PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), órgão do sistema ONU destinado ao acompanhamento das iniciativas ambientais nacionais e internacionais no contexto do desenvolvimento sustentável (BARROS, 2017).

No Brasil, a Lei Federal nº 6.938/1981 (BRASIL, 1981), que instituiu a PNMA, estabeleceu instrumentos fundamentais para o controle ambiental das atividades minerárias. A Política Nacional do Meio Ambiente *“tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, além de prever sanções em caso de não cumprimento de medidas necessárias à preservação ambiental”* (JAZIDA, 2022).

Esta legislação introduziu a necessidade de autorizações emitidas pelo governo para a realização de estudos ambientais e obtenção de licenças vinculadas ao processo de mineração (JAZIDA, 2022). A PNMA regulamentou especificamente os processos de mineração, enfatizando no parágrafo 2º que aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei. As sanções previstas pela PNMA incluem desde a perda de incentivos fiscais à suspensão das atividades, demonstrando a seriedade do compromisso legal com a proteção ambiental (JAZIDA, 2022).

A década de 1980 marcou a consolidação dos instrumentos de avaliação de impacto ambiental como ferramentas centrais da governança ambiental minerária. A Resolução CONAMA nº 001/1986 estabeleceu no Brasil a obrigatoriedade do EIA e do RIMA para atividades de extração mineral, definindo metodologias específicas para identificação, quantificação e mitigação dos impactos ambientais (BRASIL, 1986).

Paralelamente, a legislação internacional evoluiu com a adoção de protocolos de avaliação ambiental mais rigorosos, exemplificados pela Diretiva 85/337/CEE da União Europeia, que estabeleceu padrões harmonizados para avaliação de impactos de projetos de desenvolvimento, incluindo operações de mineração (UNIÃO EUROPEIA, 1985).

O final da década de 1980 e início dos anos 1990 foram caracterizados pela introdução de mecanismos de responsabilização civil e criminal por danos ambientais na mineração. A Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988) representou um divisor de águas ao estabelecer princípios fundamentais para a conciliação entre atividade

minerária e proteção ambiental.

O artigo 176 da Constituição Federal reafirmou que o subsolo é propriedade da União, mantendo o controle estatal sobre os recursos minerais estabelecido nas décadas anteriores (BRASIL, 1988). Já o artigo 225 introduziu o direito fundamental ao “*meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida*”, impondo “*ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações*” (JAZIDA, 2022).

Este artigo criou também a responsabilidade objetiva para reparação de danos ambientais e tipificou crimes contra o meio ambiente. O parágrafo 2º do artigo 225 estabeleceu especificamente que “*aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei*” (JAZIDA, 2022).

A Lei nº 9.605/1998 (BRASIL, 1998), conhecida como Lei de Crimes Ambientais, especificou as condutas criminosas relacionadas à poluição e degradação ambiental, estabelecendo penalidades que incluem desde multas até prisão para responsáveis por danos em operações minerárias.

Esta legislação “*contempla a esfera penal e dispõe sobre as sanções penais e administrativas decorrentes de condutas e atividades que gerem impacto ou que venham causar qualquer dano ao meio ambiente*” (JAZIDA, 2022). O artigo 55 da Lei dos Crimes Ambientais estabelece que constitui crime “*executar pesquisa, lavra ou extração de recursos minerais sem a competente autorização, permissão, concessão ou licença, ou em desacordo com a obtida*”, sendo aplicável “*pena de detenção, de seis meses a um ano, e multa*” (BRASIL, 1998).

A legislação também criminaliza a conduta de quem “*deixa de recuperar a área pesquisada ou explorada, nos prazos fixados pelos órgãos competentes*” (BRASIL, 1998).

A década de 1990 testemunhou a emergência e consolidação dos sistemas de gestão ambiental como instrumentos centrais da governança minerária sustentável. A publicação da norma ISO 14001 em 1996 estabeleceu padrões internacionais para sistemas de gestão ambiental (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), fornecendo às empresas mineradoras um framework estruturado para identificação, controle e melhoria contínua de seus aspectos e impactos ambientais.

No contexto regulatório brasileiro, a Resolução CONAMA nº 237/1997 aprimorou os procedimentos de licenciamento ambiental, estabelecendo três modalidades de licenças (prévia, de instalação e de operação) e definindo competências entre os órgãos ambientais federal, estaduais e municipais (BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 1997).

O início do século XXI foi marcado pelo fortalecimento dos mecanismos de participação social e transparência nos processos de licenciamento e operação de

empreendimentos minerários. A Resolução CONAMA nº 09/1987 (BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 1987), posteriormente complementada pela Resolução nº 286/2001 (BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2001), estabeleceu procedimentos específicos para a realização de audiências públicas durante o processo de licenciamento ambiental, garantindo o direito das comunidades afetadas de se manifestarem sobre os projetos propostos.

A primeira década dos anos 2000 testemunhou o desenvolvimento de regulamentações específicas para segurança de barragens de rejeitos minerários, impulsionado por acidentes significativos em diversos países. No Brasil, a Lei nº 12.334/2010 estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), definindo critérios de classificação baseados em risco e dano potencial.

A norma brasileira NBR 13028:2017 complementou esse framework ao estabelecer diretrizes técnicas específicas para elaboração e apresentação de projetos de barragens de rejeitos de mineração, incluindo requisitos para análise de estabilidade, monitoramento e planos de emergência. Internacionalmente, diretrizes como as da International Commission on Large Dams (ICOLD) e padrões da Canadian Dam Association forneceram parâmetros técnicos que influenciaram regulamentações nacionais em diversos países (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, 2001; CANADIAN DAM ASSOCIATION, 2007).

A década de 2010 foi caracterizada pela emergência e consolidação dos critérios ESG (Environmental, Social and Governance) como paradigma central da governança empresarial na mineração. Iniciativas como os Princípios do Equador (2003, revisados em 2013 e 2020) estabeleceram critérios socioambientais para financiamento de projetos de grande porte, incluindo operações minerárias, criando incentivos de mercado para adoção de práticas sustentáveis (EQUATOR PRINCIPLES ASSOCIATION, 2020).

A regulamentação brasileira incorporou elementos de governança ESG através de normativas da Comissão de Valores Mobiliários (CVM), como a Instrução nº 480/2009, que estabeleceu requisitos de transparência para companhias abertas, incluindo divulgação de riscos socioambientais e práticas de governança corporativa (BRASIL. Comissão de Valores Mobiliários, 2009).

Frameworks internacionais como o Global Reporting Initiative (GRI) e o Sustainability Accounting Standards Board (SASB) desenvolveram métricas específicas para o setor mineral, permitindo comparabilidade e benchmarking de desempenho sustentável entre empresas (GLOBAL REPORTING INITIATIVE, 2013; SUSTAINABILITY ACCOUNTING STANDARDS BOARD, 2018). Conforme destaca a Xenith Consulting (XENITH CONSULTING, 2025), a integração de critérios ESG transformou fundamentalmente a avaliação de projetos minerários, incorporando considerações de longo prazo sobre sustentabilidade e licença social para operar.

1.3.1 Estrutura Regulatória Contemporânea

A estrutura regulatória contemporânea da mineração brasileira centraliza-se na Agência Nacional de Mineração (ANM), criada pela Lei nº 13.575/2017 e instalada em 28 de novembro de 2018 (BRASIL. Senado Federal, 2017), que consolidou as funções de controle e fiscalização do setor. A atividade de mineração no Brasil é regulamentada pela ANM, sendo uma de suas atribuições dar andamento aos trâmites dos processos minerários (JAZIDA, 2022).

A ANM administra o conceito de "processo mineralógico" como uma parcela de terra para a qual o titular reivindicou o direito de desenvolver e extrair um depósito mineral, esclarecendo que este direito não inclui direitos à superfície (JAZIDA, 2022). A confirmação constitucional de que as jazidas minerais pertencem à União significa que a lavra e pesquisa mineral só poderá ser realizada com a devida autorização da ANM (JAZIDA, 2022).

A atividade mineralária contemporânea engloba vários processos, como pesquisa mineral, estudo de viabilidade econômica, licenciamento ambiental, lavra, beneficiamento, tratamento de rejeitos até o fechamento da mina (JAZIDA, 2022).

A resposta regulatória aos desastres minerais brasileiros resultou em uma das mais abrangentes reformas normativas da história do setor, promovendo a evolução da regulamentação ambiental mineral brasileira e internacional. A Agência Nacional de Mineração (ANM) promulgou uma série de resoluções técnicas que revolucionaram os padrões de segurança, destacando-se a Resolução ANM nº 4/2019 (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019c), que proibiu a construção de novas barragens pelo método de alteamento a montante. A Resolução ANM nº 13/2019 (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019b) estabeleceu novos critérios para a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), exigindo análises mais rigorosas de estabilidade estática e dinâmica.

A Lei nº 12.334/2010 criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), centralizando dados sobre todas as estruturas do país e estabelecendo protocolos rigorosos de monitoramento e fiscalização. Internacionalmente, esses eventos estimularam a criação do Global Industry Standard on Tailings Management, desenvolvido conjuntamente pelo International Council on Mining and Metals (ICMM), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Principles for Responsible Investment (PRI) (INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS et al., 2020).

Segundo INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS et al. (2020), os desastres brasileiros expuseram as limitações dos sistemas regulatórios tradicionais e demandaram uma reformulação abrangente dos marcos de governança ambiental na mineração.

