



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- MESTRADO -

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O ROMPIMENTO
DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO, EM MARIANA/MG,
A PARTIR DE UMA ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR**

Por

Sidney de Oliveira Barbosa

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba,
para obtenção do grau de Mestre

João Pessoa - Paraíba

Setembro de 2022



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- MESTRADO -

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O ROMPIMENTO
DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO, EM MARIANA/MG,
A PARTIR DE UMA ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Sidney de Oliveira Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva

João Pessoa - Paraíba

Setembro de 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B238i Barbosa, Sidney de Oliveira.

Investigação sobre o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG, a partir de uma abordagem multidisciplinar / Sidney de Oliveira Barbosa. - João Pessoa, 2022.

112 f. : il.

Orientação: Tarciso Cabral da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Barragens de rejeitos. 2. Barragens de mineração.
3. Desastre ambiental. I. Silva, Tarciso Cabral da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 627.82(043)

Elaborado por Larissa Silva Oliveira de Mesquita - CRB-15/746

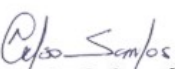
***“INVESTIGAÇÃO SOBRE O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO, EM
MARIANA/MG, A PARTIR DE UMA ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR”***

SIDNEY DE OLIVEIRA BARBOSA
Dissertação aprovada em 29 de setembro de 2022

Período Letivo: 2022.2



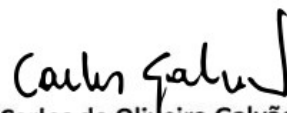
Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva – UFPB
Orientador



Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB
Examinador Interno



Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira – UFPB
Examinador Externo



Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão – UFCG
Examinador Externo



Prof. Dr. Marx Prestes Barbosa – UFCG
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2022

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem devo tudo o que sou e tenho, que iluminou meus passos ao longo desse caminho e me permitiu concluir mais esta etapa em minha vida.

Aos meus pais José Erivan (in memoriam) e Maria Guadalupe, por todos os esforços e sacrifícios que fizeram para que eu e meus irmãos pudéssemos ter uma educação de qualidade.

À minha esposa Verônica e às minhas filhas Gabriela e Marianna, pelo apoio e compreensão diante das minhas ausências em virtude do trabalho e dos estudos, e por serem esse porto seguro para onde sempre retorno.

Aos meus irmãos, cunhados, cunhadas, sobrinhos e demais familiares, pela torcida e orações pelo êxito do meu trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva, por ter aceitado trilhar comigo essa jornada, partilhando, com generosidade, seus conhecimentos e larga experiência profissional.

Aos Professores Hamilcar José Almeida Filgueira, Celso Augusto Guimarães Santos, Marx Prestes Barbosa e Carlos de Oliveira Galvão, pelas preciosas contribuições para a melhoria da qualidade do meu trabalho de pesquisa.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB, Tarciso Cabral, Celso Augusto, Elisângela Rocha, Gustavo Barbosa, Roberto Pimentel e Gilson Athayde, dos quais tive a honra de ser aluno, pela solicitude e competência em transmitir importantes conhecimentos, que foram de grande utilidade para a minha formação profissional.

Aos meus amigos da Polícia Federal, os Peritos Criminais Federais José Alysson Dehon Moraes Medeiros e Thiago Mendonça Muniz de Albuquerque, exemplos de profissionais dedicados e comprometidos com a busca de excelência no Serviço Público, companheiros de trabalho há mais de quinze anos, pelo apoio e incentivo de sempre.

Aos colegas de turma do Mestrado, pela amizade, companheirismo, espírito prestativo e colaboração ao longo desse caminho de aprendizado.

Aos peritos, professores, técnicos e profissionais que gentilmente aceitaram o convite para participar das entrevistas realizadas, compartilhando suas experiências e conhecimentos, colaborando, assim, com o êxito da pesquisa.

RESUMO

Na tarde do dia 05 de novembro de 2015, a barragem de disposição de rejeitos do Fundão, de propriedade da empresa mineradora SAMARCO, localizada no Complexo Minerário de Germano, município de Mariana, Estado de Minas Gerais, Brasil, entrou em colapso. Em decorrência, houve o despejo de grande parte de seu conteúdo, de cerca de 60 milhões de metros cúbicos, constituído por rejeito arenoso e lama, nos riachos a jusante da referida barragem e em seguida no Rio Doce. O desastre provocou a perda de 19 (dezenove) vidas humanas, a devastação do Distrito de Bento Rodrigues, a interrupção do fornecimento de água em 39 (trinta e nove) municípios nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e a destruição de bens e propriedades no seu caminho de mais de 650 km, até chegar ao Oceano Atlântico. É considerado o maior desastre ambiental da história do Brasil. O presente trabalho teve como objetivo identificar, com base na experiência do caso concreto do rompimento da barragem do Fundão, as principais causas do desastre, bem como as interações e relações existentes entre os diversos atores, elementos técnicos e naturais envolvidos no planejamento, implantação e operação desse tipo de estrutura. Foi aplicada a técnica Análise de Constelação, desenvolvida na Universidade Técnica de Berlim no início dos anos 2000, concebida para estudar situações complexas a partir de uma abordagem multidisciplinar. A aplicação da referida técnica de análise permitiu identificar que os fatores que teriam contribuído para a ocorrência do fenômeno de liquefação, apontado por especialistas como a causa imediata do colapso, foram decorrentes, direta ou indiretamente, de ações e/ou omissões de diversos atores envolvidos no processo, que incluem projetistas, consultores, responsáveis pela construção e operação da barragem, gestores da empresa, órgãos responsáveis pelo licenciamento ambiental e pela licença de funcionamento da atividade minerária no local, entre outros. Foram constatadas também lacunas existentes na legislação e instrumentos normativos, muitas vezes omissos em relação a aspectos importantes que devem ser levados em conta na implantação de barragens de rejeitos, de forma segura.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de rejeitos; Barragem do Fundão; Análise de Constelação.

ABSTRACT

On the afternoon of November 5, 2015, the Fundão tailings disposal dam, owned by the mining company SAMARCO, located in the Germano Mining Complex, municipality of Mariana, State of Minas Gerais, Brazil, collapsed. As a result, a large part of its content, around 60 million cubic meters, consisting of sandy tailings and mud, was dumped into streams downstream of the aforementioned dam and then into the Rio Doce. The disaster caused the loss of 19 (nineteen) human lives, the devastation of the District of Bento Rodrigues, the interruption of water supply in 39 (thirty-nine) municipalities in the States of Minas Gerais and Espírito Santo, and the destruction of goods and properties on its way of more than 650 km, until it reaches the Atlantic Ocean. It is considered the biggest environmental disaster in the history of Brazil. The present work aimed to identify, based on the experience of the concrete case of the Fundão dam failure, the main causes of the disaster, as well as the interactions and relationships between the various actors, technical and natural elements involved in the planning, implementation and operation of this structure type. The Constellation Analysis technique, developed at the Technical University of Berlin in the early 2000s, was applied, designed to study complex situations from a multidisciplinary approach. The application of the aforementioned analysis technique allowed to identify that the factors that would have contributed to the occurrence of the liquefaction phenomenon, pointed out by experts as the immediate cause of the collapse, resulted, directly or indirectly, from actions and/or omissions of various actors involved in the process, which include designers, consultants, those responsible for the construction and operation of the dam, company managers, bodies responsible for environmental licensing and the operating license for mining activity on the site, among others. Existing gaps in legislation and normative instruments were also found, often omitted in relation to important aspects that must be taken into account in the implementation of tailings dams, in a safe way.

KEYWORDS: Tailings dams, Fundão Dam, Constellation Analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS E HIPÓTESES	14
2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.2 HIPÓTESES DA PESQUISA	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO	16
3.2 LEGISLAÇÃO E NORMAS APLICÁVEIS A BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO	33
3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BARRAGEM DO FUNDÃO	47
3.4 HISTÓRICO OPERACIONAL DA BARRAGEM DO FUNDÃO	55
4 MATERIAIS E MÉTODOS	71
4.1 A TÉCNICA ANÁLISE DE CONSTELAÇÃO	71
4.2 METODOLOGIA UTILIZADA NA PESQUISA	79
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	102
6.1 CONCLUSÕES	102
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
APÊNDICE A	113
APÊNDICE B	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Métodos de alteamento de barragens de rejeitos.	18
Figura 2 – Incidentes envolvendo barragens de rejeitos ocorridos no Brasil no período de 1985 a 2015.	26
Figura 3 – Tabela 1 da NBR nº 13.028/2017 contendo os Fatores de Segurança de limite mínimo ou de aceitação para barragens de mineração.	39
Figura 4 – Mapas de localização da Barragem do Fundão ao norte do município de Mariana	48
Figura 5 – Vista geral da Barragem do Fundão no ano de 2015.	49
Figura 6 – Imagem aérea do SRF, logo após o término da sua implantação.	51
Figura 7 – Imagem das tulipas da galeria principal e galeria secundária.	55
Figura 8 – Imagens de ângulos opostos da erosão do Dreno de Fundo Principal.	56
Figura 9 – Imagens do <i>piping</i> ocorrido em 13/04/2009 na barragem do Fundão.	57
Figura 10 – Imagens da investigação dos drenos de fundo em 20/08/2009.	58
Figura 11 – Imagem da conclusão da construção do septo de argila nos drenos de fundo do Dique 1 da barragem do Fundão.	59
Figura 12 – Imagem do início do alteamento no eixo recuado em outubro/2012.	63
Figura 13 – Imagem da subsidência da galeria secundária e da junta com defeito.	64
Figura 14 – Imagem do avanço do recuo do eixo da barragem.	64
Figura 15 – Vista geral do Dique 1 da barragem em maio/2013.	66
Figura 16 – Imagem com representação das trincas de tração e compressão na região do eixo recuado.	67
Figura 17 – Imagem da construção da berma de equilíbrio no eixo recuado.	68
Figura 18 – Imagem em primeiro plano da construção do tapete drenante da OD.	70
Figura 19 – Fotografia da área da Barragem do Fundão instantes após o sinistro.	70
Figura 20 – Representação gráfica dos elementos da Análise de Constelação.	74
Figura 21 – Representações gráficas das relações da Análise de Constelação.	76
Figura 22 – Roteiro Metodológico adotado na presente pesquisa.	82
Figura 23 – Constelação construída a partir das entrevistas.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Dados geométricos dos Diques em 2008.	52
Tabela 02 – Dados de volume do aterro dos Diques.	52
Tabela 03 – Dados de área dos reservatórios.	52
Tabela 04 – Dados de volume dos reservatórios.	52
Tabela 05 – Elementos citados nas entrevistas realizadas	83

1. INTRODUÇÃO

Na tarde do dia 05 de novembro de 2015, a barragem de disposição de rejeitos do Fundão, de propriedade da empresa mineradora SAMARCO, localizada no Complexo Minerário de Germano, município de Mariana, Estado de Minas Gerais, entrou em colapso, tendo sido despejado grande parte de seu conteúdo de cerca de 60 milhões de metros cúbicos (Lactec, 2017), constituído por rejeito arenoso e lama, nos riachos a jusante da referida barragem e em seguida no Rio Doce.

O desastre provocou a perda de 19 (dezenove) vidas humanas, a devastação do Distrito de Bento Rodrigues, a interrupção do fornecimento de água em 39 (trinta e nove) municípios nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e a destruição de bens e propriedades no seu caminho de mais de 650 km, até chegar ao Oceano Atlântico, vindo a tornar-se o maior desastre ambiental da história do nosso país (Fernandes *et al.*, 2016).

O evento trouxe também graves consequências para a zona costeira e mar territorial entre os estados do Espírito Santo e da Bahia, tendo afetado vários ecossistemas de reprodução de espécies de animais das faunas terrestre e flúvio-marinha, “estimando-se em décadas o tempo para a recuperação das bacias hidrográficas atingidas” (Lacaz *et al.*, 2016).

Objetivando a identificação das causas do colapso da referida estrutura, várias instituições públicas (Polícia Federal, Polícia Civil de Minas Gerais, Ministério Público de Minas Gerais, IBAMA, DNPM, UFMG, UFOP etc.), além de empresas de consultoria contratadas pela mineradora SAMARCO (Morgenstern *et al.*, 2016), procederam a estudos e/ou exames periciais no local do sinistro, bem como na documentação técnica disponível relativa à obra, tais como projetos, manuais de operação, cartas de risco, relatórios de monitoramento geotécnico e ambiental, relatórios de ensaios de campo e de laboratório.

Essas instituições, de forma praticamente unânime, chegaram à conclusão de que o rompimento da barragem teve como causa imediata a liquefação dos rejeitos granulares saturados depositados no seu reservatório (Sadrekarimi e Riveros, 2020), havendo divergências apenas no que diz respeito ao que teria deflagrado o processo, ou seja, qual teria sido o gatilho.

Segundo o laudo pericial emitido pelos Peritos da Polícia Federal em junho de 2016, “a deflagração do fenômeno de ruptura em fluxo por liquefação teria sido fruto de uma conjunção de fatores, tais como: elevação da superfície freática, em função da presença de lama junto ao dique de recuo; existência de camada de rejeitos constituídos de finos (lama), de baixa capacidade de suporte, subjacente aos alteamentos do dique de recuo; taxa de alteamento do dique de recuo

superior à recomendada na literatura sobre o assunto; e, finalmente, a ineficiência do sistema de drenagem interna da barragem. Tudo isso levou a um acréscimo de poropressões numa situação não drenada, o que acarretou a liquefação estática dos rejeitos granulares saturados” (Barbosa *et al.*, 2018).

Pouco mais de três anos após o rompimento da barragem do Fundão, o Brasil e o mundo foram novamente surpreendidos com novo evento catastrófico envolvendo o colapso de uma barragem para contenção de rejeitos de mineração, desta vez em Brumadinho/MG, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, que levou à perda de pelo menos 270 vidas humanas (CBMG, 2022), causando, a exemplo do caso de Mariana/MG, inúmeros prejuízos materiais, além de grande quantidade de danos socioambientais (Armstrong *et al.*, 2019), dentre eles a interrupção do abastecimento de água de cerca de 21 municípios do Estado de Minas Gerais, em função do comprometimento da qualidade dos recursos hídricos disponíveis.

A investigação das causas de ambos os eventos tem geralmente se restringido à identificação das causas de natureza técnica, relacionadas mais à Engenharia Geotécnica, à Geologia, à Hidrologia e à Sismologia, buscando descrever e analisar os fenômenos que culminaram com os colapsos de ambas as estruturas. Até o presente, nenhum estudo com bases científicas buscou identificar, de forma abrangente, a partir de uma visão multidisciplinar, os outros diversos tipos de causas que pudessem ter contribuído não só com a deflagração dos processos de ruptura, mas também com a magnitude dos impactos socioeconômicos e ambientais deles decorrentes.

Assim, com a utilização da ferramenta analítica denominada Análise de Constelação (AC), concebida para estudar situações complexas, como é o caso dos eventos supramencionados, a pesquisa realizada e relatada nesta dissertação veio preencher uma importante lacuna no rol de análises qualitativas até agora empreendidas acerca dos mesmos. Buscou-se, a partir da identificação de todos os elementos relevantes envolvidos com o problema (atores, elementos técnicos, elementos naturais e símbolos), e das relações existentes entre eles, rastrear as suas diversas causas técnicas e gerenciais, elegendo como objeto de estudo o caso da barragem do Fundão, cuja documentação de natureza técnica, incluindo laudos e relatórios produzidos no Brasil e no exterior, já é acessível ao público.

No presente trabalho buscou-se apresentar, num primeiro momento, com base em ampla pesquisa bibliográfica e documental, uma revisão acerca dos princípios gerais que regem o projeto, a construção e a operação de barragens para contenção de rejeitos de mineração, bem como as características gerais do projeto da Barragem de Rejeitos do Fundão, além do histórico

operacional do Sistema de Rejeitos do Fundão (SRF), nomenclatura utilizada para o conjunto formado pela barragem e estruturas auxiliares, que foi marcado, desde o seu início, em dezembro de 2008, por problemas técnicos e gerenciais que teriam contribuído, em maior ou menor medida, para o colapso da estrutura em novembro de 2015 (MPF, 2016).

Por fim, serão apresentados os resultados da aplicação da técnica AC na investigação das causas do rompimento da Barragem do Fundão, a partir de uma abordagem multidisciplinar, realizada com base nas diversas visões expressas por especialistas, profissionais que trabalharam no caso e atores envolvidos, obtidas através de entrevistas realizadas durante a pesquisa, em que o objeto de estudo foi abordado sob o ponto de vista qualitativo.

A escolha da técnica de análise AC deveu-se, principalmente, ao fato de a mesma ser capaz de conciliar diversas visões a respeito de um objeto de estudo complexo (Ohlhorst e Schön, 2015), com muitas variáveis envolvidas, como é o caso do rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração. Na bibliografia, não foram encontrados casos de aplicação da AC a esse tipo de evento, tratando-se, portanto, de uma aplicação inédita para compreender mais profundamente – com a utilização dessa ferramenta – o que levou à ocorrência do desastre.

Vale ressaltar que a técnica AC, desenvolvida por pesquisadores da Universidade Técnica de Berlim no início dos anos 2000 (Schön *et al.*, 2004), foi concebida justamente para estudar situações complexas, enquadrando-se o evento estudado nessa definição, e serviu, no presente caso, para identificar as interações e os tipos de relações existentes entre os diversos atores, elementos técnicos e naturais envolvidos na implantação e operação de obras de barragens de rejeitos de mineração, bem como entender, da melhor forma possível, a partir de uma visão multidisciplinar, a diversidade de percepções acerca da realidade.

As interações e relações identificadas foram consideradas de maneira integrada e assim levaram à identificação das causas fundamentais do evento catastrófico ocorrido em Fundão, muitas das quais presentes também em outros casos de colapso de barragens de rejeitos (Koppe, 2020), o que pode contribuir para a prevenção ou mitigação das consequências de desastres semelhantes.

A presente dissertação trata-se do primeiro trabalho tendo como objeto de estudo a investigação das causas do rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração, publicado no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da UFPB, conforme consulta realizada ao repositório da UFPB na internet, acessado através do endereço eletrônico <https://repositorio.ufpb.br>.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESES

2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo Geral:

Identificar, a partir da experiência do caso concreto do rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, em Mariana, Minas Gerais, as principais causas do desastre, bem como as interações e relações existentes entre os diversos atores, elementos técnicos e naturais envolvidos na implantação e operação de obras de barragens de rejeitos de mineração.

Objetivos Específicos:

Os objetivos específicos estabelecidos para a pesquisa realizada foram:

- 1) Avaliar a natureza das relações e o grau de integração existentes entre os diversos atores envolvidos no processo de licenciamento, planejamento, implantação e operação da barragem de rejeitos do Fundão e descrever o complexo encadeamento de fatos que levaram ao seu colapso.
- 2) Identificar a natureza do problema associado ao rompimento da estrutura de disposição de rejeitos em questão, bem como dos efeitos e consequências dele decorrentes, buscando estabelecer a sua conexão com suas causas técnicas e gerenciais.
- 3) Identificar as dificuldades a serem vencidas com vistas à mitigação e/ou solução do problema e seus impactos, considerando as esferas de atuação e responsabilidades de cada um dos atores envolvidos.

2.2 HIPÓTESES DA PESQUISA

Hipótese básica:

A aplicação do método Análise de Constelação possibilitará a identificação, a partir de uma abordagem multidisciplinar, das interações e dos tipos de relações existentes entre os diversos atores, elementos técnicos e naturais envolvidos na implantação e operação de obras de barragens de rejeitos de mineração, bem como o entendimento da diversidade de percepções acerca da realidade relativa a esse tipo de projeto e a geração de conhecimentos úteis para a gestão de estruturas dessa natureza.

Hipóteses secundárias:

- As interações e relações identificadas podem levar, quando consideradas de maneira integrada, à identificação das causas fundamentais de eventos catastróficos dessa natureza.
- A aplicação da técnica de Análise de Constelação deverá gerar resultados que devem contribuir para a prevenção ou mitigação de impactos derivados de eventuais eventos dessa natureza.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

O desafio de se realizar a disposição de rejeitos de forma segura

Anualmente, de acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos, são extraídas da crosta terrestre, no mundo inteiro, mais de dois bilhões de toneladas de minério de ferro, que tem como maiores produtores mundiais, conforme dados de 2019, os seguintes países: Austrália, Brasil, China, Índia, Rússia, África do Sul, Ucrânia, Canadá, Estados Unidos e Cazaquistão (USGS, 2020). De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (ANM, 2020), a produção bruta de minério de ferro no Brasil em 2019 foi de 510 milhões de toneladas, que corresponde a aproximadamente 400 milhões de toneladas do mineral beneficiado.

Com vistas à obtenção do bem mineral de valor comercial, no caso, o ferro, os minérios passam por um processo de beneficiamento, que gera uma quantidade também expressiva de rejeitos, que são de maneira geral depositados próximo às minas, sejam em cavas exauridas, em minas subterrâneas, em pilhas ou em barragens de contenção construídas especificamente para deposição desses resíduos (Neto, 2009).

A quantidade de rejeitos produzida depende do teor de ferro presente no minério extraído. Assim, quanto menor for esse teor, maior será a quantidade de rejeitos produzida. Com o desenvolvimento das tecnologias de beneficiamento e o esgotamento de áreas tradicionais de exploração, há uma tendência de extração de minérios com baixos teores de ferro, para os quais não se dava muita atenção há algumas décadas, cuja extração, no entanto, em face dos avanços tecnológicos, tornou-se técnica e economicamente viável. Isso traz como consequência uma maior produção de rejeitos.

Segundo dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (FEAM, 2018), no ano de 2017 foram produzidas somente naquele Estado 562 milhões de toneladas de rejeitos de mineração. Na Austrália, país que detém as maiores reservas de minério de ferro do mundo, estima-se que 632 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro são geradas a cada ano (USGS, 2018).

A deposição desses rejeitos na natureza implica em graves impactos sobre o meio ambiente, além daqueles já comumente associados à atividade minerária, e a adoção de medidas para que o armazenamento dos mesmos ocorra de forma segura e estável, com a redução do risco de desastres, constitui-se num importante desafio de natureza técnica, econômica e ambiental

com que se deparam as empresas mineradoras, assim como os órgãos ambientais e as agências responsáveis pela fiscalização da atividade minerária.

A relevância dessa questão é tão grande que, segundo Zuoan Wei *et al.* (2013), a legislação chinesa, em face do grande desenvolvimento experimentado pela mineração naquele país a partir do ano 2000, e do consequente aumento da quantidade de rejeitos produzidos, só permite que uma determinada mina entre em operação depois que as estruturas para disposição dos rejeitos a serem produzidos estejam devidamente implantadas e licenciadas.

A escolha do método de disposição de rejeitos é condicionada às características geológicas e topográficas da área na qual está localizada a atividade minerária, bem como do tipo de mineral que está sendo explorado e do poder de contaminação dos resíduos provenientes dos processos de beneficiamento.

Entretanto, dentre as formas de disposição de rejeitos, as barragens de contenção são as mais utilizadas em todo o mundo, uma vez que, além de possuírem grande capacidade de armazenamento, podem ser construídas com a utilização de solos, estéréis ou dos próprios rejeitos produzidos. Esse último tipo de material propicia uma redução substancial nos custos para sua implantação, e ainda garantem utilidade para boa parte dos rejeitos produzidos na mineração.

No Brasil, a maior parte dos rejeitos de mineração produzidos são armazenados em barragens de contenção (Fontes *et al.*, 2019), cujo número no país é hoje de 891 unidades, das quais 352 estão localizadas no Estado de Minas Gerais, conforme dados do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM, 2021). Somente para efeito de comparação, de acordo com Zuoan Wei *et al.* (2013), haviam sido construídas na China, até o ano de 2008, cerca de 12.000 barragens de rejeitos de mineração, quantidade imensamente superior à existente em todo o mundo no ano 2000, que era de 3.500 barragens, segundo Davies e Martin (2000).

É importante também ressaltar que, com a utilização dos próprios rejeitos como material de construção das barragens de contenção, não se faz necessário o emprego de material de áreas de empréstimo para a construção dos barramentos, o que, via de regra, impacta negativamente o meio ambiente, já que implica em desmatamento e escavações nas áreas das jazidas, além de requerer maiores custos com o transporte do material até o local da obra.

Como as barragens de contenção são alteadas à medida em que seus reservatórios são preenchidos com os rejeitos, é possível haver uma certa sincronia entre as quantidades de rejeitos produzidas nas usinas de beneficiamento e as quantidades empregadas na elevação dos

barramentos, reduzindo a necessidade de locais para armazenamento provisório, sendo oportuno ainda ressaltar que os custos de construção ficam dessa forma diluídos ao longo da vida útil da obra.

Dentre os métodos construtivos utilizados em barragens de rejeitos, destacam-se três métodos principais: o método de alteamento a montante, o método de alteamento a jusante e o método da linha de centro (Fig. 1). Os demais métodos são geralmente originados ou da conjugação desses três citados ou são variantes dos mesmos.

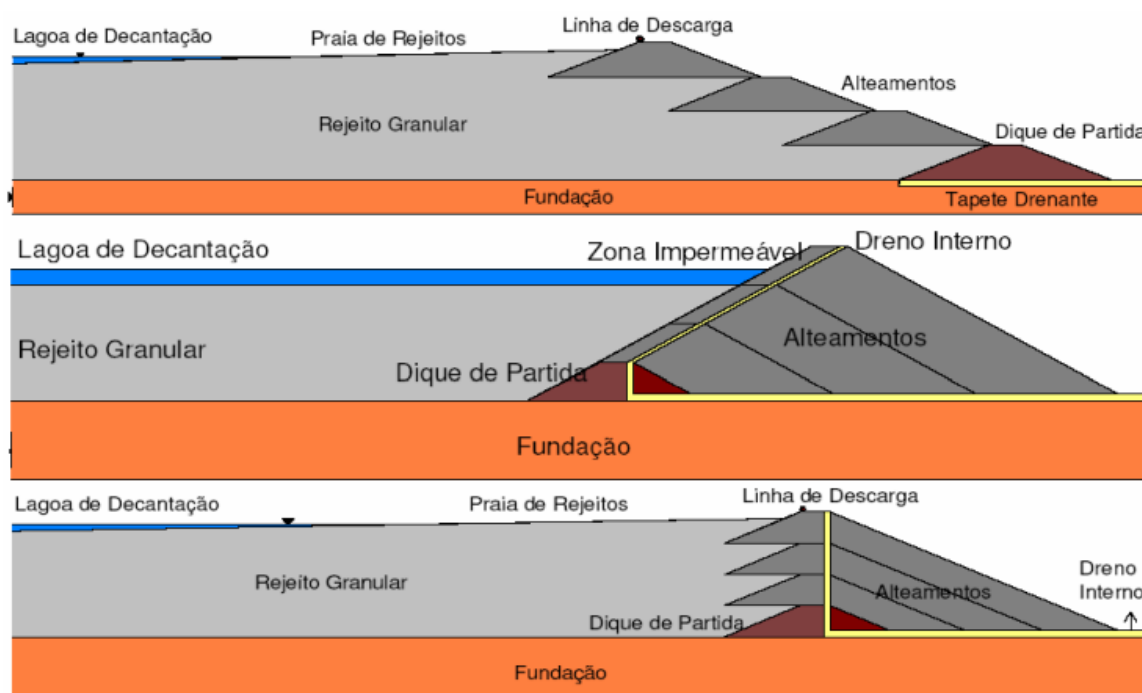


Figura 1 – Métodos de alteamento de barragens de rejeitos. A partir de cima: método a montante; método a jusante; e método de linha de centro. Fonte: Gomes (2009).