1.3.2 Tecnologias Emergentes e Inteligência Artificial

A última década tem sido caracterizada pela crescente integração de tecnologias digitais nos sistemas de governança ambiental minerária. A Resolução ANM nº 95/2022 introduziu o conceito de revisão periódica de segurança obrigatória, com a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real de barragens de rejeitos, incluindo instrumentação geotécnica automatizada, sistemas de alerta precoce e plataformas de visualização de dados (BRASIL. Agência Nacional de Mineração, 2022).

Essas normas incorporaram recomendações internacionais das melhores práticas, incluindo diretrizes da International Commission on Large Dams (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD), 2022) e padrões canadenses de gestão de rejeitos (MINING ASSOCIATION OF CANADA, 2021).

Tecnologias como sensoriamento remoto por satélite, drones para inspeção ambiental e inteligência artificial para análise preditiva de riscos têm sido progressivamente incorporadas aos marcos regulatórios (DARZI, 2024). A União Europeia, por meio do European Green Deal e da taxonomia sustentável, estabeleceu critérios técnicos específicos para classificação de atividades minerárias como ambientalmente sustentáveis, incluindo requisitos para uso de tecnologias de monitoramento avançadas (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

1.4 Acidentes em Mariana e Brumadinho

1.4.1 Mecanismos de Ruptura em Barragens

Os mecanismos de ruptura em barragens constituem processos complexos onde múltiplos fatores atuam colaborativamente para provocar o colapso estrutural dessas obras de engenharia. Segundo ARNEZ (1999), três tipos fundamentais se destacam por sua natureza sinérgica e capacidade destrutiva: a erosão interna, a liquefação e o galgamento. Estes mecanismos raramente atuam de forma isolada, desenvolvendo-se através de interações que amplificam seus efeitos individuais. A compreensão detalhada de cada tipo torna-se essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e monitoramento.

1.4.1.1 Erosão Interna

O primeiro mecanismo, denominado erosão interna, fundamenta-se na remoção progressiva de partículas finas do interior da barragem através de gradientes hidráulicos elevados. Este processo cria vazios internos que se expandem gradualmente, formando canais preferenciais de fluxo conhecidos como *piping*. A característica distintiva deste fenômeno reside em seu desenvolvimento interno e progressivo, onde a erosão aumenta a permeabilidade local, intensificando o fluxo e acelerando o processo erosivo

em um ciclo de retroalimentação contínua. Diferentemente dos demais mecanismos, a erosão interna compromete a integridade estrutural de dentro para fora, preparando condições para manifestações de instabilidade geotécnica (ARNEZ, 1999).

1.4.1.2 Liquefação

A liquefação representa o segundo tipo de mecanismo, caracterizado pela perda súbita de resistência ao cisalhamento dos materiais devido à combinação de saturação e carregamentos dinâmicos. Este fenômeno ocorre quando solos saturados, especialmente areias fofas, perdem sua capacidade portante sob vibrações sísmicas ou outras solicitações cíclicas, transformando materiais sólidos em estado quase-líquido. A instabilidade geotécnica distingue-se pela rapidez e generalização da perda de resistência, afetando grandes volumes simultaneamente e podendo ser desencadeada por eventos externos como terremotos. Esta característica súbita e volumétrica estabelece condições propícias para a manifestação do terceiro mecanismo de ruptura (ARNEZ, 1999).

1.4.1.3 Galgamento

O galgamento constitui o terceiro mecanismo, combinando pressões internas excessivas com erosão superficial por transbordamento da estrutura. As sobrepressões resultam de drenagem inadequada ou colmatação dos sistemas de alívio, enquanto o galgamento provoca erosão do paramento de jusante da barragem. A diferença fundamental deste mecanismo está na ação simultânea de forças internas e externas, criando um processo de retroalimentação onde o galgamento acelera a saturação interna, intensificando as sobrepressões que facilitam a erosão externa (ARNEZ, 1999).

1.4.2 Casos de Estudo: Mariana e Brumadinho

Os desastres de rompimento de barragens ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) representam marcos trágicos na história da mineração brasileira, configurando-se como os maiores acidentes ambientais e industriais já registrados no país. Ambos os eventos envolveram empresas do grupo Vale e resultaram em perdas humanas significativas, devastação ambiental em larga escala e questionamentos profundos sobre os sistemas de licenciamento, fiscalização e segurança das estruturas de contenção de rejeitos minerários no Brasil (WIKIPÉDIA, 2019).

1.4.2.1 A Tragédia de Mariana

A tragédia de Mariana ocorreu em 5 de novembro de 2015, aproximadamente às 15h30min, quando se rompeu a barragem do Fundão, localizada no subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 km do centro de Mariana, no estado de Minas Gerais (BRASIL.

Presidência da República, 2024). Este evento foi caracterizado como a maior catástrofe ambiental da história do país e ficou marcado como o maior rompimento do mundo envolvendo barragens de rejeitos de mineração (BRASIL. Presidência da República, 2024). O colapso da estrutura pertencente à Samarco Mineração S/A, uma *joint venture* das mineradoras Vale e BHP Billiton Brasil, liberou uma avalanche de rejeitos que alcançou o Rio Doce (BRASIL. Presidência da República, 2024).



Figura 32 – Rompimento de barragem em Mariana

Fonte: WIKIPÉDIA (2015)



Figura 33 – Acidente de Mariana

Fonte: WARZYNSKI et al. (2023)

1.4.2.2 A Tragédia de Brumadinho

Quatro anos depois, às 12h28min do dia 25 de janeiro de 2019, outro rompimento de barragem abalaria novamente Minas Gerais, desta vez em Brumadinho, envolvendo a Barragem I (B-I), acarretando, em sequência, o rompimento das barragens B-IV e B-IV-A da Mina Córrego do Feijão, controlada diretamente pela Vale S.A., do Complexo Paraopeba II, localizada em Brumadinho, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG) (MINAS GERAIS. Governo do Estado, 2024).



Figura 34 – Momento antes da tragédia em Brumadinho

Fonte: MINAS GERAIS. Governo do Estado (2024)



Figura 35 – Momento do rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão em Brumadinho

Fonte: MINAS GERAIS. Governo do Estado (2024)



Figura 36 – Acidente de Brumadinho

Fonte: WARZYNSKI et al. (2023)

1.4.2.3 Comparação dos Processos Construtivos

As barragens envolvidas nos dois desastres apresentam diferenças significativas em suas origens e processos construtivos. A barragem do Fundão em Mariana teve sua construção iniciada de forma irregular em 2007, sem a apresentação adequada do projeto executivo aos órgãos de licenciamento e fiscalização de Minas Gerais (ESTADO DE MINAS, 2016). A autorização para construção foi concedida em junho de 2007, e poucos meses depois, em 2008, a obra já estava bastante adiantada, evidenciando falhas no processo de fiscalização da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM-MG) (ESTADO DE MINAS, 2016).

Em contraste, a barragem de Brumadinho foi construída em 1976 pela Ferteco Mineração e posteriormente adquirida pela Vale em 2001, sendo ampliada em várias etapas e por diversos projetistas e empreiteiros (WIKIPÉDIA, 2019).

1.4.2.4 Impacto Humano e Ambiental

O impacto humano dos dois desastres revela a gravidade crescente dos acidentes de mineração no Brasil. O rompimento da barragem do Fundão em Mariana causou a morte de 19 pessoas, com outras três permanecendo desaparecidas até hoje, e despejou mais de 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério no meio ambiente (BRASIL. Presidência da República, 2024). Dados posteriores indicaram que o volume real de rejeitos liberados foi ainda maior, com a própria Samarco admitindo que 55 milhões de metros cúbicos vazaram da represa após sua ruptura (PROJETO MANUELZÃO, 2015).

O desastre de Brumadinho liberou aproximadamente 12,7 milhões de metros

cúbicos de rejeitos. Desses, uma parte permaneceu na área da antiga B-I, cerca de 2 Mm³. Na calha do ribeirão Ferro-Carvão até sua confluência com o rio Paraopeba, ficaram depositados 7,8 Mm³ e a parte restante (2,2 Mm³) atingiu a calha do rio Paraopeba, propagando-se até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo, entre os municípios mineiros de Curvelo e Pompéu (MINAS GERAIS. Governo do Estado, 2024).

Brumadinho superou tragicamente os números de Mariana em termos de vidas perdidas, tornando-se o maior acidente de trabalho no Brasil em perda de vidas humanas e o segundo maior desastre industrial do século (WIKIPÉDIA, 2019). Com 272 pessoas mortas em números oficiais e apenas duas vítimas ainda desaparecidas até o início de 2025, incluindo funcionários da mineradora soterrados no refeitório da empresa, onde o sistema de alarme falhou e moradores locais, Brumadinho demonstrou como falhas em estruturas de contenção podem resultar em catástrofes humanas de proporções ainda maiores (WIKIPÉDIA, 2019).

1.4.2.5 Deficiências nos Sistemas de Monitoramento

Os dois desastres evidenciaram graves deficiências nos sistemas de monitoramento e fiscalização de barragens no Brasil. No caso de Mariana, dados sobre a altura e o volume de rejeitos das barragens do Fundão e de Santarém estavam defasados no cadastro da FEAM desde 2012 (PROJETO MANUELZÃO, 2015). O último relatório que incluiu o volume de rejeitos do Fundão ocorreu em 2013, constando no cadastro que a barragem comportava apenas 2,65 milhões de metros cúbicos de material, volume 20 vezes menor que o efetivamente liberado no desastre (PROJETO MANUELZÃO, 2015).

Em Brumadinho, a barragem era classificada pela própria Vale como de "baixo risco" e "alto potencial de danos", estava inativa desde 2015, demonstrando inadequações nos sistemas de avaliação de segurança (WIKIPÉDIA, 2019). Essas deficiências no monitoramento e na atualização de dados fundamentais para a caracterização do nível de risco das estruturas contribuíram diretamente para a magnitude dos desastres e evidenciaram a necessidade de reformulação dos sistemas de controle.