O método de alteamento a montante é o mais antigo e o mais utilizado em nível global, justamente por ser o de menor custo. Isso se deve ao fato de que os alteamentos são realizados com a utilização do próprio rejeito granular produzido (que possui características semelhantes às das areias), a partir de um dique inicial construído geralmente em material sílico-argiloso compactado, denominado dique de partida, tendo como terreno de fundação os próprios rejeitos já depositados, ou seja, os alteamentos são construídos sobre o reservatório da barragem, avançando para montante.

O método de alteamento a jusante é aquele no qual os sucessivos alteamentos são construídos geralmente com material de empréstimo, também a partir de um dique de partida, avançando para jusante, o que exige a ocupação de áreas a jusante da barragem, nem sempre

disponíveis. É dos três métodos citados o de maior custo, pois o volume de material necessário é cerca de três vezes aquele utilizado no método de alteamento a montante. Os alteamentos podem ser também executados com a utilização de rejeitos granulares compactados, o que reduz o custo de construção.

O método de linha de centro é um método intermediário entre os dois anteriores, inclusive em termos de custos de construção, no qual os alteamentos, que podem também ser executados com os próprios rejeitos, são dispostos sobre o eixo do barramento, com o qual permanecem sempre alinhados, avançando tanto para montante quanto para jusante.

A despeito de ter o menor custo de construção dos três métodos apresentados, o método de alteamento a montante é o que apresenta piores condições de segurança, seja pelo fato de os rejeitos depositados no reservatório, que servem de terreno de fundação para os alteamentos, não serem compactados, mas somente adensados, o que se dá mediante a drenagem da água presente em seu interior, seja pela dificuldade de se implantar um sistema de drenagem interna eficiente sob os rejeitos, capaz de evitar a saturação do material granular depositado na barragem, o que, sob determinadas circunstâncias, pode favorecer o aparecimento de surgências no barramento. Tais surgências podem evoluir para um processo erosivo interno com carreamento de material (*piping*) ou mesmo desencadear um processo de liquefação dos rejeitos e levar ao colapso da estrutura como um todo.

Ao apresentar os cinco principais casos de rompimento de barragens de rejeitos ocorridos na China no período de 1962 a 2008, que, além de danos significativos ao meio ambiente, provocaram a perda de muitas vidas humanas, Zuoan Wei *et al.* (2013) ressaltam que todas elas haviam sido construídas pelo método de alteamento a montante.

Em virtude das tragédias ocorridas no Brasil em novembro de 2015 (Córrego do Fundão, Mariana/MG) e em janeiro de 2019 (Córrego do Feijão, Brumadinho/MG), envolvendo barragens de rejeitos construídas pelo método de alteamento a montante, houve alterações na legislação e nas normas técnicas brasileiras relativas à segurança de barragens, as quais impuseram gradativas restrições à utilização do método, que posteriormente culminariam na sua proibição definitiva.

Nesse sentido, a Resolução nº 13 da Agência Nacional de Mineração (ANM), de 08 de agosto de 2019 (ANM, 2019), proibiu a utilização do método de alteamento a montante em todo o território nacional, proibição que foi recepcionada pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, com o acréscimo, através

da Lei nº 14.066/2020, do Artigo 2º-A, que proíbe a construção ou o alteamento de barragens de mineração pelo referido método (Brasil, 2020).

A deposição dos rejeitos no interior das barragens de contenção é realizada principalmente com a utilização da técnica do aterro hidráulico, na qual os rejeitos são conduzidos ao reservatório na forma de polpa, misturados com água, através de tubulações provenientes das usinas de beneficiamento, e depois lançados no reservatório, a partir da crista do barramento, através de canhões, *spraybars* ou de *spigots*. A água é então drenada e o material depositado, ao secar, adquire resistência, servindo de terreno de fundação para as camadas subsequentes.

Pode-se, dessa forma, dizer que o sistema de drenagem interna é o coração de uma barragem de rejeitos. O seu funcionamento de forma eficiente é condição indispensável para o controle do nível da superfície freática no interior do depósito, sem o qual se torna muito difícil garantir as condições de estabilidade da obra.

Ainda com relação à drenagem, é oportuno ressaltar a importância de se dispensar uma atenção especial à permeabilidade dos rejeitos, que influi na velocidade com que as poropressões são dissipadas no interior do depósito e depende diretamente do fenômeno da segregação hidráulica, através do qual são criadas zonas com permeabilidades diferentes no reservatório, fato que vem sendo chamado à atenção por especialistas há muitos anos (Mittal e Morgenstern, 1976 *apud* Silva, 2010).

No mecanismo clássico de segregação, os grãos de maior tamanho, e, portanto, mais pesados, tendem a se depositar mais próximos ao ponto de lançamento, enquanto os grãos menores, mais leves, tendem a se depositar a uma maior distância daquele ponto. Os grãos de tamanho médio, por sua vez, depositam-se a uma distância intermediária. Assim, no caso das barragens de rejeitos, em que os pontos de lançamento estão geralmente situados na crista do barramento, ter-se-ia, em tese, uma permeabilidade decrescente de jusante para montante dentro do reservatório.

Ocorre que os rejeitos gerados no beneficiamento do minério de ferro possuem características geotécnicas diferentes daquelas observadas nas areias, inclusive no que diz respeito à sua permeabilidade, uma vez que dependem do teor de ferro ainda presente nos mesmos. Por possuírem grande densidade, as partículas de ferro contidas nos rejeitos, que são geralmente bem finas, depositam-se próximo ao barramento, juntamente com os grãos maiores de quartzo, preenchendo os interstícios existentes entre os mesmos, o que cria uma zona de baixa

permeabilidade nas proximidades do barramento, prejudicando a drenagem da água lançada com os rejeitos, o que poderá provocar a elevação da superfície freática e comprometer a estabilidade da estrutura.

Deve ser também levado em consideração que os rejeitos de mineração, a exemplo dos solos sedimentares e dos solos compactados, são geralmente anisotrópicos, apresentando um coeficiente de permeabilidade maior na horizontal do que na vertical. De acordo com Souza Júnior (2003), a relação entre os coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical, para rejeitos de mineração, para depósitos constituídos por areias com granulometria uniforme, varia de 2 a 10. Para depósitos onde há mistura de areia e lama, essa razão de anisotropia pode atingir 100 ou mais.

Esse é um parâmetro de grande importância na modelagem do fluxo da água através das barragens de rejeitos, com vistas ao controle eficaz do nível da superfície freática no interior do depósito, impedindo a sua aproximação do barramento.

Planejamento e Projeto de Barragens de Rejeitos

As barragens de rejeitos devem ser projetadas para conter, de forma segura, água e rejeitos em um ambiente dinâmico, não apenas durante a vida operacional da mina, mas também por muitos anos depois que o fechamento da mina tenha ocorrido. Há uma ampla variação nos horizontes de projeto atualmente aceitáveis, os quais variam de 1000 a 2000 anos, sendo o período de 1000 anos considerado razoável, de acordo com as Diretrizes Australianas (ANCOLD, 2012).

No projeto de barragens de contenção de resíduos de mineração, algumas premissas básicas devem ser respeitadas. A primeira é a adoção do conceito de empilhamento drenado, em que a existência de um sistema de drenagem interna eficaz é essencial para manter o controle do nível da água no reservatório e evitar a saturação dos rejeitos.

A segunda é a deposição separada de rejeitos granulares (arenosos) e rejeitos finos (lamas), em virtude das suas condutividades hidráulicas bastante diferentes. Os rejeitos granulares apresentam boa drenabilidade, enquanto as lamas possuem baixa permeabilidade. A mistura de ambos produz um material de péssima qualidade de drenagem, uma vez que as partículas finas preenchem os espaços vazios existentes entre os grãos do material arenoso, impedindo a percolação da água.

A terceira premissa é a manutenção de uma praia de rejeitos a montante do barramento e ao longo de todo o seu comprimento, com largura suficiente para manter a superfície freática longe do mesmo, como prevenção contra o aparecimento de surgências no talude de jusante, bem como para evitar que os materiais finos em suspensão no lago venham a se depositar próximo ao barramento, contaminando os rejeitos granulares e comprometendo o bom funcionamento do sistema de drenagem interna da barragem, além de criar uma camada de baixa capacidade de suporte na região que servirá como terreno de fundação para futuros alteamentos.

A quarta premissa diz respeito à velocidade de execução dos sucessivos alteamentos da barragem, que deve ser tal que permita a dissipação do excesso de poropressão originado com o incremento de carga sobre a superfície do reservatório. A inobservância dessa premissa pode redundar numa condição não drenada, essencial à ocorrência de liquefação dos rejeitos granulares de baixa compacidade e elevado grau de saturação.

Faz-se necessário considerar também, na fase de planejamento, a existência de alguns riscos potenciais que exercem grande influência na estabilidade de barragens de rejeitos, dentre os quais citamos os principais (Vanden Bergue *et al.*, 2011):

- As barragens de rejeitos são construídas de forma lenta, à medida em que seus reservatórios vão sendo preenchidos. Assim, o seu comportamento ante o crescente incremento de carga é de certa forma desconhecido, sendo apenas estimado através das modelagens.
- Durante o período de construção, geralmente longo, é possível que se percam os conhecimentos e as experiências adquiridos pelos profissionais envolvidos com a execução da obra, assim como a documentação técnica relativa aos seus estágios iniciais.
- Há uma tendência de haver um relaxamento, durante a fase de operação das barragens de rejeitos, com relação à consideração dos riscos geotécnicos presentes, que, em face do dinamismo da atividade minerária, tendem a ser minimizados.
- Diferentemente dos solos naturais, os rejeitos de mineração, em virtude da grande variabilidade de suas características físico-químicas, mineralógicas e geotécnicas, podem não se comportar como previsto nas modelagens realizadas na fase de projeto.
- Em face da própria natureza do processo hidromecânico de deposição dos rejeitos nas barragens, a superfície freática tende a apresentar sempre um nível elevado no interior do

reservatório, situação que pode se agravar com o tempo, em função da perda de eficiência dos sistemas de drenagem interna.

- Apesar de as barragens de rejeitos possuírem geralmente muitos instrumentos de monitoramento instalados, é comum esses sistemas de monitoramento apresentarem, como um todo, baixo nível de eficiência, uma vez que são muitas vezes incapazes de dar respostas rápidas ante a ocorrência de eventos que representam risco à estabilidade da estrutura.
- Finalmente, as barragens de rejeitos são estruturas que apresentam grande vulnerabilidade à ocorrência de eventos extremos, tais como sismos e precipitações pluviométricas de grande intensidade.

A Importância do Balanço Hídrico

Uma importante tarefa relacionada ao projeto de uma barragem de rejeitos é o desenvolvimento de um modelo do balanço hídrico para o reservatório, que ajudará a entender os meios pelos quais a água pode afetar o projeto e as subseqüentes limitações e riscos operacionais decorrentes de sua presença e comportamento.

A água utilizada no transporte de rejeitos corresponde a uma significativa porção do uso total da água na área da mina como um todo. Grande parte dessa água será retida no armazenamento de rejeitos, presa nos poros do material. Uma parte retornará ao processo de beneficiamento ou será despejada nos córregos a jusante, se as condições ambientais permitirem. Alguma água será perdida através da evaporação e/ou infiltração, particularmente das áreas de lago. Os aportes de água provenientes do ambiente natural para dentro da área de disposição de rejeitos podem incluir a contribuição de córregos, fluxo de água subterrânea e chuvas.

O total das entradas de água para a barragem de rejeitos será compensado pela recuperação de parte dessa água para reutilização no processo de beneficiamento, pela disposição no meio-ambiente a jusante ou pelas perdas ocorridas na área. O balanço hídrico determinará as características do desempenho do sistema de disposição de rejeitos, incluindo fluxos e perdas, tais como as infiltrações, que necessitariam ser controladas durante sua operação e abandono final. Qualquer desequilíbrio pode conduzir a mudanças progressivas no volume armazenado no lago.

A modelagem do balanço hídrico pode também necessitar levar em consideração as variações nas propriedades dos rejeitos, quantidades e níveis com o tempo, bem como o

cronograma proposto para os alteamentos da barragem. Isso se deve ao fato de que alguns anos na vida de uma mina são mais susceptíveis a eventos extremos de chuva do que outros. As consequências dessas ocorrências são melhor analisadas utilizando-se um modelo de balanço hídrico adequadamente construído e devidamente calibrado.

Lições Aprendidas com Falhas e Incidentes com Barragens de Rejeitos

A indústria da mineração tem aprendido com muitas falhas e incidentes com estruturas de armazenamento de rejeitos nas últimas décadas, que estão contribuindo com o desenvolvimento de práticas mais seguras no gerenciamento desses resíduos. Nesse sentido, o Boletim 121 da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2001) apresenta um relatório abrangente a respeito de algumas dessas lições, a partir de uma série de falhas e incidentes com estruturas de armazenamento de rejeitos ao redor do mundo, denominadas pela sigla em inglês TSF (*Tailings Storage Facilities*), que incluem a barragem de rejeitos propriamente dita e a infraestrutura associada (tubulações, galerias, acessos, barragens auxiliares etc.). As principais causas das falhas e incidentes identificados foram:

- Falta de controle do balanço hídrico;
- Falta de controle da construção;
- Falta geral de compreensão acerca dos aspectos que controlam a segurança das operações;
- Falta de responsabilidade e domínio por parte dos operadores.