1.4.3 Impactos Socioambientais e Respostas Institucionais

Os impactos socioambientais dos dois desastres extrapolaram significativamente os limites geográficos imediatos dos rompimentos. Em Mariana, a lama de rejeitos contaminou toda a bacia hidrográfica do Rio Doce, cuja extensão de aproximadamente 663 km abrange 230 municípios nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. A lama tóxica percorreu todo esse trajeto até desaguar no Oceano Atlântico, causando a destruição de habitats aquáticos e terrestres, além de comprometer o abastecimento de água em diversas localidades (WIKIPÉDIA, 2019; BRASIL. Presidência da República, 2024). A devastação incluiu a destruição completa de comunidades próximas, a

poluição de corpos d'água utilizados para abastecimento público e a destruição da flora e fauna regionais (ESTADO DE MINAS, 2016).



Figura 37 – A lama de rejeitos contaminou a bacia hidrográfica do Rio Doce, em Mariana

Fonte: Adaptado de (WIKIPÉDIA, 2015)

O desastre de Brumadinho, embora geograficamente mais localizado, atingiu rapidamente instalações administrativas da Vale, áreas residenciais e o leito do rio Paraopeba, comprometendo o abastecimento de água e a biodiversidade aquática, provocou impactos diretos nas operações da mineradora e na região de Córrego do Feijão, destruindo instalações administrativas e operacionais da empresa. Ambos os eventos resultaram em deslocamentos populacionais forçados, perda de meios de subsistência tradicionais e transformações irreversíveis nas paisagens e ecossistemas regionais (WIKIPÉDIA, 2019; CONGRESSO EM FOCO, 2025).

1.4.3.1 Consequências Socioeconômicas

As consequências socioeconômicas para as comunidades afetadas foram profundas e duradouras. Em Mariana, além da destruição de propriedades e meios de subsistência, houve um aumento significativo de problemas de saúde mental entre os moradores, incluindo casos de depressão e ansiedade, agravados pela demora na reparação dos danos e na reconstrução das comunidades. Em Brumadinho, a perda abrupta de vidas humanas e a destruição de infraestruturas essenciais resultaram em traumas coletivos e desafios econômicos substanciais para a região. Esses impactos ressaltam a importância de políticas públicas eficazes de apoio às vítimas e de estratégias de recuperação socioeconômica (ESTADO DE MINAS, 2024).

1.4.3.2 Gestão dos Processos Reparatórios

A gestão dos processos reparatórios evidencia abordagens fundamentalmente diferentes entre as duas tragédias. Em Mariana, a criação da Fundação Renova pelas próprias mineradoras responsáveis gerou controvérsia e desconfiança por parte do Ministério Público Federal e das comunidades atingidas. Esta estrutura foi criticada pela ausência de participação efetiva das vítimas nas decisões sobre reparação, configurando um modelo de governança questionável do ponto de vista da legitimidade democrática.

O Ministério Público Federal considerou o acordo inicial insuficiente e prejudicial, conseguindo sua anulação judicial em agosto de 2016, argumentando que os governos não possuíam legitimidade para atuar em nome da população atingida. Não obstante a anulação do Acordo Interfederativo, as empresas continuaram operando com base nas diretrizes previamente estabelecidas, perpetuando as críticas sobre desvio de finalidade e ineficiência da Fundação Renova (GREENPEACE BRASIL, 2016).

1.4.3.3 Respostas Institucionais

As respostas institucionais aos desastres revelaram tanto os esforços de reparação quanto as limitações dos sistemas de responsabilização corporativa, incluíram acordos de indenização e medidas legais contra as empresas responsáveis. Logo após o desastre de Mariana, foi firmado um termo de compromisso entre os governos federal, de Minas Gerais e do Espírito Santo e as mineradoras Samarco, Vale e BHP Billiton, que previa um fundo de R\$ 20 bilhões para reparação dos danos ao longo de 15 anos (GREENPEACE BRASIL, 2016; BRASIL. Presidência da República, 2024).

Em contraste, Brumadinho apresentou características distintas na resposta jurídica, e a resposta do sistema de justiça foi mais célere e incisiva, com a Advocacia-Geral do Estado ajuizando ações no mesmo dia do rompimento, resultando no bloqueio imediato de bilhões de reais da Vale S.A. e na imposição de obrigações emergenciais, como cooperação no resgate, remoção da lama e controle de vetores.

O tribunal reconheceu a responsabilidade da Vale pela reparação de todos os danos decorrentes do rompimento, e houve pedidos de indenização por perdas econômicas e danos morais coletivos e sociais em valores bilionários. Além disso, foram firmados diversos acordos, incluindo pagamentos emergenciais aos atingidos, resarcimento de gastos públicos, contratação de auditoria técnica e ambiental independente, e custeio pela Vale de projetos como a Biofábrica Wolbachia para controle de vetores, a reestruturação do laboratório da Funed para análise de amostras e monitoramento da saúde dos bombeiros, uma nova captação de água para a Copasa, e obras emergenciais para contenção dos rejeitos (MINAS GERAIS. Governo do Estado, 2024).

1.4.3.4 Acordos de Indenização

As respostas institucionais a ambos os desastres incluíram acordos de indenização e medidas legais contra as empresas responsáveis. No caso de Mariana, até 2021, as indenizações totalizaram aproximadamente R\$ 8,71 bilhões, administradas pela Fundação Renova, criada pelas mineradoras envolvidas (BRASIL, 2022). Em Brumadinho, a Vale firmou um acordo de reparação de R\$ 37,68 bilhões em 2021, considerado o maior da história do Brasil, com a participação de órgãos governamentais e do judiciário. Apesar desses esforços, críticas persistem quanto à efetividade das medidas adotadas e à celeridade na implementação das ações de reparação (BRASIL, 2022).

1.4.3.5 Ações Judiciais e Complexidade Jurídica

As ações judiciais decorrentes de ambos os desastres refletem a complexidade jurídica inerente a crimes socioambientais de tal magnitude. Em Mariana, o Ministério Público Federal apresentou denúncia contra 22 pessoas e as empresas responsáveis por crimes ambientais, paralelamente às ações civis públicas com estimativas de prejuízos alcançando R\$ 155 bilhões.

As negociações para a repactuação do acordo envolveram diversas partes, incluindo governos, Ministérios Públicos, Defensorias Públicas e as mineradoras, mas foram encerradas sem acordo em setembro de 2022, com o poder público criticando o descompromisso das empresas com a responsabilidade social e ambiental, evidenciando os impasses persistentes quanto aos valores e formas de execução das ações reparatórias (BRASIL. Presidência da República, 2024).

A resposta penal em Brumadinho demonstra características similares quanto à complexidade processual, porém com maior celeridade nas medidas cautelares e na identificação de responsabilidades. A falta de punição efetiva para os responsáveis da Vale e da empresa TÜV Süd, que emitiu laudos fraudulentos, permanece como ponto de indignação, reforçado por investigações que indicam decisões judiciais frequentemente desfavoráveis aos atingidos (MODELLI, 2024).

1.4.3.6 Inovações Legislativas Pós-Brumadinho

O contraste mais significativo entre as respostas institucionais reside nas inovações legislativas implementadas após Brumadinho. O estado de Minas Gerais aprovou a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB), instituindo exigências rigorosas para licenciamento e operação, determinando a descaracterização das estruturas alteadas a montante e aumentando a qualidade e intensidade dos monitoramentos.

Esta lei também estabelece auditorias técnicas de segurança e a obrigatoriedade da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), com suspensão imediata das

operações em caso de não conformidade ou falta de estabilidade declarada (MINAS GERAIS. Governo do Estado, 2024).

1.5 Sistema de alerta existentes

Os sistemas de alertas em barragens de rejeitos representam uma evolução crítica na gestão de riscos da mineração moderna, especialmente após as catástrofes recentes que evidenciaram a fragilidade dos métodos tradicionais de monitoramento. A taxa de falha das barragens de rejeitos é estimada em 1,2% globalmente, valor significativamente superior aos 0,01% observados em barragens convencionais de água, demonstrando a complexidade e os riscos inerentes a essas estruturas (STOCKS, 2019). A crescente pressão regulatória e social tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais sofisticadas, incluindo sistemas de monitoramento remoto por satélite, sensores de fibra óptica e redes de microismômetros que oferecem capacidades de detecção precoce de instabilidades.

1.5.1 Sistemas de Monitoramento Atuais

O monitoramento por sensoriamento remoto via satélite emergiu como uma das tecnologias mais promissoras para sistemas de alerta precoce em barragens de rejeitos, oferecendo cobertura global e capacidade de detecção de deformações milimétricas. O projeto DAMSAT (Dam Monitoring from Satellites), desenvolvido pela UK Space Agency em parceria com a HR Wallingford, utiliza tecnologia de satélite para monitorar remotamente barragens de água e rejeitos, reduzindo significativamente os riscos de falha e os consequentes danos a populações e ecossistemas vulneráveis (HR WALLINGFORD, 2021).

Estudos recentes demonstraram que dados de interferometria SAR (Synthetic Aperture Radar) podem detectar deformações terrestres que precedem colapsos catastróficos, como evidenciado na análise retrospectiva da barragem de Brumadinho, onde acelerações súbitas de movimento foram identificadas nos dois meses finais antes do colapso (NATURE COMMUNICATIONS, 2020). Complementarmente, a tecnologia de radar interferométrico permite o monitoramento remoto de movimentos estruturais em barragens com precisão submilimétrica, gerando uma fonte contínua de dados de deformação e mapeamento em tempo real de deslocamentos (HEXAGON, 2024).

A implementação de sistemas de monitoramento microsísmico representa um avanço significativo na capacidade de detecção precoce de instabilidades em barragens de rejeitos, proporcionando monitoramento contínuo 24/7 através de redes de geofones estrategicamente posicionados. A Tetra Tech, desde 2018, comissionou mais de 20 sistemas e instalou mais de 180 geofones conectados a 50 estações sísmicas, principalmente em Minas Gerais, Brasil, evidenciando a crescente adoção desta tecnologia

após os desastres de 2015 e 2019 (TETRA TECH, 2023).

Os sismógrafos registram as ondas sísmicas causadas por movimentos sísmicos naturais ou induzidos pela atividade humana, que podem afetar a estabilidade das barragens, constituindo-se como alguns dos principais dispositivos usados para o monitoramento de barragens (SEQUÊNCIA ENGENHARIA, 2024a). O sistema RGR-Velox (Reactive Geohazard Radar) oferece monitoramento reativo de precisão militar para rompimentos de barragens de rejeitos, detectando, rastreando e alarmando sobre riscos geológicos em movimento em tempo real (INTERNATIONAL MINING, 2024).

Pesquisas recentes demonstraram que a interferometria de ruído ambiente pode ser aplicada para monitorar o desempenho de barragens usando arranjos de geofones, com mudanças de velocidade sísmica inferiores a 1% correlacionando-se fortemente com alterações no nível de água em lagoas de rejeitos adjacentes (NATURE COMMUNICATIONS, 2022). O sucesso dos sistemas microsísmicos tem incentivado o desenvolvimento paralelo de tecnologias de sensoriamento por fibra óptica.

A tecnologia de sensoriamento distribuído por fibra óptica tem revolucionado o monitoramento de barragens de rejeitos ao oferecer medições de alta resolução de temperatura, acústica e deformação ao longo de extensões contínuas da estrutura. O sistema DamPulse, desenvolvido pela Silixa, pode fornecer medições distribuídas de temperatura, deformação e acústica em tempo real através de um único cabo de fibra óptica instalado ao longo de toda a estrutura, servindo como sistema de alerta precoce com monitoramento contínuo ou como ferramenta de investigação para medir movimentos regularmente (SILIXA, 2024).

As diferenças de deformação medidas correspondem ao movimento perpendicular ao cabo, permitindo uma análise detalhada das condições estruturais da barragem e processamento de dados de alta resolução para alertas acionáveis baseados em critérios de desempenho selecionados. A tecnologia SAAV Extend, da Measurand, aborda especificamente os desafios do monitoramento contínuo de deformação durante o alteamento de barragens de rejeitos, fornecendo um perfil de deformação contínuo através de múltiplas elevações da estrutura (RST INSTRUMENTS, 2022).

A implementação de sistemas de monitoramento em barragens de rejeitos frequentemente enfrenta o desafio da localização remota dessas estruturas, demandando soluções de comunicação específicas para ambientes de mineração. O sistema RAMJACK exemplifica essa abordagem ao utilizar comunicação em frequência sub-gigahertz, que proporciona largura de banda suficiente para aplicações de mineração enquanto maximiza a distância de transmissão e minimiza o consumo de bateria (RAMJACK, 2022).

Estes sistemas integram piezômetros e outros instrumentos geotécnicos, como extensômetros, inclinômetros, células de pressão e monitores de geo-resistividade, que se comunicam wireless com um servidor central. A alimentação por bateria reduz a

necessidade de manutenção e facilita o gerenciamento em locais remotos, enquanto a integração com gateways alimentados por linha permite comunicação de volta ao servidor central via Ethernet, WiFi ou LTE (RAMJACK, 2022).

O processamento e análise de dados massivos provenientes de sistemas de monitoramento têm impulsionado a adoção de técnicas de inteligência artificial e deep learning para predição de riscos em barragens de rejeitos. Li et al. desenvolveram um sistema de monitoramento e alerta precoce que integra uma rede bidirecional de memória longa e curta (BiLSTM) para processar dados temporais complexos e identificar padrões que possam indicar instabilidade iminente (JING; GAO, 2022).

Esta abordagem de deep learning demonstra capacidade superior de extração de características, reduzindo a necessidade de descrição manual de características dos dados e fornecendo uma nova solução para processar dados massivos. O modelo bidirecional pode combinar estados históricos e memória atual para abordar problemas de séries temporais, com experimentos comparativos mostrando que o modelo baseado em rede bidirecional recorrente de memória longa e curta apresentou RMSE de 0,09966 para entrada univariada, superando o modelo multilayer perceptron com RMSE de 0,10611 (JING; GAO, 2022).

O desenvolvimento de sistemas integrados de monitoramento tem incorporado tecnologias de visualização 3D e análise de dados em tempo real, criando plataformas abrangentes para gestão de riscos em barragens de rejeitos. O sistema desenvolvido para a barragem de rejeitos da mina de ouro-cobre Zijinshan, na China, integra aquisição de dados, transmissão, gerenciamento, armazenamento, análise, cálculo, exibição e saída em uma plataforma unificada de monitoramento e alerta precoce (FRONTIERS, 2022).

A implementação de gêmeos digitais para barragens de rejeitos representa uma evolução significativa, utilizando sistemas de alerta precoce baseados em satélite para monitorar a estabilidade de instalações de armazenamento de rejeitos e prevenir potenciais falhas catastróficas (INTERNATIONAL WATER POWER, 2024). A Catapult Satellite Applications desenvolveu tecnologias habilitadas por satélite especificamente para redução de riscos em barragens de rejeitos, reconhecendo que estas estruturas frequentemente estão localizadas em áreas remotas ou de difícil acesso (SATELLITE APPLICATIONS CATAPULT, 2023). A sofisticação desses sistemas integrados contrasta significativamente com os métodos de monitoramento tradicional ainda em uso em muitas instalações.

1.5.2 Contexto Brasileiro Pós-Desastres

Esta evolução tecnológica tornou-se ainda mais urgente no contexto brasileiro após os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que evidenciaram falhas críticas nos sistemas de monitoramento e alerta existentes (CÂMARA DOS DEPUTA-

DOS, 2024). Os eventos trágicos impulsionaram mudanças significativas na legislação e nas práticas de segurança, criando um novo paradigma para o monitoramento de barragens no país (BRASIL, 2020).

O desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de alertas tornou-se uma prioridade nacional para evitar novas tragédias, resultando na implementação de regulamentações mais rigorosas e na adoção de tecnologias avançadas (SYNERGIA CONSULTORIA, 2024). Os sistemas contemporâneos de alertas em barragens de rejeitos integram múltiplas tecnologias de monitoramento para detectar mudanças comportamentais que possam indicar risco de ruptura.

1.5.2.1 Sistemas Multitecnológicos Integrados

Estes sistemas combinam instrumentação geotécnica tradicional, como piezômetros e inclinômetros, com tecnologias avançadas como monitoramento por radar interferométrico, sensores sísmicos e sistemas de telemetria em tempo real (TRIMBLE, 2025). A integração desses dados através de plataformas digitais permite a análise contínua do comportamento estrutural e a emissão automática de alertas quando parâmetros críticos são ultrapassados (BENTLEY, 2025).

Esta abordagem multitecnológica representa uma evolução significativa em relação aos métodos de monitoramento anteriormente utilizados no Brasil, particularmente considerando as limitações dos sistemas tradicionais baseados em instrumentação geotécnica básica (MINERAÇÃO BRASIL, 2024). A compreensão dessas limitações históricas torna-se fundamental para avaliar os sistemas que estavam presentes nos locais dos principais acidentes brasileiros.

1.5.3 Instrumentação Geotécnica Tradicional

A instrumentação geotécnica tradicional constitui a base fundamental dos sistemas de monitoramento de barragens, fornecendo dados críticos sobre o comportamento estrutural e hidráulico dessas obras. Os piezômetros, instrumentos responsáveis pela medição da pressão neutra ou poropressão nos materiais da barragem, funcionam como sensores que detectam variações na pressão exercida pela água que preenche os espaços vazios entre as partículas sólidas de um solo ou rocha, sendo instalados em diferentes profundidades e localizações estratégicas para mapear o regime hidráulico interno da estrutura (GEOSCAN, 2024; LTEC, 2024).

Complementarmente, os inclinômetros permitem a detecção de movimentos e deformações através da medição de deslocamentos horizontais e verticais, utilizando tubos verticais instalados no interior da barragem por onde uma sonda especializada percorre diferentes profundidades registrando inclinações e identificando possíveis planos de ruptura (LTEC, 2025).

1.5.3.1 Limitações dos Sistemas Tradicionais

Estes instrumentos tradicionais, embora fundamentais, apresentavam limitações significativas nos sistemas anteriores aos acidentes de Mariana e Brumadinho, principalmente devido à dependência de leituras manuais periódicas e à falta de integração em tempo real (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019a). Consequentemente, os dados coletados podem tornar-se irrelevantes ou desatualizados rapidamente, comprometendo a eficácia do monitoramento. A inadequação destes métodos tradicionais impulsionou o desenvolvimento de soluções automatizadas mais avançadas (IBRAM, 2020).

1.5.4 Limitações dos Sistemas em Mariana e Brumadinho

Os sistemas de monitoramento implementados nas barragens de Mariana e Brumadinho apresentavam limitações técnicas significativas que contribuíram decisivamente para a magnitude das tragédias ocorridas. No caso específico de Mariana, a barragem de Fundão apresentava deficiências estruturais em seu sistema de monitoramento, caracterizando-se por sua natureza genérica e não contemplando simulações específicas de evacuação nem instrumentação geotécnica adequada, consistindo essencialmente em piezômetros destinados à determinação dos níveis de água no corpo da barragem e suas fundações (SEQUÊNCIA ENGENHARIA, 2024a; GEOSCAN, 2024).