As falhas dos barramentos de contenção de rejeitos, ainda segundo o relatório do ICOLD, foram causadas por:

- Fraco controle da água, levando, por exemplo, a falha por galgamento;
- Instabilidade do talude;
- Carregamento sísmico;
- Fundações inadequadas;
- Infiltrações.

Os incidentes e falhas aparecem historicamente como sendo mais comuns nos casos em que foi utilizado o método de construção a montante, em comparação com a construção pelos métodos da linha de centro e de jusante. Isso poderia ser devido às práticas inadequadas de projeto e construção adotadas no passado, devendo-se supor que os métodos modernos de projeto deveriam ter melhorado esse desequilíbrio. Barramentos para contenção de rejeitos construídos pelo método a jusante aparecem como tendo desempenho similar aos barramentos para retenção

de água, principalmente em virtude da utilização de solos compactados na sua construção, o que os torna mais seguros (Zongjie *et al.*, 2019).

O Boletim 121 do ICOLD também concluiu que o planejamento e gerenciamento exitoso de uma TSF poderia se beneficiar grandemente de:

- Envolvimento dos interessados (*stakeholders*);
- Compreensão dos riscos e compromisso com uma gestão de alto nível;
- Investigações e avaliações de risco meticolosas;
- Documentação abrangente;
- Gerenciamento de rejeitos integrado ao planejamento, operações e fechamento da mina.

No Brasil, ocorreram, no período de 1985 a 2015, que perfaz um intervalo de trinta anos, dez casos de incidentes envolvendo barragens de rejeitos (Fig. 2), o que representa, em média, um caso a cada três anos, frequência que foi mantida, uma vez que, no início do ano de 2019, pouco mais de três anos após o desastre de Fundão, ocorreu o rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG.

Nos casos dos rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho, os impactos sobre o meio ambiente assumiram tal magnitude, que ambos os eventos foram classificados como desastres, pois afetaram, direta e cumulativamente, em proporções catastróficas e, em alguns casos, de forma permanente e irreversível: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais (Carmo *et al.*, 2017).

O rompimento da Barragem do Fundão teve como consequências principais os seguintes impactos socioambientais:

1. Perda de 19 vidas humanas;
2. Despejou cerca de 35 milhões de metros cúbicos de rejeitos nos rios a jusante;
3. Atingiu 663 km de rios e córregos e chegou ao Oceano Atlântico;
4. Destruiu 1.500 hectares de vegetação, incluindo matas ciliares;
5. Destruiu 207 casas de um total de 251 existentes no Distrito de Bento Rodrigues;
6. Deixou 600 famílias desabrigadas;
7. Assoreamento de grandes trechos de rios;

8. Pavimentação de grandes áreas devido ao endurecimento da lama;
9. Destruição da fauna (terrestre e aquática) ao longo dos rios;
10. Prejudicou a atividade pesqueira no Rio Doce;
11. Prejudicou a atividade agrícola às margens dos rios;
12. Prejudicou o fornecimento de água para 39 municípios nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo;
13. Interrompeu a operação da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga) em Minas Gerais, a qual somente retomou as suas operações em 2020.

Ano	Barragem/Local	Principais Danos	Referência
1985	Pico São Luiz, Minas Gerais	Lama fluíu até 10 km a jusante. Destruição de Pontes e estrada de ferro	Soares (2010)
1986	Fernandinho, Minas Gerais	4 vítimas. Destruição de laboratórios e equipamentos	Soares (2010)
1999	Mata Virgem, Minas Gerais	Lama fluíu até 4 km a jusante. Destruição de pontes e estrada de ferro	Maia Neto (2006)
2001	Rio Verde, Minas Gerais	5 vítimas. Lama fluíu até 8 km a jusante.	WISE (2002)
2003	Indústria de papel, Cataguases, Minas Gerais	1,4 bilhão de litros de lixívia negra liberada, que fluíram por 200 km ao longo de rios e córregos. Interrupção de fornecimento de água.	Faria (2015)
2006	Rio Pomba, Minas Gerais	Acidente sem ruptura. Vazamento de rejeitos de bauxita. Interrupção de fornecimento de água.	Avila (2016) e Faria (2015)
2007	Rio Pomba, Minas Gerais	Ruptura com liberação de 2 milhões de litros de rejeitos de bauxita. Interrupção de fornecimento de água.	Avila (2016) e Faria (2015)
2009	Cataguases, Minas Gerais	Acidente sem ruptura. Liberação de milhões de litros de resíduo sem tratamento de forma controlada no corpo d'água.	Vianna (2012) e Faria (2015)
2014	Herculano, Minas Gerais	3 mortes.	Avila (2016)
2015	Fundão, Minas Gerais	19 mortes. Lama fluíu até 663 km. Interrupção de fornecimento de água.	WISE (2016)

Figura 2 – Incidentes envolvendo barragens de rejeitos ocorridos no Brasil no período de 1985 a 2015. Fonte: IBRAOP, 2018.

Sustentabilidade no Armazenamento de Rejeitos

É inegável a importância da mineração para a economia mundial e para o desenvolvimento tecnológico. Muitos dos elementos atualmente utilizados em aplicações industriais, desenvolvimento de tecnologia e geração de energia são produzidos com matérias primas oriundas da mineração. Entretanto, as atividades inerentes à mineração produzem marcas profundas no meio ambiente, em virtude das mudanças que provocam na paisagem, com a

supressão da vegetação, mobilização de grandes quantidades de rochas e solos, alta demanda de água e energia, além da produção de efluentes e rejeitos (Hatje *et al.*, 2017).

Historicamente, a mineração pode ser considerada uma das principais atividades antropogênicas que contribuem para aumentar a poluição de bacias hidrográficas ao redor do mundo, que pode conduzir a sérias implicações para a saúde humana e para a biodiversidade, como também levar, no longo prazo, ao comprometimento da navegabilidade dos rios, em face do aumento do aporte de sedimentos.

Rejeitos ou águas contaminadas associadas são potencialmente causadores dos mais significativos impactos ambientais da atividade minerária (que inclui a lavra e o processamento dos minérios), não apenas durante a fase de operação, mas também muito depois do fechamento da mina ou da usina de beneficiamento.

Nos últimos trinta anos, no entanto, tem havido uma substancial melhoria na compreensão acerca dos requisitos e dos métodos de projeto, a fim de permitir a implantação, de forma sustentável, de estruturas seguras destinadas ao armazenamento de rejeitos. Esse conhecimento deve agora ser estendido para cobrir a segurança dos depósitos no longo prazo, bem depois do encerramento da operação da mineração, conferindo ao conceito de gestão um valor mais duradouro.

A viabilidade de uma barragem para armazenamento de rejeitos precisa ser devidamente investigada, levando em consideração os custos potenciais do fechamento, bem como da manutenção de longo prazo após o encerramento das atividades. Haverá uma série de possibilidades alternativas com relação à destinação final dos rejeitos, algumas das quais podem oferecer benefícios substanciais relativos à estabilidade a longo prazo e ao risco ambiental. As possibilidades poderiam incluir:

- Preenchimento de cavas exauridas de minas;
- Uso alternativo dos rejeitos (como, por exemplo, como material de construção);
- Reprocessamento para remoção de componentes problemáticos;
- Disposição em lagos ou em alto mar, obviamente em localização não sensível.

Peculiaridades das Barragens de Disposição de Rejeitos

Barragens de rejeitos possuem muitas similaridades com as barragens convencionais para retenção de água. No entanto, há diferenças importantes que precisam ser levadas em consideração e que requerem, portanto, um tratamento diferenciado na fase de planejamento para

sua implantação. A seguir, são apresentados alguns dos principais aspectos particulares que as distinguem das barragens para armazenamento de água:

- Os seus reservatórios devem armazenar sólidos, geralmente depositados na forma de polpa, fazendo-se necessário o controle da água livre;
- Tanto os sólidos como a água armazenados nas barragens de rejeitos podem conter contaminantes que têm o potencial para causar danos ambientais, caso não sejam contidos de forma segura no presente e no futuro;
- Sua vida operacional pode ser relativamente curta, mas elas são potencialmente demandadas a armazenar os rejeitos, de forma segura, por períodos extremamente longos, possivelmente “para sempre”;
- Elas são frequentemente construídas em etapas, ao longo de vários anos;
- A construção, e particularmente qualquer alteamento subsequente, pode, algumas vezes, ser empreendida pelo próprio pessoal da mina, que nem sempre detém conhecimentos específicos de engenharia civil aplicados à construção de barragens de rejeitos;
- As características dos materiais, tanto aqueles utilizados na construção do barramento quanto os próprios rejeitos, costumam variar durante a vida útil da mina;
- O gerenciamento da água é um ponto crucial, particularmente se materiais prejudiciais são armazenados na barragem;
- Infiltração e poeira podem ter um maior impacto sobre o meio ambiente;
- Operações diárias, tais como a deposição dos rejeitos e a recuperação da água podem ser críticas para:
 - A segurança do reservatório;
 - A taxa de enchimento, a altura final e até a configuração geral do armazenamento podem mudar de maneiras imprevisíveis durante a construção e operação;
 - O armazenamento deve ser projetado tendo em mente o fechamento da mina, de modo a criar um depósito livre de manutenção no futuro, que não represente qualquer impacto ou risco ambiental inaceitável de longo prazo.

Gerenciamento de Riscos

Grandes falhas em barragens de rejeitos podem ser relativamente pouco frequentes, quando se considera a grande quantidade delas existentes ao redor do mundo, mas a taxa de falhas não tem sido reduzida ao longo dos anos, com até 1 a 2 grandes falhas de barragens de rejeitos

por ano no mundo (Owen *et al.*, 2020). Os prejuízos em decorrência dessas falhas são muito significativos. Grandes falhas têm levado a perdas de vidas, danos ambientais catastróficos, prejuízos sociais, intervenção regulatória restritiva e perdas financeiras associadas e elevados custos para as companhias responsáveis.

Há significativos benefícios financeiros, bem como relativos à reputação da atividade e à sustentabilidade, associados à adoção de melhores práticas no gerenciamento de rejeitos, que efetivamente reduzem os riscos potenciais associados às barragens de contenção durante e depois de suas vidas de operação.

Independentemente do nível de detalhamento e da qualidade do projeto, falhas podem ocorrer se algum elemento da estrutura de armazenamento de rejeitos (como, por exemplo, drenos, filtros, galerias etc.) e/ou o sistema como um todo, não são projetados, construídos e operados de acordo com o objetivo primário de controlar e gerenciar os riscos.

As melhores práticas de gerenciamento de rejeitos reconhecem as potenciais limitações e incertezas do projeto, pela aplicação de uma abordagem de gestão baseada no risco através da vida da estrutura – desde a sua concepção, passando pela elaboração do projeto, construção, operação e fechamento.

Vários recentes e catastróficos desastres envolvendo barragens de rejeitos, dentre eles o de Fundão, trazem à tona a complexa interação entre a mina e seu contexto operacional, bem como o fato de que a ausência de informações públicas, oportunas e confiáveis tem sido uma constante no gerenciamento de barragens de rejeitos (Owen *et al.*, 2020).

Outra questão que também emerge desses desastres é a tentativa, por parte das empresas proprietárias das barragens, de atribuí-los somente a causas naturais, tais como terremotos e excesso de precipitação pluviométrica, deixando de assumir responsabilidades decorrentes de atos de gestão técnico-administrativa equivocados, que teriam contribuído para a sua ocorrência (Oliveira Lopes e Heller, 2020)

Há que se registrar, nesse sentido, o posicionamento defendido por algumas entidades, como, por exemplo, a Rede de Estudos Sociais em Prevenção de Desastres na América Latina – LA RED, segundo as quais os desastres não são naturais, havendo sempre algum tipo de intervenção antrópica que contribui para sua ocorrência, cuja análise deve considerar a relação intrínseca existente entre risco, desenvolvimento e meio ambiente e não se limitar apenas às abordagens das ciências naturais e engenharias, dado o forte componente social associado a esses eventos, que precisa ser devidamente levado em consideração (La Red, 2015).

Avaliação de Riscos

A avaliação de riscos é o processo geral de identificação, análise e avaliação dos riscos, que é utilizada sob formas variadas para avaliar projetos específicos de destinação de rejeitos, bem como os riscos operacionais, sejam eles individuais ou combinados (ANCOLD, 2012).

O tipo de avaliação escolhido depende da complexidade do risco identificado, da criticidade do elemento sob consideração (relacionado à segurança, saúde, meio ambiente, continuidade do negócio), da consequência potencial da falha, e da quantidade e da qualidade dos dados disponíveis.

A avaliação de risco de uma barragem de rejeitos deve identificar claramente as principais fontes de falhas potenciais, seja de elementos individualmente ou em combinação, caso este onde um número de questões individuais se combina para resultar em uma falha.

A avaliação quantitativa de riscos é frequentemente utilizada por projetistas de barragens classificadas como de alta e de extrema consequência para quantificar e avaliar a tolerabilidade dos riscos de elementos específicos ou de aspectos de uma barragem de rejeitos, tais como, por exemplo, a capacidade de descarga do vertedouro.

Avaliações qualitativas ou semiquantitativas são frequentemente usadas para classificar e priorizar controles de risco e planos de ação de risco, ou para demonstrar o risco associado a uma combinação de eventos, como, por exemplo, uma árvore de eventos de falha.

Caracterização e Comportamento dos Rejeitos

É impossível projetar, construir, operar ou fechar, de forma adequada, uma barragem de rejeitos sem o adequado conhecimento e compreensão das propriedades dos rejeitos. Assim, o projeto de uma barragem de rejeitos deve incluir ensaios em amostras representativas dos rejeitos e incluir ensaios de campo quando possível. Em geral, os ensaios devem incluir:

- Características físicas dos rejeitos (tanto na forma de polpa quanto como de sólidos), incluindo a sua propensão à segregação das suas partículas constituintes;
- Características geotécnicas, tais como densidade aparente, densidade seca, peso específico, parâmetros de resistência ao cisalhamento, características de consolidação e permeabilidade;
- Química do líquido do processo;

- Mineralogia/Geoquímica (incluindo a avaliação da qualidade da água descartada e o seu potencial impacto sobre o meio ambiente receptor);
- Propriedades reológicas.