Em Brumadinho, a situação revelou-se igualmente problemática, onde a sirene de alerta, que deveria avisar a população sobre o rompimento iminente, jamais soou, sendo completamente engolida pela onda de lama nos primeiros instantes do colapso da barragem devido à localização inadequada e à ausência de um plano de contingência eficaz (INSTITUTO CAMILA E LUIZ TALIBERTI, 2025). Apesar da classificação oficial de “baixo risco” atribuída à estrutura de Brumadinho, as recomendações técnicas indicavam a necessidade de instalação de novo equipamento de radar para monitoramento de deslocamentos frontais à barragem, tecnologia que poderia ter garantido o acionamento tempestivo das sirenes de alerta (METRÓPOLES, 2019).

1.5.5 Sistemas Automatizados de Monitoramento

A implementação de sistemas automatizados de monitoramento tem transformado a gestão operacional de barragens de rejeitos, reduzindo a dependência de inspeções manuais e proporcionando coleta contínua de dados críticos. O Cleveland Dam em North Vancouver, Canadá, classificado como barragem de consequência extrema, utiliza um programa de vigilância de segurança que inclui uma rede complexa de instrumentação remotamente monitorada, incluindo piezômetros, inclinômetros, sensores de turbidez e fluxo, extensômetros, medidores de deformação e transdutores

de pressão, integrados com sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (KLOHN CRIPPEN BERGER, 2021).

A Worldsensing desenvolveu soluções de monitoramento que reduzem significativamente os custos comparados à coleta manual de dados, proporcionando acesso a dados de todas as áreas críticas da barragem de rejeitos sem necessidade de envio de técnicos ao campo para leituras de data loggers (WORLDSENSING, 2024). O sistema LSG6 de aquisição de dados wireless de longo alcance da Worldsensing, implementado pela Mine Design Solutions, simplifica o monitoramento de barragens de rejeitos ao integrar instrumentos geotécnicos como contratomêtros e extensômetros para medir o comportamento da parede da barragem e taludes, atendendo aos desafios únicos apresentados por barragens de rejeitos que tendem a aumentar constantemente de tamanho ao longo do tempo (MINE DESIGN SOLUTIONS, 2021).

1.5.6 Desafios Regulatórios Internacionais

A ausência de regulamentação internacional uniforme para barragens de rejeitos representa um desafio significativo para a implementação padronizada de sistemas de alerta, apesar dos avanços tecnológicos observados após desastres recentes. Não existe um órgão internacional independente ou imparcial regulamentando barragens de rejeitos ou qualquer aspecto da indústria mineradora, resultando em abordagens fragmentadas para segurança e monitoramento (LONDON MINING NETWORK, 2021).

As instalações de rejeitos estão falhando com frequência e severidade crescentes, e os padrões atuais da indústria não são suficientes para proteger adequadamente comunidades e ecossistemas de falhas (EARTHWORKS, 2024). A conscientização sobre monitoramento de segurança de barragens de rejeitos se ampliou devido aos desastres recentes causados por falhas dessas estruturas, com a maioria das diretrizes de monitoramento sugerindo que os proprietários desenvolvam programas robustos de vigilância para detectar possíveis indicadores de falhas potenciais.

1.5.7 Transformações no Marco Regulatório Brasileiro

Os desastres de Mariana e Brumadinho provocaram transformações profundas no marco regulatório brasileiro para segurança de barragens de mineração, criando o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e implementando novas leis, decretos e resoluções que amplificaram o alcance da segurança visando diminuir as ocorrências de desastres (BRASIL, 2020; SYNERGIA CONSULTORIA, 2024).

A Agência Nacional de Mineração implementou o Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), que exige monitoramento contínuo e relatórios periódicos de segurança, fornecendo dados sobre categoria de risco, altura, volume e

método construtivo, permitindo que tanto fiscais quanto empresas insiram informações sobre vistorias em campo (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2020).

1.5.7.1 Nova Política Nacional de Segurança das Barragens

A implementação da nova Política Nacional de Segurança das Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, estabeleceu marcos regulatórios fundamentais para o setor de mineração brasileiro, tornando compulsória a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) para todas as barragens destinadas à acumulação ou disposição de rejeitos de mineração (BRASIL, 2020).

Paralelamente, a Resolução ANM nº 40, de 6 de julho de 2020, determina que os empreendedores devem implementar sistemas de monitoramento de barragens em conformidade com a classificação do Dano Potencial Associado, estabelecendo prazo de 24 meses para a instalação dos equipamentos necessários (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2021). Essas transformações regulatórias brasileiras têm servido de referência para o desenvolvimento de cooperação internacional na área de segurança de barragens.

1.5.8 Experiências Internacionais

As experiências internacionais demonstram que sistemas de alertas eficazes requerem integração tecnológica, protocolos rigorosos de resposta e treinamento adequado das equipes operacionais. Países como Canadá, Austrália e Chile desenvolveram protocolos abrangentes que incluem monitoramento automatizado, sistemas de comunicação redundantes e planos de evacuação bem estruturados (BENTLEY, 2025).

O iTwin IoT fornece insights práticos que incorporam todas as fontes de vigilância de barragens para identificar os primeiros sinais de mudança de comportamento que representam um risco para o desempenho e a integridade estrutural (BENTLEY, 2025). Estas experiências internacionais servem como referência para o desenvolvimento de sistemas mais robustos no contexto brasileiro, especialmente considerando a aplicação de tecnologias emergentes como Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial (ASCENTY, 2024).

A cooperação internacional tem se intensificado como resposta aos desafios globais de segurança em barragens, com eventos especializados como o Dam World 2025, realizado em Lisboa, Portugal, reunindo especialistas mundiais para tratar da segurança de barragens e representando uma oportunidade fundamental para troca de experiências e desenvolvimento de parcerias (BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2025).

1.5.9 Perspectivas Futuras

A evolução dos sistemas de alerta em barragens de rejeitos aponta para uma crescente integração de múltiplas tecnologias de sensoriamento, análise de dados avançada e inteligência artificial para predição de falhas. A aplicação de tecnologias de gêmeos digitais está sendo desenvolvida para criar modelos virtuais abrangentes que incorporem dados de múltiplas fontes de monitoramento, permitindo simulações preditivas e análises de cenários de risco em tempo real.

A integração de sistemas de monitoramento por satélite com redes de sensores terrestres está criando capacidades de monitoramento multi-escala que podem detectar desde deformações milimétricas até movimentos de massa regionais. O desenvolvimento de algoritmos de aprendizado de máquina para análise de padrões de dados de monitoramento promete revolucionar a capacidade de predição de falhas, identificando precursores sutis que podem não ser detectados por análises convencionais, sendo evidenciado pelo Monitoramento Sismográfico de Barragens em Tempo Real como uma solução moderna e eficaz para garantir a segurança das barragens no Brasil e no mundo (SEQUÊNCIA ENGENHARIA, 2024b).

A tecnologia de radar interferométrico permite o monitoramento remoto de movimentos estruturais em barragens com precisão submilimétrica, gerando uma fonte contínua de dados de deformação e mapeamento em tempo real de deslocamentos (HEXAGON, 2024). Simultaneamente, o desenvolvimento de protocolos de comunicação avançados baseados em IoT e sistemas de resposta automatizada promete reduzir significativamente o tempo entre a detecção de problemas e a implementação de medidas de segurança (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2021).

Estas inovações tecnológicas, combinadas com o fortalecimento do marco regulatório, representam a esperança de um futuro mais seguro para as comunidades que vivem no entorno de barragens de rejeitos no Brasil, convergindo para criar sistemas de alerta mais precisos, confiáveis e capazes de proporcionar tempo de resposta adequado para medidas preventivas efetivas (RADAZ, 2024).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Breve descrição do que será apresentado no capítulo.

< Apresentar os conceitos estudados para desenvolver o trabalho >

3 MATERIAL E MÉTODOS

< O desenvolvimento é a parte nuclear do trabalho, por vezes denominada corpo do trabalho. Nessa parte, discute-se o problema apresentado na introdução, bem como aspectos da metodologia utilizada para a realização do estudo. De acordo com as características do problema, das técnicas utilizadas e do estilo do autor, pode-se dividir o desenvolvimento em partes ou capítulos, e cada capítulo em subtítulos ou itens, sem que se perca a unidade do trabalho. >

Este capítulo aborda as etapas do desenvolvimento do projeto, os materiais utilizados e a metodologia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Aqui vai a conclusão do trabalho, recapitulando o que foi desenvolvido e os benefícios promovidos pelo que foi desenvolvido no trabalho.

Em seguida, falar sobre possíveis trabalhos futuros ou continuações do trabalho.

A conclusão proporciona um resumo sintético, mas completo, da argumentação, das provas consignadas no desenvolvimento do trabalho, como decorrência natural do que já foi demonstrado. Essa parte deve reunir as características do que chamamos de síntese interpretativa dos argumentos ou dos elementos contidos no desenvolvimento do trabalho.