Rejeitos típicos podem incluir partículas com granulometria de areia, silte e argila. Como um resultado das tecnologias de processamento baseadas na utilização de água, os rejeitos são tipicamente produzidos na forma de polpa.

Assim, os ensaios em rejeitos podem reconhecer que:

- O comportamento de alguns rejeitos e resultados de ensaios serão influenciados pelos processos aplicados à polpa antes da descarga, tais como floculação, espessamento e bombeamento;
- O comportamento de alguns rejeitos e resultados de ensaios serão influenciados por processos que ocorrem após a sua deposição, tais como a segregação;
- Os rejeitos depositados da forma subaquática, particularmente em água profunda, são susceptíveis à segregação. A segregação também ocorre tipicamente em polpas de rejeitos com baixa concentração de sólidos depositados de forma subaérea.

A química da água presente na polpa, em particular o pH e a salinidade, podem impactar significativamente o comportamento dos rejeitos na secagem e molhamento.

As características (incluindo densidade, resistência e compressibilidade) dos vários componentes após a segregação não serão as mesmas que aquelas presentes nos rejeitos na saída do beneficiamento. Portanto, é necessário considerar se a segregação ocorrerá e, caso positivo, as propriedades dos componentes segregados.

Capacidade para Armazenamento de Rejeitos

Barragens de rejeitos têm, de certa forma, capacidade de armazenamento e requisitos para o gerenciamento da água diferentes das barragens normais para armazenamento de água, uma vez que medidas necessitam ser adotadas para a segurança da barragem e segurança ambiental em uma situação operacional na qual a capacidade de armazenamento da água remanescente está continuamente sendo reduzida pela fase sólida dos rejeitos depositados e a qualidade da água pode ser inadequada para lançamento no meio ambiente.

Os requisitos para a segurança da barragem determinarão o projeto do vertedouro para evitar a falha geral do barramento, enquanto as questões ambientais determinarão o

armazenamento requerido a ser disponibilizado para reduzir o risco de extravasamento da barragem.

O objetivo de uma barragem de rejeitos é primariamente armazenar sólidos, mas isso é frequentemente complicado pela construção em etapas, bem como pela incerteza sobre como a densidade seca dos rejeitos será atingida na barragem. Portanto, suposições adequadamente conservadoras necessitam ser feitas considerando o volume de armazenamento requerido para qualquer período de projeto da vida de uma barragem de rejeitos.

Além do mais, o tempo de construção do estágio seguinte do sistema de armazenamento, seja uma nova barragem ou um alteamento de uma barragem existente, necessita ser cuidadosamente considerado, para se ter a certeza de que a produção não será comprometida pela falta de local de armazenamento disponível. Em muitas áreas, haverá estações mais apropriadas para a execução dos trabalhos de terra necessários à construção, o que deverá ser levado em conta no planejamento. Em climas úmidos, por exemplo, a estação de construção pode estar limitada a cerca de seis meses por ano.

Onde a qualidade da água no interior do reservatório é inadequada para lançamento sob condições normais, o armazenamento de água de chuva e de cheias extremas, bem como medidas apropriadas para armazenamento de contingência são tomadas para garantir que o risco de extravasamento seja reduzido a um nível aceitável.

É imperativo que o nível máximo operacional seja identificado para cada barragem individualmente. Se a água naquela barragem atinge o nível máximo operacional, a deposição de rejeitos (e todos os processos com a utilização de água) dentro da barragem deve cessar, e as ações relevantes do Plano de Emergência de Segurança de Barragens devem ser iniciadas.

O requisito da cheia de projeto para o dimensionamento do vertedouro pode, de preferência, ser determinado pelos métodos de avaliação de risco e ser orientado, por exemplo, pelas Diretrizes sobre Cheias de Projeto para Barragens (ANCOLD, 2000), utilizada em muitos países. Vale ressaltar que um vertedouro deve ser sempre implantado, mesmo onde os requisitos para projetos sem previsão de extravasamento estejam em vigor, a fim de proteger contra galgamento, no caso de eventos extremos ou inesperados, que poderiam levar à falha do aterro da barragem.

3.2 LEGISLAÇÃO E NORMAS APLICÁVEIS A BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Leis e regulamentos aplicáveis no Brasil

Considerando que, em virtude dos dez casos de falhas envolvendo barragens de rejeitos ocorridos no período de 1985 a 2015 no Brasil (IBRAOP, 2018), tem-se observado, em nosso país, uma evolução na legislação, normas técnicas e regulamentos, no sentido de garantir que a implantação e operação dessas estruturas de disposição sejam realizadas de forma segura, o que ganhou maior impulso após o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana/MG, e diante da necessidade de se conhecer os aspectos mais importantes que têm sido aperfeiçoados nesse campo, são apresentados a seguir os principais instrumentos legais e normativos emitidos em nosso país relacionados à segurança de barragens de rejeitos, inclusive alguns oriundos do Estado de Minas Gerais, que possui um considerável número de normativos voltados à Mineração, em face da intensa atividade minerária ali existente, principalmente aquela destinada à extração e beneficiamento de minério de ferro.

Lei Federal nº 12.334/2010

Em 20/09/2010 foi promulgada a Lei Federal nº 12.334, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (Brasil, 2010).

Nesse contexto, além de trazer novos critérios para a classificação de barragens (por risco e por dano potencial associado), a referida lei apresentou em seu Art. 8º o conteúdo mínimo do Plano de Segurança de Barragem (PSB), um dos instrumentos da PNSB. Dentre as informações que compõem o PSB, destacam-se os Planos de Ação de Emergência (PAE), quando exigido, os relatórios das inspeções de segurança e as revisões periódicas de segurança.

No caso específico das inspeções de segurança regular, cabe destacar que as mesmas seriam elaboradas pela própria equipe de segurança da barragem, devendo o relatório resultante estar disponível ao órgão fiscalizador e à sociedade civil (Art. 9º, parágrafo 1º). Quanto à Revisão Periódica de Segurança de Barragem, seu objetivo é de verificar o estado geral de segurança da barragem, considerando o atual estado da arte para os critérios de projeto, com a atualização dos dados hidrológicos e das alterações nas condições a montante e a jusante da barragem. A definição da periodicidade, qualificação da equipe técnica responsável, conteúdo

mínimo e nível de detalhamento desses documentos ficou sob responsabilidade de cada órgão fiscalizador, em função da categoria de risco e do dano potencial associado.

Portaria DNPM nº 416/2012

No caso das barragens de mineração, o órgão fiscalizador responsável era, à época da criação do PNSB, o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Dessa forma, a Portaria DNPM nº 416, de 03/09/2012 (DNPM, 2012), criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, dispondo ainda sobre o Plano de Segurança, a Revisão Periódica de Segurança e as Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração, conforme a Lei nº 12.334 de 20/09/2010. Segundo essa Portaria, as barragens de mineração foram classificadas de acordo com quadro constante no seu Anexo I, por meio do qual, uma barragem com as características da Barragem do Fundão, por exemplo, seria classificada como sendo do tipo C, ou seja, com Alto Dano Potencial Associado (DPA), mas com Baixa Categoria de Risco.

Dentre os elementos que compõem o Plano de Segurança da Barragem é relacionado o volume IV – Revisão Periódica de Segurança da Barragem. Segundo o Art. 14, o produto final dessa avaliação é um relatório de Revisão Periódica de Segurança da Barragem, cujo conteúdo mínimo é detalhado no Anexo II da Portaria, destacando-se a observação: *“A reavaliação do projeto existente deve englobar [...]: Avaliação da estabilidade e adequação estrutural, resistência à percolação e erosão de todas as partes dos barramentos, incluindo-se suas fundações, bem como quaisquer barreiras naturais sob condições de carregamentos, naturais e extremos”*.

A periodicidade máxima da Revisão Periódica de Segurança de Barragem é definida no Art. 16 em função da classificação quanto ao Risco e ao Dano Potencial Associado. Para barragens classe C, a periodicidade era a cada 7 anos. Para barragens implantadas antes de 20 de setembro de 2012, que é o caso da Barragem do Fundão, a primeira Revisão Periódica de Segurança de Barragens deveria ser elaborada de acordo com os prazos estabelecidos no Art. 16. Destaca-se ainda que, sempre que ocorrerem modificações estruturais, como alteamentos ou alteração da geometria do barramento, por exemplo, o empreendedor ficará obrigado a executar nova Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

Segundo o Art. 18 da Portaria, no caso da Inspeção de Segurança Regular de rotina da barragem, as mesmas devem ser realizadas quinzenalmente ou em menor período, tendo que ser preenchida pela empresa uma Ficha de Inspeção Regular, cujos dados serão incluídos no SNISB.

Segundo o Art. 19, deve ser realizada anualmente a Inspeção Anual de Segurança Regular de Barragem, para elaboração do Relatório de Inspeção Regular de Barragem, com emissão de uma Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) de Barragem correspondente até a data de 20 de setembro de cada ano. Segundo o Art. 36, para barragens existentes, fica estabelecido o prazo de 20/09/2013 para elaboração da primeira Inspeção Anual de Segurança Regular de Barragem, mas o prazo da Declaração de Condição de Estabilidade da barragem ficou definido como 31/03/2013 (Art.36, Inc. VI – retificação DOU 18/12/2012).

Dentre os aspectos listados como conteúdo mínimo do Relatório de Inspeção de Segurança Regular de Barragem, segundo o Art. 22, destaca-se a avaliação e classificação quanto ao estado de conservação, anomalias encontradas e registradas, a identificação de possíveis maus funcionamentos, indícios de deterioração ou defeitos de construção existentes, avaliação do resultado da inspeção e a revisão dos registros de instrumentação disponíveis. Não foi previsto no conteúdo mínimo, portanto, a avaliação de estabilidade e adequação estrutural, tal como constante no escopo mínimo da Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

Portaria DNPM nº 526/2013

A Portaria DNPM nº 526 de 09/12/2013 (DNPM, 2013) estabeleceu as determinações quanto à periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento relacionados ao Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM).

Portaria DNPM nº 70.389/2017

Nesse mesmo contexto, a Portaria DNPM nº 70.389, de 17/05/2017, estabeleceu a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (DNPM, 2017). Dessa forma, assim como anteriormente estabelecido pela Portaria DNPM nº 416, de 03/09/2012, dentre os elementos que compõem o Plano de Segurança da Barragem foi relacionado o volume IV – Revisão Periódica de Segurança da Barragem (RPSB).

A periodicidade máxima da Revisão Periódica de Segurança de Barragem é definida no Art. 15 em função do Dano Potencial Associado (DPA). Para barragens com DPA alto, a periodicidade máxima é a cada 3 anos. O prazo para realização da primeira Revisão

Periódica de Segurança de Barragens, relativo às estruturas que estejam submetidas à PNSB, é, para barragens de dano potencial alto, de 12 meses (prazo retificado no DOU de 10/11/2017), contados a partir da vigência da Portaria (Art. 50), ou seja, o prazo para elaboração da RPSB objeto da Portaria era até o dia 17/06/2018. Ressalta-se que, sempre que ocorrerem modificações estruturais, tais como alteamentos, o empreendedor ficará obrigado a executar e concluir nova RPSB. Seu conteúdo mínimo é detalhado em seu Anexo II, e engloba, dentre outros aspectos, a reavaliação dos projetos existentes, de acordo com os critérios de projeto aplicáveis à época da revisão. Ao ser concluída a RPSB, deve ser emitida uma Declaração de Condição de Estabilidade – DCE, que será anexada ao PSB.

Quanto às Inspeções de Segurança Regular de Barragem, o empreendedor deve preencher quinzenalmente as Fichas de Inspeção Regular (por meio de integrantes do seu quadro de pessoal ou por intermédio de equipe externa contratada para essa finalidade), sendo que também deve elaborar, semestralmente, o Relatório de Inspeção de Segurança Regular (RISR) e a DCE correspondente, a qual deve ser enviada para o DNPM via sistema informatizado, entre 1º e 31 de março, e entre 1º e 30 de setembro. Segundo o Art. 16, os documentos com entrega prevista para o segundo semestre de cada ano devem ser elaborados obrigatoriamente por equipe externa contratada, enquanto os documentos previstos para o primeiro semestre podem ser alternativamente elaborados por equipe composta de profissionais do quadro de pessoal do empreendedor. O Anexo II enumera o conteúdo mínimo do RISR, com destaque para:

- “d) Análise da estabilidade da Barragem de Mineração a qual concluirá pela Declaração de Condição de Estabilidade tendo por base os índices de fator de segurança descritos na Norma Brasileira ABNT NBR 13.028 ou Norma que venha a sucedê-la, fazendo uso das boas práticas da engenharia;*
- e) Caracterização tecnológica dos rejeitos: Natureza do rejeito, características físicas de granulometria, mineralogia e plasticidade dos rejeitos, parâmetros de resistência em condições drenadas e não drenadas e susceptibilidade dos rejeitos ao fenômeno da liquefação, quando for o caso”.*

Cabe ressaltar que a Portaria DNPM nº 70.389 estabelece ainda que o PSB de toda barragem de mineração construída após promulgação da Lei nº 12.334/2010 deve conter projeto “como construído”, tradução livre da expressão do idioma inglês “*as built*” (Art. 9º, parágrafo 6). Caso uma barragem construída antes da promulgação da lei não possua o projeto “*as built*”, o PSB deverá conter o projeto “como está”, tradução livre da expressão do idioma inglês “*as is*” (Art. 9º, parágrafo 7), no prazo máximo de 2 anos a partir do início da vigência da Portaria (portanto, até 17/06/2019). A Portaria traz ainda, em seu Capítulo VI, disposições quanto ao Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM).