Mais detalhes sobre as regras de construção de uma tese, ver o documento: roteiro_uerj_web.pdf

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos.* Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://blogdopedlowski.com/wp-content/uploads/2019/03/nbr13028-2018.pdf>.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Agência Nacional de Mineração conclui o relatório técnico sobre barragem de Brumadinho.* 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/2019/agencia-nacional-de-mineracao-conclui-o-relatorio-tecnico-sobre-barragem-de-brumadinho>. Acesso em: 31 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019: Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante"ou por método declarado como desconhecido.* 2019. Diário Oficial da União: Poder Executivo, Brasília, DF, ano 157, n. 154, p. 98, 9 ago. 2019. Seção 1. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-13-2019.pdf.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019: Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante"ou por método declarado como desconhecido.* 2019. Diário Oficial da União: Poder Executivo, Brasília, DF, ano 157, n. 34, p. 76, 18 fev. 2019. Seção 1. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/resolucao-no-4-de-15-de-fevereiro-de-2019>.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. ANM lança sistema público de monitoramento de barragem de mineração. Brasília: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/anm-lanca-sistema-publico-de-monitoramento-de-barragem-de-mineracao>. Acesso em: 1 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Resolução ANM nº 56, de 28 de janeiro de 2021. Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens.* Brasília: ANM, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao>. Acesso em: 31 maio 2025.

Agência Brasil. *Resolução obriga 19 mineradoras a descaracterizar suas barragens.* Brasília, DF: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-02/resolucao-obriga-19-mineradoras-descaracterizar-suas-barragens>.

Agência Nacional de Mineração. *Boletim mensal – fevereiro 2025.* Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/boletim-mensal-fevereiro-2025.pdf>.

ANM. *Anuário Mineral Brasileiro 2022: prévia.* Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>.

ANM. *Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas*. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2023.pdf.

ANM. *Boletim de Barragens de Mineração – Setembro de 2023*. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/report_trimestral_set_2023.

ANM. *Informe Mineral: 3º trimestre de 2023*. [S.I.], 2023. 1–16 p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe_03tri2023.pdf.

ANM. *Informe Mineral: 3º trimestre de 2023*. [S.I.], 2023. 1–16 p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe_03tri2023.pdf.

ANM. *Informe Mineral: 4º trimestre de 2023*. [S.I.], 2023. 1–18 p. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe04tri2023.pdf>.

ANM SISTEMA. *Dashboard Barragens de Mineração*. 2020. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/dashboards/4a9d32d667b14b5ba23f66b3ecc88a65>. Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração.

APC. *Indústria de mineração no Brasil*. 2024. Disponível em: <https://apc.com.br/industria/industria-de-mineracao-no-brasil/>.

ARAUJO, C. B. d. *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000667613&local_base=UFR01.

ARNEZ, F. I. V. *Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Acesso em: 31 maio 2025. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-09082024-092752/publico/FernandolvanVasquezArnezDissert.pdf>.

ASCENTY. *AIoT: a Inteligência Artificial na Era da Internet das Coisas*. 2024. Disponível em: <https://ascenty.com/blog/artigos/a-inteligencia-artificial-na-era-da-internet-das-coisas/>. Acesso em: 31 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 14001: sistemas de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso*. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/10259/abnt-nbrisob14001-sistemas-de-gestao-ambiental-requisitos-com-orientacoes-para-uso>.

BARRETO, M. L. et al. *Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil*. 1. ed. São Paulo: Editora Maria Laura Barreto, 2001. 215 p. Disponível em: https://livroaberto.ibict.br/bitstream/123456789/922/1/mineracao_desenvolvimento_sustentavel.pdf.

BARROS, J. N. *Legislação ambiental aplicada à mineração*. 86 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental)) — Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2017. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/175231/1/Legisacao_Juliana.pdf.

BBC News Brasil. *Como agro e mineração superaram a manufatura no PIB brasileiro pela primeira vez em décadas*. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/cxr0vlvqdgqo>.

BENTLEY. *Soluções de monitoramento de barragens em tempo real*. 2025. Disponível em: <https://br.bentley.com/solutions/dam-monitoring/>. Acesso em: 31 maio 2025.

BRASIL. *Decreto Federal nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934*: Approva o código florestal que com este baixa. Rio de Janeiro, 1934. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D23793.htm.

BRASIL. *Decreto Federal nº 24.642, de 10 de julho de 1934*: Decreta o código de minas. Rio de Janeiro, 1934. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/d24642.htm.

BRASIL. *Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934*. Rio de Janeiro, 1934.

BRASIL. *Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967*: Código de mineração. Brasília, DF, 1967. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0227.htm.

BRASIL. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981: Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências*. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986: Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental*. 1986. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/RSO00186.htm>.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.

BRASIL. *Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998: Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente*. 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm.

BRASIL. *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*: Estabelece a política nacional de segurança de barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o sistema nacional de informações sobre segurança de barragens e altera a redação do art. 35 da lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm.

BRASIL. *Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018*: Regulamenta o decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, a lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Brasília, 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9406.htm.

BRASIL. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).* Brasília, DF: [s.n.], 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 31 maio 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. *Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022: Estabelece medidas regulatórias aplicáveis às barragens de mineração.* 2022. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 fev. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>.

BRASIL, C. I. d. *Indenizações por tragédia em Mariana atingiram R\$ 8,71 bilhões em 2021.* Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. Agência Brasil. Disponível em: [https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-01/indenizacoes-por-tragedia-em-mariana-tingiram-r-871-bilhoes-em-2021](https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-01/indenizacoes-por-tragedia-em-mariana-atingiram-r-871-bilhoes-em-2021). Acesso em: 31 maio 2025.

BRASIL. Comissão de Valores Mobiliários. *Instrução CVM nº 480, de 7 de dezembro de 2009: Dispõe sobre o registro de emissores de valores mobiliários admitidos à negociação em mercados regulamentados.* 2009. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 dez. 2009. Disponível em: <https://conteudo.cvm.gov.br/export/sites/cvm/legislacao/instrucoes/anexos/400/inst480consolid.pdf>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 286, de 30 de agosto de 2001: Dispõe sobre o licenciamento ambiental de empreendimentos nas regiões endêmicas de malária.* 2001. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 31 ago. 2001. Disponível em: <http://www.areaseg.com/conama/2001/286-2001.pdf>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução CONAMA nº 9, de 3 de dezembro de 1987: Dispõe sobre a realização de audiências públicas no processo de licenciamento ambiental.* 1987. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 jul. 1990, p. 12945. Disponível em: <https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-009-87-Audi%C3%AAcias-P%C3%BAblicas-no-processo-de-LA.pdf>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997: Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental.* 1997. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 247, p. 30841-30843, 22 dez. 1997. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. *Defesa Civil Nacional fortalece a cooperação internacional na segurança de barragens.* Brasília: [s.n.], 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/defesa-civil-nacional-fortalece-a-cooperacao-internacional-na-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BRASIL. Presidência da República. *Conheça a linha do tempo da tragédia de Mariana (MG).* Brasília, DF: [s.n.], 2024. Gov.br. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/novo-acordo-do-rio-doce/conheca-a-linha-do-tempo-da-tragedia-de-mariana-mg>. Acesso em: 22 maio 2025.

BRASIL. Senado Federal. *Lei que cria Agência Nacional de Mineração é sancionada com vetos*. Brasília, DF: Senado Federal, 2017. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2017/12/27/lei-que-cria-agencia-nacional-de-mineracao-e-sancionada-com-vetos>.

CANADIAN DAM ASSOCIATION. *Dam safety guidelines*. Edmonton: CDA, 2007. Disponível em: <https://cda.ca/publications/cda-guidance-documents/dam-safety-publications>.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. *HOLOS*, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, v. 8, p. 77–85, 2017. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367>.

CARNEIRO, G. S. G. *Estudo das causas, impactos e medidas corretivas do rompimento de uma barragem de rejeitos, usando o caso da barragem de Mariana – MG*. 24 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22203/3/EstudoCausasImpacto.pdf>.

CARVALHO, P. S. L. et al. *Sustentabilidade socioambiental da mineração*. [S.I.], 2018. 333–390 p. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15361/1/BS47_Mineracao_FECHADO.pdf.

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. *Brasil tem nova lei de segurança de barragem*. 2020. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/novidades/brasil-tem-nova-lei-de-seguranca-de-barragem/>.

CONCEIÇÃO, R. A. C. d. *Análise do potencial de risco de rompimento em barragens de rejeito de mineração do Estado do Pará utilizando a metodologia Risk-Based Profiling System (RBPS)*. 68 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia)) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <https://ppggrd.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/disserta%C3%A7oes%20ppggrd/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Almir.pdf>.

CONGRESSO EM FOCO. *Tragédia de Brumadinho: seis anos, 242 mortos, nenhum condenado*. 2025. Congresso em Foco. Disponível em: <https://www.congressoemfoco.com.br/noticia/106077/tragedia-de-brumadinho-seis-anos-242-mortos-nenhum-condenado>. Acesso em: 27 maio 2025.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012*: Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2012. Seção 1, 4 set. 2012. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20143.pdf>.

CRUZ, C. A *ISO 31000 na mineração*. 2024. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/iso-31000-na-minera%C3%A7%C3%A3o-claudinei-cruz-gvkzf/>.

CRUZ, C. O. *Classificação das barragens de rejeito baseada no risco de eventos indesejáveis utilizando dados do SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração da ANM*. 112 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia

Geotécnica)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/8fcbd250-9240-410b-a826-fcecf9aa4c6c>.

CTS UFSJ - CAP. *Trabalho de CTS - Instrumentação de monitoramento automatizado de Barragem de Rejeito*. 2017. 1 vídeo (22 min 37 s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Eh41IJiYqoU>. Publicado pelo canal CTS UFSJ - CAP.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. *Famílias das vítimas pedem punição para responsáveis por tragédia em Brumadinho*. 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1040943-familias-das-vitimas-pedem-punicao-para-responsaveis-por-tragedia-em-brumadinho/>. Acesso em: 31 maio 2025.

DARZI, R. *Transformação digital na mineração: a nova era da eficiência e sustentabilidade*. São Paulo: [s.n.], 2024. SciCrop. Disponível em: <https://scicrop.com/2024/07/03/transformacao-digital-na-mineracao-a-nova-era-da-eficiencia-e-sustentabilidade/>.

DOMINGUES, G. F. História da mineração no território brasileiro: uma análise dos tratados políticos que legislam a atividade mineradora (1934-1967). *Revista Ensaios de História*, v. 23, n. 1, 2022. Disponível em: <https://periodicos.franca.unesp.br/index.php/ensaiosdehistoria/article/view/3881/3261>.

DUARTE, A. P. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no Estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8AUPNJ/1/classifica_o_das_barragens_de_conten_o.pdf.

EARTHWORKS. *Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management*. 2024. Disponível em: <https://earthworks.org/resources/safety-first/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

Environmental Protection Agency. *Management of Mining Waste: Technical Guidelines*. Washington, DC, 2019.

EQUATOR PRINCIPLES ASSOCIATION. *The Equator Principles EP4*. [S.I.], 2020. Disponível em: https://equator-principles.com/app/uploads/The-Equator-Principles-EP4_July2020.pdf.

ESTADO DE MINAS. *Obras da barragem do Fundão começaram de forma irregular*. Belo Horizonte: [s.n.], 2016. Estado de Minas. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/17/interna_gerais,725948/obras-da-barragem-do-fundao-comecaram-de-forma-irregular.shtml. Acesso em: 26 maio 2025.

ESTADO DE MINAS. *Um alerta das vítimas da tragédia de Mariana para os gaúchos*. Belo Horizonte: [s.n.], 2024. Estado de Minas. Disponível em: <https://www.em.com.br/gerais/2024/06/6873908-um-alerta-das-vitimas-da-tragedia-de-mariana-para-os-gauchos.html>. Acesso em: 27 maio 2025.

EUROPEAN COMMISSION. *EU taxonomy for sustainable activities*. Brussels: European Commission, 2020. Disponível em: https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en.

FEAM. *Minas avança na descaracterização das barragens alteadas a montante*. Belo Horizonte, 2024. Disponível em: <https://feam.br/w/minas-avanca-na-descaracterizacao-das-barragens-alteadas-a-montante>. Atualizado em: 12 nov. 2024.

FERNANDES, F. R. C.; ARAUJO, E. R. *Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais*. CETEM/MCTI, 2016. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1909/1/conflitos_ambientais_cap.2%20p65.pdf.

FILHO, L. H. A. *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocene*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: https://propec.ufop.br/uploads/propec_2022/teses/arquivos/tese75.pdf.

FONSECA, E. Os resultados da mineração no ano de 2023 conforme dados do ibram. *Synergia Editora*, feb 2024. Disponível em: <https://synergiaeditora.com.br/os-resultados-da-mineracao-no-ano-de-2023-conforme-dados-do-ibram/>.

FONSECA, P. C. D. Do progresso ao desenvolvimento no brasil. In: BASTOS, P. P. Z.; FONSECA, P. C. D. (Ed.). *A era Vargas: Desenvolvimento, economia e sociedade*. São Paulo: Editora Unesp, 2012. p. 51–68. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/5NrXd8XXCZhtFshHQnzDNqp/>.

FREIRE, G. M. C. A.; VIEIRA, L. M.; MARTINS, M. U. E. *Rejeitos de minério no Brasil: uma análise interdisciplinar*. São Paulo: Pimenta Cultural, 2020. Disponível em: https://www.pimentacultural.com/wp-content/uploads/2024/05/eBook_Rejeitos-minerio-Brasil.pdf.

FRONTIERS. 3d visualization monitoring and early warning system of a tailings dam—gold copper mine tailings dam in zijingshan, fujian, china. *Frontiers in Earth Science*, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.800924/full>. Acesso em: 11 jun. 2025.

Geoscan. *Classificação de barragens*. 2020. Disponível em: <https://www.geoscan.com.br/classificacao-de-barragens/>. Atualizado em: 14 dez. 2024.

GEOSCAN. *Sistema de monitoramento de barragem*. 2024. Disponível em: <https://www.geoscan.com.br/sistema-de-monitoramento-de-barragem/>. Acesso em: 31 maio 2025.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. *G4 Mining and Metals Sector Disclosures*. Amsterdam, 2013. Disponível em: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2642721/Recursos/Guias%20y%20Estandares/Suplementos%20sectoriales%20G4/GRI-G4-Mining-and-Metals-Sector-Disclosures%20\(1\).pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2642721/Recursos/Guias%20y%20Estandares/Suplementos%20sectoriales%20G4/GRI-G4-Mining-and-Metals-Sector-Disclosures%20(1).pdf).

GREENPEACE BRASIL. *Qual é o valor de um desastre ambiental no Brasil?* 2016. Greenpeace Brasil. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/blog/qual-e-o-valor-de-um-desastre-ambiental-no-brasil/>. Acesso em: 31 maio 2025.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. *Introductory Mining Engineering*. 2. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2019.

HEXAGON. *Monitoramento da integridade estrutural da construção*. 2024. Disponível em: <https://hexagon.com/pt/solutions/structures-construction-monitoring>. Acesso em: 31 maio 2025.

HR WALLINGFORD. *DAMSAT / HR Wallingford*. 2021. Disponível em: <https://www.hrwallingford.com/projects/damsat>. Acesso em: 11 jun. 2025.

IBRAM. *Métodos construtivos de barragens de rejeitos*. Brasília, 2006.

IBRAM. *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração*. 1. ed. Brasília, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>.

IBRAM. *As mais recentes tecnologias para o gerenciamento de riscos em minas*. 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/as-mais-recentes-tecnologias-para-o-gerenciamento-de-riscos-em-minas/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

IBRAM. *Livro Verde da Mineração*. [S.I.], 2022. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/11/IBRAM_LivroVerde-digital.pdf.

IBRAM. *Panorama da Mineração Brasileira 2023*. Brasília, 2023. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2023/08/PMB2023.pdf>.

IBRAM. *Dados do setor mineral em 2024*. Brasília, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/02/DADOS_Setor-Mineral_2024_5FEV2025.pdf.

Instituto Brasileiro de Mineração. *Relatório Anual de Atividades: Mineração Brasileira*. 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/>.

Instituto Brasileiro de Mineração. *Coletiva de Imprensa: Resultados 1S23*. Brasília, 2023. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2023/07/20230718_Coletiva-de-Imprensa-Resultados-1S23_rev02.pdf.

INSTITUTO CAMILA E LUIZ TALIBERTI. *6 anos da tragédia de Brumadinho*. 2025. Disponível em: <https://somossementes.org.br/6-anos-da-tragedia-de-brumadinho/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental (BRU)*. [S.I.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7916>.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences*. Paris, 2001. 144 p. (Bulletin, 121). Disponível em: <https://www.icoldchile.cl/boletines/121.pdf>.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Tailings Dam Safety Bulletin*. Paris, 2022. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2023-04/S4-1Andy%20Small_ENG.pdf.

International Council on Mining and Metals. *Global Industry Standard on Tailings Management*. [S.I.], 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-work/environmental-resilience/tailings>.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT. *Global Industry Standard on Tailings Management*. London, 2020. Disponível em: <https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard-on-tailings-management.pdf>.

INTERNATIONAL MINING. *tailings dams Archives - International Mining*. 2024. Disponível em: <https://im-mining.com/tag/tailings-dams/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

INTERNATIONAL WATER POWER. *Digital twins for tailings dams*. 2024. Disponível em: <https://www.waterpowermagazine.com/analysis/digital-twins-for-tailings-dams/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

IPEA. *Ipea e MME lançam estudo sobre a extensão da cadeia produtiva da mineração no PIB brasileiro*. 2023. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/14835-ipea-e-mme-lancam-estudo-sobre-a-extensao-da-cadeia-produtiva-da-mineracao-no-pib-brasileiro>

IRAMINA, W. S. et al. Identificação e controle de riscos ocupacionais em pedreira da região metropolitana de são paulo. *Rem: Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 62, n. 4, p. 503–509, out./dez. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/zvsdHKwHnKSR3CSdgCXvPKJ/?lang=pt&format=pdf>.

JAZIDA. *As leis que regulamentam a atividade de mineração no Brasil*. 2022. Disponível em: <https://blog.jazida.com/as-leis-que-regulamentam-a-atividade-de-mineracao-no-brasil/>.

JING, Z.; GAO, X. Monitoring and early warning of a metal mine tailings pond based on a deep learning bidirectional recurrent long and short memory network. *PLoS One*, United States, v. 17, n. 10, p. e0273073, out 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9562152/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

JÚNIOR, T. F. D. S.; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no brasil. *HOLOS*, v. 5, p. 2–39, 2018. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7423>.

KLOHN CRIPPEN BERGER. *Tailings Dam Surveillance Technology - KCB's Experience*. 2021. Disponível em: <https://klohn.com/blog/tailings-dam-surveillance-technology-kcbs-experience/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

LEÃO, R.; RABELO, R. *A Extensão da Cadeia Produtiva da Economia Mineral no PIB Brasileiro*: Sumário executivo. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12702/1/TD_2950_web.pdf.

LONDON MINING NETWORK. *Tailings dams: an explainer*. 2021. Disponível em: <https://londonminingnetwork.org/get-informed/tailings-dams-explainer/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-14122006-123702/>.

LTEC. *Instrumentação em Barragens – Piezômetros - NBR 17189*. 2024. Disponível em: <https://ltec.eng.br/instrumentacao-em-barragens-piezometros-nbr-17189/>. Acesso em: 31 maio 2025.