Resolução ANM nº 13/2019

Após o sinistro com rompimento da Barragem I, em Brumadinho/MG, foi publicada a Resolução nº 13 da Agência Nacional de Mineração – ANM, de 08/08/2019 (ANM, 2019). Através do disposto em seu Art. 2º, fica proibida a utilização do método de alteamento a montante em barragens de mineração em todo território nacional, proibição que foi recepcionada pela Lei nº 12.334/2010, através na inclusão do Art. 2º-A pela Lei Ordinária nº 14.066/2020, de 30/09/2020, com a seguinte redação:

“Art.2º-A. Fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante”.

Conforme o Art. 3º da Resolução, fica proibido também manter ou construir quaisquer instalações, obras ou serviços, permanentes ou temporários, na Zona de Autossalvamento (ZAS), ou mesmo barramentos para armazenamento de efluentes líquidos imediatamente a jusante da barragem. A Resolução estabelece ainda os prazos para desativação, descomissionamento ou descaracterização dessas estruturas, instalações, obras ou serviços.

A respeito das análises de estabilidade e estudos de susceptibilidade a liquefação, a referida Resolução ANM nº 13/2019 ratificou o preconizado pelas normas técnicas, pela Portaria DNPM nº 70.389/2017 e pelo entendimento das boas práticas de engenharia, que o Fator de Segurança de limite mínimo ou de aceitação não seja inferior a 1,3 (um vírgula três), para aceitação das análises de estabilidade nas condições de resistência não drenada, conforme seu Art. 5º, transcrito a seguir:

“Art. 5º Cabe ao projetista, profissional legalmente habilitado pelo sistema CONFEA/CREA e com experiência comprovada, estabelecer os fatores de segurança mínimos para as barragens de mineração inseridas na PNSB, independentemente do método construtivo adotado, com base na ABNT NBR 13.028/2017, nas normas internacionais e nas boas práticas de engenharia, sendo vedada a fixação em valor inferior a 1,3 para as análises de estabilidade e estudos de susceptibilidade à liquefação, considerando parâmetros de resistência não drenada.”

Fator de Segurança segundo a NBR nº 13.028/2017

A Norma Brasileira (NBR) nº 13.028, atualizada em 2017, que especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens de mineração, preconiza que:

“Os valores mínimos de fator de segurança a serem determinados pelas análises determinísticas de estabilidade devem considerar as condições de carregamento, drenado ou não drenado, de cada um dos materiais envolvidos.”

A NBR nº 13.038/2017 discrimina que, para condição não drenada de carregamento, as análises de estabilidade podem ser de dois tipos:

“Para condições não drenadas de carregamento, as análises de estabilidade podem ser executadas em tensões totais, com a utilização de parâmetros de resistência não drenada ou em tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência e poropressões estimadas.”

A NBR nº 13.028/2017 também discrimina que, para condição drenada de carregamento, as análises de estabilidade devem ser efetuadas em tensões efetivas:

“Para condições drenadas de carregamento, as análises de estabilidade devem ser efetuadas em tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento e poropressões estimadas por rede de percolação.”

Ao referenciar sua Tabela 1 (Figura), a NBR nº 13.028/2017 discrimina inicialmente que os Fatores de Segurança mínimos nela estabelecida se aplicam para quaisquer condições de carregamento (drenada ou não drenada) e para quaisquer tipos de análise (em tensões totais ou em tensões efetivas): *“Os fatores de segurança mínimos, conforme Tabela 1, devem ser obtidos, independentemente do tipo de análise e das condições de carregamento.”*

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1
^a Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como “final de construção”, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.			

Figura 3 – Tabela 1 da NBR nº 13.028/2017 contendo os Fatores de Segurança de limite mínimo ou de aceitação para barragens de mineração. Fonte: ABNT (2017) modificado.

Dessa forma, a NBR nº 13.028/2017 também preconiza que, para o caso de cálculos de estabilidade que utilizam parâmetros de resistência não drenada, o FS pode ser estabelecido pelo projetista, com base nas boas práticas de engenharia: *“Em análises de estabilidade que utilizam parâmetros de resistência não drenada, os fatores de segurança mínimos devem ser estabelecidos pelo projetista, com base nas boas práticas de engenharia”*.

Como pode ser constatado no texto da norma em tela, não é proporcionada uma liberdade total ao projetista, mas sim uma liberdade restrita às boas práticas de engenharia. Essa liberdade restrita é necessária para que o projetista, não estando adstrito aos valores da Tabela 1 da NBR nº 13.028/2017, possa assim, por exemplo, eleger outros limites mínimos com base na sua experiência e sensibilidade em aferir a confiabilidade dos dados recebidos, avaliar o potencial de dano associado, aplicar conceitos de parâmetros de resistência de pico e residual (permitidos pela norma, desde que devidamente justificados), bem como elaborar análises valendo-se de métodos probabilísticos de cálculo mais avançados para aferição do FS. Estes métodos probabilísticos, por sua vez, consideram o grau de confiança e a variabilidade dos dados obtidos

de ensaios de campo e laboratório para as variáveis envolvidas nos cálculos do FS (Herza *et al.*, 2017).

Resolução ANM nº 95/2022

Através da publicação da Resolução ANM nº 95/2022, de 07 de fevereiro de 2022, foram consolidados, no âmbito da Agência Nacional de Mineração, todos os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração (ANM, 2022). À exceção do Capítulo I, que se aplica a toda e qualquer barragem de mineração, os demais dispositivos da referida resolução se aplicam apenas às barragens de mineração abrangidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Como novidade, a resolução traz no seu Art. 65 a exigência de que as empresas devem designar um Engenheiro de Registro (EdR), externo à empresa, para todas as barragens que possuam Dano Potencial Associado (DPA) classificado como alto, o qual deverá avaliar a estrutura continuamente, emitindo relatórios que considerem se as condições de segurança e os requisitos legais estão sendo alcançados.

Normativos emitidos no Estado de Minas Gerais

Embora a temática de segurança de barragens tenha ganhado maior respaldo legal apenas com a promulgação da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010), o estado de Minas Gerais já possuía anteriormente alguns normativos relacionados a barragens, em especial quanto às barragens de mineração, dos quais citamos a seguir os três mais importantes, cujas disposições serviriam como modelo para a edição de regulamentos futuros emanados do Governo Federal.

Deliberação Normativa COPAM nº 62/2002

A Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM nº 62, de 17/12/2002 (COPAM, 2002), dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no estado de Minas Gerais. Além de trazer parâmetros para classificação, versa também sobre o cadastro de barragens. Impõe, ainda, em seu Art. 4º, a obrigatoriedade, para as fases de projeto, implantação, operação e fechamento/desativação, o atendimento aos requisitos a serem incluídos no “Sistema de Gestão de Barragens”, tais como: projeto de concepção, projeto executivo, manual de operação, análise de performance e

elaboração de plano de contingência, plano de desativação, *as built*, outorga de direito de uso de água e autorização de supressão de vegetação (quando couber), além da execução periódica de Auditorias Técnicas de Segurança por profissional legalmente habilitado.

Deliberação Normativa COPAM nº 87/2005

Em complemento à norma anterior, a Deliberação Normativa COPAM nº 87, de 17/06/2005 (COPAM, 2005), apresentou, dentre outros aspectos, a periodicidade das Auditorias Técnicas de Segurança (anualmente para barragens de alto potencial de dano ambiental, Classe III). Estabeleceu ainda no Art. 3º, que ao final de cada auditoria, deveria ser elaborado um Relatório de Auditoria Técnica de Segurança de Barragem, contendo no mínimo o laudo técnico sobre a segurança da barragem e as recomendações para melhorar sua segurança. Cópia deste primeiro Relatório deveria ser apresentada à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) no prazo de 180 dias (portanto, dezembro de 2005), devendo ficar disponível no local do empreendimento para consulta durante as fiscalizações ambientais, assim como os demais relatórios elaborados.

Deliberação Normativa COPAM nº 124/2008

A Deliberação Normativa COPAM nº 124, de 09/10/2008, retificou algumas determinações da DN COPAM nº 87, de 17/06/2005 (COPAM, 2008), dentre elas a data em que o Relatório de Auditoria Técnica de Segurança deveria estar disponível, dia 1º de setembro do ano de sua elaboração, a ser atualizado de acordo com a periodicidade definida. Acrescentou ainda que o empreendedor deveria apresentar à FEAM a Declaração de Estabilidade até o dia 10 de setembro de cada ano em que houvesse a elaboração/atualização do Relatório de Auditoria Técnica de Segurança, com exceção do ano de 2008, quando o prazo foi definido para o dia 15/11/2008.

Decretos do Estado de Minas Gerais nº 46.885/2015 e 46.993/2016

Devido ao rompimento da barragem do Fundão, o governo do Estado de Minas Gerais instituiu, por meio do Decreto nº 46.885/2015, de 12/11/2015, uma Força Tarefa com a finalidade de diagnosticar, analisar e propor alterações nas normas estaduais relativas à disposição de rejeitos de mineração. Como resultado desse processo, foi publicado o Decreto nº 46.993, de 02/05/2016, instituindo a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem (IBRAM, 2016).

Segundo o referido Decreto, a auditoria era obrigatória para barragens de mineração que utilizassem ou tivessem utilizado o método de alteamento a montante, devendo ser realizada por profissionais legalmente habilitados, especialistas em segurança de barragens, externos ao quadro de funcionários das empresas responsáveis pelos empreendimentos.

O Decreto estabeleceu ainda que, ao final da Auditoria, o empreendedor deveria apresentar uma Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade, observados os requisitos técnicos definidos em resolução conjunta da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD e da Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM. O relatório da Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem deveria ficar disponível no local do empreendimento para fiscalização a partir de 01/09/2016.

Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.372/2016

A Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.372, publicada em 06/05/2016, estabeleceu diretrizes para realização de Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragens de rejeito com alteamento a montante e para a emissão da correspondente Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade, para os quais fixou um prazo de seis meses. Segundo o Art. 4º, esses documentos devem conter os aspectos definidos no Art. 7º da DN COPAM nº 87/2005, bem como as informações e análises constantes do Anexo I e II.

Segundo o Anexo I, a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragens deve avaliar, dentre outros aspectos, a caracterização tecnológica dos rejeitos, a instrumentação e sistemas de monitoramento, os sistemas de drenagem interno, externo, extravasores da barragem, a segurança operacional, o registro de anomalias e os mecanismos de rompimento das barragens, a saber: instabilidade (maciço e fundação), liquefação dos rejeitos do maciço da barragem, galgamento (*overtopping*) e erosão regressiva ou interna (*piping*).

Em 25 de fevereiro de 2019, foi promulgada a Lei Estadual nº 23.291, que instituiu a política estadual de segurança de barragens no âmbito do Estado de Minas Gerais (SNISB, 2019), a qual se aplica a barragens com altura do maciço maior ou igual a 10m (dez metros), capacidade do reservatório maior ou igual a 1.000.000 m³ (um milhão de metros cúbicos), possuam reservatório com resíduos perigosos e apresentem potencial de dano ambiental classificado como médio ou alto, de acordo com a regulamentação existente.

Situação da legislação sobre Barragens de Rejeitos em outros países

A legislação e os regulamentos aplicáveis às barragens de rejeitos diferem consideravelmente entre os estados membros da União Europeia (UE) (Hamor, 2002). O sensível delineamento e criação de regulamentos heterogêneos é uma solução para os diversos problemas relacionados à segurança de barragens de rejeitos. No entanto, em muitos países as barragens de rejeitos permanecem fora do escopo dos regulamentos sobre segurança de barragens, em vigor apenas para barragens para retenção de água.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens possui atualmente um documento em fase de elaboração, aberto para consulta pública por parte das entidades e profissionais associados, que apresenta várias recomendações sobre como a legislação sobre barragens de rejeitos pode ser preparada. Elas contêm, entre outros aspectos, provisões para comissões, registros, procedimentos para projetos, construção, operação e manutenção, supervisão, autoridades, inspeções e reabilitação (ICOLD, 2020).

Golder Associates (2001) e Kreft-Burman *et al.* (2005) sugerem que os regulamentos referentes às estruturas para armazenamento de rejeitos devem ser flexíveis o bastante para acomodar variações nas considerações físicas, técnicas e sociais das diferentes áreas destinadas à atividade minerária.

Assim, uma estrutura regulatória ideal acomodaria futuras mudanças, tais como a natural evolução do conhecimento técnico e o crescimento das expectativas da sociedade, em virtude do desenvolvimento da consciência em relação às questões ambientais. Os regulamentos deveriam ser escritos para abrigar, de forma proativa, desafios potenciais e riscos, em vez de se constituírem uma mera reação a eventos ou desempenho inaceitáveis.

A forma dos regulamentos pode ser tanto focada como difusa. Assim, em alguns países o esquema regulatório conta com legislação específica de segurança de barragens, enquanto em outros a segurança de barragens é tratada como um aspecto de uma legislação mais geral, como, por exemplo, combinado com água, barragens, energia ou recursos naturais.

Em muitos casos, as barragens de rejeitos são operadas por companhias mineradoras e supervisionadas por autoridades de mineração do Estado. Isso pode facilmente resultar em uma situação em que a agência estatal tem outras tarefas para lidar, tais como produção da mina, segurança dos trabalhadores etc., e, portanto, a segurança da barragem pode ser considerada uma questão menor.

Todos os novos estados membros da UE passaram por mudanças políticas e econômicas no final dos anos 1980 e início dos anos 1990. Em todos os casos, nova legislação foi introduzida no campo das leis de mineração. As primeiras ideias legislativas inovadoras foram usualmente seguidas por ações corretivas e emendas subsequentes das leis da mineração.