LTEC. *Instrumentação em obras: Inclinômetros - NBR 17189 / ASTM D6230*. 2025. Disponível em: <https://ltec.eng.br/instrumentacao-em-obras-inclinometros-nbr-17189-astm-d6230/>. Acesso em: 31 maio 2025.

METRÓPOLES. *Saiba o que dizem os laudos sobre as causas do rompimento da barragem de Brumadinho*. 2019. Disponível em: <https://www.metropoles.com/brasil/saiba-o-que-dizem-os-laudos-sobre-as-causas-do-rompimento-da-barragem-de-brumadinho>. Acesso em: 31 maio 2025.

MINAS GERAIS. Governo do Estado. *Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão*. Belo Horizonte: [s.n.], 2024. Governo de Minas Gerais. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>. Acesso em: 31 maio 2025.

MINE DESIGN SOLUTIONS. *Tailings Dam Monitoring*. 2021. Disponível em: <https://mdt.ca/piezometer-monitoring/tailings-dam-monitoring/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MINERAÇÃO BRASIL. *Métodos Alternativos para as Barragens de Rejeitos*. 2024. Disponível em: <https://mineracaobrasil.com/metodos-alternativos-para-as-barragens-de-rejeitos/>. Acesso em: 31 maio 2025.

MINING ASSOCIATION OF CANADA. *A guide to the management of tailings facilities*. Version 3.2. Ottawa, 2021. Disponível em: <https://mining.ca/our-focus/tailings-management/tailings-guide/>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). *Linha do tempo da regulamentação minerária brasileira*. Brasília, DF: MME, 2025. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36108/439734/Linha_do_tempo.pdf.

Ministério dos Transportes. *ISO 31000 de 2018 – Gestão de Riscos*. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/centrais-de-conteudo/iso-31000-de-2018-gestao-de-riscos-pdf>.

MODELLI, L. *Brumadinho: 5 anos da tragédia, 5 anos de injustiça socioambiental*. 2024. Greenpeace Brasil. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/blog/brumadinho-5-anos-da-tragedia-5-anos-de-injustica-socioambiental/>. Acesso em: 31 maio 2025.

MOECKE, G. C. *Análise da classificação quanto ao dano potencial associado de 15 barragens brasileiras com base nos resultados de 90 cenários de ruptura*. 112 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/49955/3/2019_dis_gcmoecke.pdf.

NATURE COMMUNICATIONS. Advanced analysis of satellite data reveals ground deformation precursors to the brumadinho tailings dam collapse. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-020-00079-2>. Acesso em: 11 jun. 2025.

NATURE COMMUNICATIONS. Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00629-w>. Acesso em: 11 jun. 2025.

PROJETO MANUELZÃO. *Barragem que se rompeu em Mariana tinha 20 vezes o volume registrado pela Feam*. 2015. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://manuelzao.ufmg.br/barragem-que-se-rompeu-em-mariana-tinha-20-vezes-o-volume-registrado-pela-feam/>. Acesso em: 26 maio 2025.

RADAZ. *Revolucionando as operações de mineração com tecnologia de radar embarcada em drones*. 2024. Disponível em: <https://radaz.com.br/na-midia/blog/103-revolucionando-as-operacoes-de-mineracao-com-tecnologia-de-radar-embarcada-em-drones>. Acesso em: 31 maio 2025.

RAMJACK. *Tailings Dam Monitoring*. 2022. Disponível em: <https://ramjacktech.com/our-expertise/monitor/tailings-dam-monitoring/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

RST INSTRUMENTS. *Tailings dam monitoring: In-ground and above-ground technologies*. 2022. Disponível em: <https://rstinstruments.com/blog/tailings-dam-monitoring-in-ground-and-above-ground-technologies/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SATELLITE APPLICATIONS CATAPULT. *Tailings Dams Monitoring using Satellite-Enabled Technologies*. 2023. Disponível em: <https://sa.catapult.org.uk/blogs/tailings-dams-monitoring-using-satellite-enabled-technologies/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

segurancatemfuturo Segurança Tem Futuro. *A matriz de risco*. [s.d.]. Disponível em: <https://segurancatemfuturo.com.br/index.php/home/gerenciamento-de-riscos/a-matriz-de-risco/>.

SEQUÊNCIA ENGENHARIA. *Monitoramento Sismográfico de Barragens*. 2024. Disponível em: <https://sequencia.eng.br/servicos/monitoramento-de-vibracoes/monitoramento-sismografico-de-barragens/>. Acesso em: 31 maio 2025.

SEQUÊNCIA ENGENHARIA. *Monitoramento Sismográfico de Barragens em Tempo Real*. 2024. Disponível em: <https://sequencia.eng.br/monitoramento-sismografico-de-barragens-em-tempo-real/>. Acesso em: 31 maio 2025.

SILIXA. *DamPulse™ – Tailings Dam Monitoring System*. Elstree: Silixa Ltd, 2024. Disponível em: <https://silixa.com/sectors/mining/dampulse-tailings-dam-monitoring/>. Acesso em: 11 jun. 2025. Atualizado em 2024.

Sistema ESO. *Avaliação de riscos no PGR*. 2021. Disponível em: <https://sistemaeso.com.br/blog/seguranca-no-trabalho/avaliacao-de-riscos-no-pgr>.

Sistema ESO. *O que é matriz de risco e qual usar no PGR*. 2021. Disponível em: <https://sistemaeso.com.br/blog/seguranca-no-trabalho/o-que-e-matriz-de-risco-e-qual-usar-no-pgr>.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 19, p. 831–888. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>.

STOCKS, C. *Tailings dam failures – can we minimise the risks?* 2019. Disponível em: <https://www.waterpowermagazine.com/analysis/tailings-dam-failures-can-we-minimise-the-risks-7217097/?cf-view>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SUSTAINABILITY ACCOUNTING STANDARDS BOARD. *Sustainability Accounting Standard: Metals & Mining*. San Francisco, 2018. Disponível em: https://www.hecla.com/wp-content/uploads/2021-Hecla_SASB_2020Tables-FINAL.pdf.

SYNERGIA CONSULTORIA. *Desastres com barragens e o novo marco na mineração*. 2024. Disponível em: <https://www.synergiaconsultoria.com.br/fique-por-dentro/desastres-em-barragens-e-o-novo-marco-na-mineracao/>. Acesso em: 31 maio 2025.

Teck Resources Limited. *Tailings safety and security at Teck*. [S.I.], 2019. Disponível em: <https://www.teck.com/media/Tailings-Fact-Sheet.pdf>.

TETRA TECH. *Mitigating Risks for Tailings Dams with Microseismic Technology*. 2023. Disponível em: <https://www.tetratech.com/insights/mitigating-risks-for-tailings-dams-with-microseismic-technology/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em minas gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, v. 18, n. 34, p. 49–65, 2018. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/19480>.

TRIMBLE. *O Melhor Sistema de Monitoramento de Barragens da Indústria*. 2025. Disponível em: <https://geospatial.trimble.com/en/resources/blog/o-melhor-sistema-de-monitoramento-de-barragens-da-indústria>. Acesso em: 31 maio 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. *Simepar faz monitoramento inteligente das águas com tecnologia IoT*. 2021. Disponível em: <https://ufpr.br/simepar-faz-monitoramento-inteligente-das-aguas-com-tecnologia-iot/>. Acesso em: 31 maio 2025.

UNIÃO EUROPEIA. *Diretiva 85/337/CEE do Conselho, de 27 de junho de 1985: Relativa à avaliação dos efeitos de determinados projetos públicos e privados no ambiente*. 1985. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 175, p. 40-48, 5 jul. 1985. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31985L0337>.

Vale. *Sobre barragens e rejeitos*. 2024. Disponível em: <https://vale.com/pt/esg/sobre-barragens-e-rejeitos>.

VENDRAME, A. C. *Os riscos da mineração: protegendo os trabalhadores contra acidentes e doenças*. 2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/os-riscos-da-minera%C3%A7%C3%A3o-protetendo-trabalhadores-e-antonio-carlos/>.

VILAÇA, L. A. *Avaliação de risco em taludes na mineração*. 47 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária)) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível

em: https://www.eng-ambiental.bh.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/187/2021/09/201522080376_Lais-Alves.pdf.

VILLAS-BÔAS, A. L. *Mineração e Desenvolvimento Econômico: A questão nacional nas estratégias de desenvolvimento do setor mineral (1930-1964)*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 1995. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/278>.

WARZYNSKI, V. P. et al. Barragem de rejeitos. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 10, p. 440–450, 2023. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/11650>.

WARZYNSKI, V. P. et al. Barragem de rejeitos. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, [S. l.], v. 9, n. 10, p. 440–450, 2023. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/11650>. Acesso em: 19 maio 2025.

WIKIPÉDIA. *Rompimento de barragem em Mariana*. [S.I.]: [s.n.], 2015. WIKIPÉDIA: a encyclopédia livre. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Rompimento_de_barragem_em_Mariana. Acesso em: 31 maio 2025.

WIKIPÉDIA. *Rompimento de barragem em Brumadinho*. [S.I.]: [s.n.], 2019. WIKIPÉDIA: a encyclopédia livre. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Rompimento_de_barragem_em_Brumadinho. Acesso em: 26 maio 2025.

WORLDSENSING. *How a major Canadian tailings dam improves monitoring data and increases personnel safety, while cutting costs*. 2024. Disponível em: <https://www.worldsensing.com/success-story/how-a-major-canadian-tailings-dam-improves-monitoring-data-and-increases-personnel-safety-while-cutting-costs>. Acesso em: 11 jun. 2025.

XENITH CONSULTING. *ESG Due Diligence in Mining: A Critical Lens for Project Evaluation*. 2025. Disponível em: <https://www.xenith.com.au/esg-due-diligence-in-mining/>.