O termo “lei da mineração” tem sido frequentemente substituído por algum outro título, como, por exemplo, Ato dos Recursos de Subsuperfície na Bulgária, Ato da Crosta Terrestre na Estônia, Lei sobre o Subsolo na Letônia, e Lei sobre o Ambiente Subterrâneo na Lituânia.

A Polônia combinou a legislação sobre geologia e mineração (Ato Legal da Geologia e Mineração) e a Eslováquia tem dois atos separados disciplinando a questão, um ato sobre a proteção e utilização dos recursos minerais e um ato sobre as atividades de operação da mineração. Entretanto, na Hungria, Romênia e Eslovênia ainda existem os tradicionais Atos da Mineração.

De acordo como Hamor (2002), a falta dos termos tradicionais “lei da mineração” na nova legislação é um sinal da aceitação e da adoção do conceito de sustentabilidade e a manifestação de que os atos relevantes concordam com o gerenciamento sustentável do complexo geoambiente.

A segurança das estruturas para disposição de rejeitos não é frequentemente a prioridade da legislação de segurança da mineração, se considerada como um todo. Neste caso, há diferenças consideráveis entre os novos estados membros da UE. Por exemplo, na Polónia barragens de rejeitos estão fora do escopo do Ato Legal de Geologia e Mineração. Elas são reguladas principalmente pela Lei de Construção e Normas Polonesas (projeto e construção) (Dulewski e Madej, 2004).

Na Hungria, o Ato nº XLVIII, de 1993, sobre mineração (Ato da Mineração), indiretamente define a categoria de “rejeitos de minas”, termo que não aparece explicitamente no Ato, mas que pode ser subentendido a partir de outros termos utilizados. O referido instrumento legal se aplica aos rejeitos resultantes dos métodos físicos de enriquecimento mineral (lavagem, classificação mecânica ou radiométrica etc.). No caso da construção, operação e descomissionamento, o licenciamento é realizado de acordo com as exigências contidas no Ato, sob a supervisão da autoridade minerária. Uma regulação específica sobre reservatórios para disposição de rejeitos está sendo concebida (Barabás, 2005).

Na Romênia, regulamentos específicos sobre reservatórios de rejeitos são cobertos por decretos especiais publicados pelo Ministério da Água e Proteção Ambiental e pelo Ministério da Indústria e Recursos.

No Reino Unido, que até bem pouco tempo fazia parte do bloco da União Europeia, as barragens de rejeitos são reguladas pelo Ato do Reservatório, de 1975. Ele se aplica a barragens de rejeitos que ainda contêm água e são capazes de armazenar mais do que 25.000 m³ de água acima do nível do terreno natural. Pilhas de estéréis e lagoas de resíduos líquidos nas minas e pedreiras são assunto do Ato das Minas e Pedreiras, de 1969, e regulamentos relacionados, de 1971, que estabelecem exigências detalhadas referentes à sua estabilidade e segurança.

Entretanto, não existem diretrizes para barragens de rejeitos ou códigos de práticas. Outras leis aplicáveis às estruturas de gerenciamento de rejeitos são o Ato sobre a Saúde e Segurança do Trabalho, de 1974, o Ato das Minas e Pedreiras, de 1969, os Regulamentos sobre Minas e Pedreiras, de 1971, o Ato sobre o Meio Ambiente, de 1995, dentre outras.

Na Alemanha, as seguintes leis são aplicáveis a barragens de rejeitos:

- Lei da Mineração. Entretanto, nem todos os reservatórios de rejeitos na Alemanha estão contemplados nessa lei.
- Cada estado tem o seu próprio “Ato da Água”, que define o planejamento, construção, manutenção e operação de barragens de rejeitos.

Normas da Indústria Alemã (DIN-Normen) são aplicáveis em todos os estados da Federação (Bradlow *et al.*, 2002):

- DIN 19700-15 para a construção de lagoas de rejeitos;
- DIN 4149 para a construção em áreas com atividade sísmica;
- DIN 4084 para cálculos de estabilidade de taludes;
- ATV-DVWK (associação técnica sobre questões hídricas) – regulamento para o controle e reconstrução de lagoas de rejeitos.

A regulação da mineração nos EUA é responsabilidade individual dos estados. Processos jurisdicionais variam de estado para estado, com um foco nas consequências, em vez de nos procedimentos de operação. Por exemplo, no Estado de Nevada, o Departamento de Regulação da Mineração (em cooperação com agências federais, de outros estados ou locais) regula as atividades de mineração com base em regulamentos adotados a partir de 1989.

Na Austrália, a legislação relativa à mineração inclui o Ato da Mineração e o Ato sobre a Segurança e Inspeção de Minas. Em alguns casos, atos adicionais (Ato do Patrimônio Aborígine, Ato da Conservação e Manejo da Terra, Ato do Governo Local, Ato da Administração da Terra, Ato da Conservação da Vida Selvagem, Ato do Título Nativo) são também adotados.

Todas as barragens de rejeitos na Austrália Ocidental são classificadas como estruturas de Categoria 1, 2 ou 3. A categorização é baseada na sua “taxa de risco”, combinada com a altura máxima do barramento. Todas as barragens com altura superior a 15m são consideradas como sendo de Categoria 1, isto é, aquelas que requerem atenção mais rigorosa.

A mineração na África do Sul é regulada pelo Ato da Água, de 1998, pelo Ato dos Minerais, de 1991, e pelo Ato da Saúde e Segurança das Minas, de 1996. O Departamento de Minas e Energia (DME) é responsável por implementar as disposições dos Atos. Os Regulamentos de Mineração do Governo tinham começado a vigorar em 1976 e exigiam, por exemplo, a manutenção de uma borda livre de 0,50m em todas as situações para uma barragem de rejeitos, objetivando armazenar uma chuva de projeto com tempo de recorrência de 100 anos, sem qualquer risco de galgamento (Penman, 2001).

Antes de 1990, a China era relativamente carente de normativos técnicos e diretrizes para implementação de estruturas para armazenamento de rejeitos. O projeto, a construção e o subsequente gerenciamento operacional de reservatórios de rejeitos eram essencialmente realizados de acordo com as especificações e experiências relativas às barragens convencionais para armazenamento de água.

Em 1990, a primeira norma específica para projeto de estruturas para disposição de rejeitos, denominada Código para o Projeto de Estruturas para Disposição de Rejeitos de Usinas de Concentração (ZBJ1-90), foi promulgada, começando a vigorar em janeiro de 1991. Desde então, o nível de projeto de reservatórios de rejeitos tem sido consideravelmente melhorado, com o número crescente de barragens de rejeitos construídas.

Em março de 2006, uma norma de segurança de barragens de rejeitos, denominada Regulamentos Técnicos de Segurança de Barragens de Rejeitos (AQ 2006-2005), foi promulgada e implementada. Esses regulamentos fornecem orientação para proprietários de minas sobre como gerenciar, de forma segura e ambientalmente sustentável, estruturas para armazenamento de rejeitos.

Conforme foi possível observar, o Brasil já possui há algum tempo legislação e instrumentos normativos específicos para barragens de rejeitos de mineração, os quais têm evoluído em termos de exigências relacionadas à segurança das estruturas, sobretudo após o desastre com a Barragem do Fundão e ainda mais após o desastre de Brumadinho.

Em muitos países em que há uma intensa atividade minerária, como é o caso, por exemplo, da Austrália, Canadá, China e Estados Unidos, há também normas específicas para barragens de rejeitos, sobretudo diretrizes para projeto, construção e operação das barragens que, em virtude de sua abrangência e qualidade técnica, são utilizadas por diversos outros países.

Em países situados no continente europeu, entretanto, apesar de muitos terem uma atividade minerária importante, as questões relacionadas à segurança das estruturas para disposição de rejeitos estão contempladas em leis e normas gerais que disciplinam a indústria da mineração ou a gestão dos recursos hídricos, juntamente com as barragens para retenção de água, não havendo quase leis específicas para barragens de rejeitos de mineração.

3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO

As informações acerca das características locais, dos aspectos físicos gerais e do histórico operacional da Barragem do Fundão foram obtidas através da análise de farta documentação integrante da Ação Civil Pública nº 23863-07.2016.4.01.3800 e da Ação Penal nº 0002725-15.2016.4.01.3822, que tramitam na Justiça Federal no Estado de Minas Gerais, cujo acesso é público e pode ser realizado através do site do Ministério Público Federal (MPF) na Internet, através do endereço eletrônico www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/atuação-do-mpf.

Constam dos autos das referidas ações judiciais documentos técnico-administrativos oriundos da própria empresa mineradora SAMARCO, bem como laudos, relatórios, pareceres etc. produzidos por órgãos públicos, polícias, peritos e profissionais que trabalharam na investigação das causas do desastre. Além da fonte geral dos dados, quando se fizer necessário, será apresentada também, em nota de rodapé, a descrição do documento de onde foram extraídas as informações.

Localização da Barragem e Aspectos Físico-Econômicos

A Barragem do Fundão fazia parte do Complexo Minerador da empresa SAMARCO, na unidade Industrial de Germano, localizada no Município de Mariana, mesorregião metropolitana de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais (Fig. 4). A Barragem do Fundão estava inserida no vale do Córrego do Fundão, situado a jusante dos Diques de Sela e da Tulipa sendo ambos do Reservatório de Rejeitos de Germano, e a montante do Reservatório de Santarém.

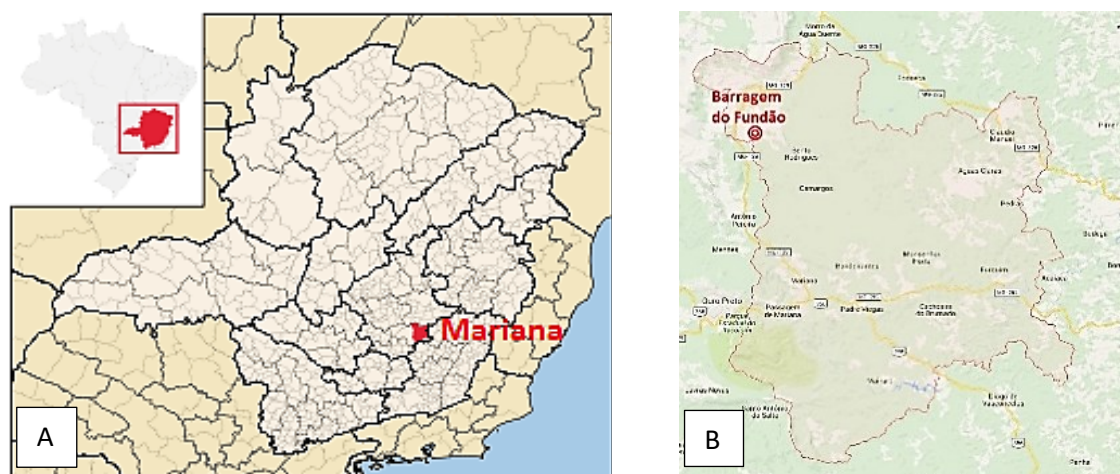


Figura 4 - Mapas de localização da Barragem do Fundão. Município de Mariana no Estado de Minas Gerais (A) e localização da barragem no município de Mariana/MG (B). (Fontes: Wikipédia e Google maps).

Quanto aos aspectos físicos, a região do Sistema de Rejeitos do Fundão (SRF) situava-se no compartimento geomorfológico referente às coberturas metassedimentares do Espinhaço/Diamantina¹ (IBGE, 2006), em região de latossolo vermelho-amarelo, de aptidão agrícola restrita, com precipitação acima de 1.500 mm anuais, temperaturas entre 19°C e 21°C, vegetação nativa de campo rupestre de altitude², compreendida no bioma Mata Atlântica³ (MMA, 2011), pertencente à sub-bacia hidrográfica do Córrego Fundão, do Córrego Santarém, do Rio Gualaxo do Norte, do Rio do Carmo e por fim, do Rio Doce⁴.

O Município de Mariana abrigava, segundo o Censo de 2010, uma população estimada de 54.219 habitantes (IBGE, 2011) e possuía um Produto Interno Bruto (PIB) de

¹ Fonte: Mapa de Unidades de Relevo do Brasil 1:5.000.000; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2006.

² Fonte: Geominas - Programa Integrado de Uso da Tecnologia de Geoprocessamento; Cia. de Processamento de Dados do Estado de Minas Gerais (PRODEMGE), 1995.

³ Fonte: Biomas do Brasil 1:5.000.000; Ministério do Meio Ambiente, 2005, <http://mapas.mma.gov.br/geonetwork/>; fev/2011.

⁴ Fonte: Folha SF-23-X-B-I-1 (1:50.000), IBGE, 1975.

R\$ 5.443.576.000,00 no ano de 2011, montante do qual R\$ 17.799.000,00 eram devidos à atividade agropecuária, R\$ 4.312.828.000,00 à Indústria, R\$ 1.034.075.000,00 aos Serviços e R\$ 78.874.000,00 a impostos, posicionando-se no intervalo de 1% dos municípios mineiros de maior PIB⁵ (IBGE, 2011) e entre os 13% de melhor índice de desenvolvimento humano do Brasil (dados de 2010)⁶ (PNUD, 2011).

Aspectos Gerais do Sistema de Rejeitos

O sistema de disposição de rejeitos da empresa SAMARCO Mineração S.A., na Unidade de Germano era composto por: Pilha de Rejeitos da Cava do Germano, Barragem do Germano e Barragem do Fundão (Fig. 5).



Figura 5 – Vista geral da Barragem do Fundão no ano de 2015, poucos meses antes do colapso
Fonte: SAMARCO (2015) *apud* MPF (2016).

Os rejeitos arenosos produzidos pela Unidade Industrial de Germano eram, anteriormente à construção da Barragem de Fundão, dispostos em áreas específicas, como no empilhamento Drenado de Germano Jusante, na área de empréstimo, e na Pilha de Rejeitos da Cava do Germano. A lama produzida nas Usinas I e II, bem como perdas diversas, deveriam ser conduzidas ao Reservatório do Germano, juntamente com o excedente do rejeito arenoso que não fosse lançado na cava.

5 Fonte: Perfil dos Municípios Brasileiros; IBGE, 2008 <http://www.ibge.gov.br>; ago/2011.

6 Fonte: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD); <http://www.pnud.org.br>; ago/2011.

Com a expansão da produção da SAMARCO e o avanço na produção do minério, ocorreu um aumento na geração de rejeitos, havendo ainda o incremento da geração de rejeitos, posteriormente, em face da inauguração da Usina III, além da contribuição dos rejeitos de lama oriundos da Mineradora VALE. Aliado a este fato, a vida útil do Reservatório do Germano, local de destino de grande parte dos rejeitos gerados, encontrava-se, em fase final. Sendo assim, foi projetada a construção do sistema de contenção de rejeitos no vale do Fundão (SRF).

Caracterização do Empreendimento conforme Atualização do Manual de Operação em 2012⁷

O Sistema de Rejeitos de Fundão (SRF) foi concebido e implantado com base nos exemplos de empilhamento de rejeitos da Cava do Germano e de Germano Jusante, bem como a própria Barragem do Germano para operar como área de disposição de rejeitos granulares (arenosos) e finos (lama).

Para tal, foram construídos dois Diques em aterro compactado, denominados Diques 1 e 2 (Fig. 6), sendo o primeiro, localizado mais a jusante no vale do córrego Fundão, destinado à contenção do rejeito arenoso pelo método subaéreo (*spigots* – canhões), na forma de um empilhamento drenado e o segundo, mais a montante, para a disposição da lama, sendo tal separação premissa fundamental para a estabilidade estrutural do projeto.

⁷ Fontes: Atualização do Manual de Operação do SRF, elaborado pela Pimenta de Ávila de 27/04/2012 a 06/07/2012, ref.: SA-422-MO-27886-01, presente das folhas 026 a 057 do Ap III, Vol I, anexo ao Memorando nº 9709/2015 – IPL 1843/2015-4 SR/DPF/MG;

Relatório Técnico de Consolidação de Dados e Premissas de Projeto da Drenagem Interna da Barragem de Rejeitos do Fundão, elaborado pela VOGBR de 30/05/2014 a 04/12/2014, presente na mídia CD, constante do Material registrado sob o nº 111/2016 no Sistema de Criminalística \ VG14-045- DRENAGEM INTERNA BARRAGEM FUNDÃO EL.940 \ Consolidação de Dados e Premissas de Projeto \ VG14-045-1-EG-RTE-0001_1, ref. SAMARCO G001613-O-1RT092.



Figura 6 - Imagem aérea do SRF, logo após o término da sua implantação, onde visualizamos os Diques 1 e 2. Fonte: SAMARCO (2009) *apud* MPF (2016).

Características Gerais da Estrutura da Barragem do Fundão

a) Dados gerais do Sistema de Rejeitos do Fundão (SRF)

a.1 – Licença de Operação: nº 230. Processo COPAM: 015/1984/066/2008. Classificação de acordo com a DN COPAM 87/2005: Classe III.

a.2 – Início e previsão para Término de Operação (ano): 2008 a 2019.

a.3 – Responsável Técnico Operacional: Germano Lopes – CREA/MG-62482-D.

a.4 – Localização: Coordenadas UTM Dique 1: 7764600,00 N, 660787,95 E; Dique 2: 7.764.750,39 N, 660.078,76 E; Datum: SAD69; Curso d'água barrado: Córrego Fundão; Curso d'água a Jusante: Córrego Santarém; Bacia hidrográfica: Rio Doce; Município da Barragem: Mariana.

a.5 – Dados geométricos: Verificou-se no Manual de Operações de 2012 a alteração do valor da crista do Dique 2 de 850 m para 857 m. Para a crista do Dique 1, que considera o Dique de Partida em 830 m mais os alteamentos até o patamar da cota 845 m, contudo, a alteração mais relevante foi a duplicação do volume dos reservatórios, em comparação com o informado pelo EIA/RIMA. As Tabelas 01 a 04 resumem os dados geométricos dos diques.

Tabela 01 - Dados geométricos dos Diques em 2008⁸.

Discriminação	Dique 1	Dique 2
Cota ou elevação da Crista (m)	830,00	850,00
Altura (m)	30,00	40,00
Cota ou elevação do Pé da barragem (m)	792,00	810,00
Comprimento da crista (m)	260,00	185,00
Altura final prevista para El. 920,0m (m)	128,00	47,00

Tabela 02 - Dados de volume do aterro dos Diques.

Estrutura	Elevações (m)	Volume (m ³)
Aterro Dique de partida 1	Entre 792,00 e 845,00	579.473,00
	Entre 845,00 e 920,00	1.572.022,00
Aterro Dique de partida 2	Entre 800,00 e 850,00	499.691,30
	Entre 850,00 e 852,00	4.826,21
	Entre 852,00 e 857,00	4.232,00

Tabela 03 - Dados de área dos reservatórios.

Reservatório	Elevações (m)	Área (m ²)
Dique 1 (Arenoso)	Entre 792,00 e 845,00	357.630,69
	Entre 845,00 e 920,00	938.732,23
Dique 2 (Lama)	Até 857,00	691.959,91
	Até 920,00	4.667.558,49

Tabela 04 - Dados de volume dos reservatórios.

Reservatório	Elevações (m)	Volume (m ³)
Dique 1 (Arenoso)	Entre 792,00 e 845,00	4.514.637,00
	Entre 845,00 e 920,00	96.769.902,00
Dique 2 (Lama)	Entre 857,00 e 920,00	108.659.635,03

b) Material Utilizado na Construção da Barragem

Para os Diques 1 e 2 foi utilizado solo saprolítico obtido na área de empréstimo localizada no interior do reservatório de rejeitos arenosos. Pelo fato destes solos apresentarem pouca resistência à erosão, a estrutura foi revestida com uma camada protetora de solo argiloso. Entretanto, conforme o projeto executivo, discriminado no item 3 da legenda das pranchas G021600-O-130305, G021600-O-130306, G021600-O-130313, G021600-O-130314 e G021600-O-130315⁹: “O aterro será compactado com material argiloso lançado em camadas de 20cm de espessura e compactado com GC = 100%”.

⁸ Fonte: Ref.: SA-900-LT-15828-0A em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 01 - Planejamento de Longo Prazo \ AUDIT ATAS & RELAT \ Auditorias \ LAUDOS \ 2008 \ Laudos.

⁹ Fonte: Projetos elaborados pela Pimenta de Ávila, presente no doc. 10 do Ap. III, Vol. II, anexo ao Memorando nº 9709/2015 – IPL 1843/2015-4 SR/DPF/MG.

c) Dimensões da Seção do Dique de Partida

Os taludes de montante dos Diques de Partida 1 e 2 possuíam inclinação igual a 1V:1,5H e seus taludes de jusante a inclinação de 1V:2H entre bermas, que possuíam 5,0 m de largura a cada 10,0 m de altura, sendo a crista com 8,0 m de largura.

d) Fundação dos Diques

A fundação do Dique 1, de modo geral, era composta por solo coluvionar vermelho laterítico, ora coluvionar amarelo, de matriz argilo-siltosa e com pedregulhos de itabiritos, na superfície, sobrepostos a uma camada de solo residual de maior resistência, por sua vez sobreposta a camadas de rochas alteradas e sãs, de maior resistência.

A fundação do Dique 2 era composta por depósito aluvionar de sedimentos areno-argilosos de cor marrom clara a avermelhada e cinza – material completamente removido – solo coluvionar vermelho laterítico superficial sobreposto a uma camada de solo residual, também sobre camadas de rochas alteradas e sãs, de maior resistência.

Para a construção dos Diques, a camada de fundação sofreu serviços de limpeza e tratamento, tendo sido todos os solos moles, orgânicos e soltos removidos e transportados para área de bota fora.

e) Lançamento de Rejeitos Arenosos

Os rejeitos granulares (arenosos) deveriam ser lançados a montante na crista do Dique 1 em direção às tulipas da Galeria Secundária, de modo a manter uma praia de rejeitos com declividade média de 1% para montante e largura mínima de 200 m (na passagem de cheias) a fim de conter a lama a montante.

f) Implantação de Diques de Alçamento a Montante

Era prevista a construção de um novo Dique de alçamento quando o anterior a ele apresentasse borda livre de aproximadamente 1,0 m para a Precipitação Máxima Provável (PMP). O mesmo deveria ser formado por núcleo composto de rejeito arenoso, e se constituía a partir de uma base de 25 m de largura contados da crista do talude de montante do Dique de alçamento anterior. Iniciando-se com uma camada de regularização de 1,1 m de espessura média.

O sistema de drenagem interna da barragem foi inicialmente previsto com dois drenos de fundo, principal e secundário, atravessando transversalmente a base do Dique 1, compostos por materiais granulares dispostos em camadas de diferentes granulometrias. Estes drenos localizavam-se junto à fundação do mesmo, e interligavam-se a um tapete drenante de paramento, apoiado sobre o talude de montante do Dique 1.

Os drenos tinham como objetivo permitir que toda a água intersticial percolada através do rejeito disposto a montante do Dique 1, bem como pelo tapete de paramento ou pelos drenos de base, fosse conduzida para jusante com poropressões essencialmente iguais à pressão atmosférica, ou próximas deste valor, condição fundamental à segurança quanto à estabilidade de todo o sistema de disposição de rejeitos.

Entretanto, esse sistema foi posteriormente substituído em 2009/2010 por um tapete drenante de brita e areia implantado na cota 826 m, com 120 m de comprimento e pontos de saída na berma de elevação 820 m, através de tubulações flexíveis.

Para drenagem da água de superfície acumulada nos reservatórios, por sua vez, foram construídos dois sistemas extravasores denominados de galeria principal e secundária, que eram inclinadas e possuíam diversas bocas de captação d'água, denominadas de *Tulipas*, operadas com *stop-logs* (barreiras), distribuídas na porção anterior destas galerias, semelhante a um tubo de flauta (Fig. 7). Essas tulipas deveriam ser teladas e identificadas com placas de advertência, a fim de impedir a entrada de galhadas, troncos e queda de pessoas.

As galerias extravasoras, construídas em concreto armado, possuíam internamente diâmetro de 2,00 m e declividade de 1,5%, armação e espessuras de paredes e laje de fundo variáveis ao longo do comprimento das Galerias, em função dos carregamentos a que os Módulos ficariam submetidos. Os carregamentos eram calculados diretamente proporcionais à altura do rejeito do reservatório, sob o qual determinada seção da galeria estaria subjacente.



Figura 7 - Imagem das tulipas da galeria principal com marcos para receber os *stop-logs*¹⁰ (A) e da tulipa da galeria secundária, quase em situação de bloqueio com *stop-log* (B) para elevação do nível d'água até a captação imediatamente superior¹¹.

3.4 HISTÓRICO OPERACIONAL DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO

A operação do Sistema de Rejeitos do Fundão (SRF), do qual a barragem de rejeitos fazia parte, foi marcada, desde seu início, ocorrido em dezembro/2008, por problemas técnicos relevantes, que teriam de certa forma contribuído para a deflagração do processo que culminou com o rompimento da barragem. A seguir serão apresentados os principais problemas ocorridos, de acordo com a pesquisa documental realizada nos arquivos do caso mantidos pelo Ministério Público Federal.

Problemas com o funcionamento do sistema de drenagem interna

Um consultor técnico internacional contratado pela empresa mineradora, após uma inspeção¹² realizada entre 1º e 5/12/2008, apontou sérias evidências responsáveis pelo mau funcionamento dos dispositivos de drenagem interna do Dique 1, principal dique do SRF.

Naquela oportunidade, em face do grande acúmulo de águas existente no reservatório do Dique 1, o consultor considerou que o mesmo estaria sendo utilizado para decantação de sedimentos de efluentes. Dessa forma, inferiu que os Drenos de Fundo estariam

¹⁰ Fonte: Imagem de 17/08/2009 presente relatório de 16/11/2010 da consultoria internacional em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 01 – Planejamento de Longo Prazo \ AUDIT ATAS & RELAT \ Auditorias \ 2010 \ Andrew Robertson \ 2010 Samarco Tailings November 16 to 20 Audit V2.

¹¹ Fonte: Relatório de Inspeção ao Sistema de Rejeitos de 19/12/2011, elaborado pela Pimenta de Ávila, em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 04 – Monitoramento e inspeção \ 02_Inspeção \ EOR_JPA \ SA-410-RV-26776-0B.

¹² Fonte: Report 025005/December, 2008 Visit – Samarco Mine em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 01 – Planejamento de Longo Prazo \ AUDIT ATAS & RELAT \ Auditorias \ 2009 \ Andrew Robertson \ 05 \ A Robertson Report.zip \ 2008 12 Samarco Tailings Review December 2008.pdf e APPENDIX A – Photos.pdf e APPENDIX B – FD1 PHOTOS from December Report.pdf.

sofrendo colmatção (entupimento) por efeito dos finos presentes no lago, ao analisar o tipo e vazão dos efluentes na saída dos referidos drenos. Contudo, a ineficiência dos Drenos de Fundo se deu principalmente em virtude de problemas construtivos.

O Consultor também destacou a falta de aplicação da camada de proteção, utilizando rejeito arenoso, sobre a maior parte do Dreno de Fundo Principal e erosão com contaminação de suas camadas drenantes em um ponto do Dreno de Fundo Principal, onde sobre ele cruzava uma via de serviço (Fig. 8).



Figura 8 - Imagens de ângulos opostos da erosão do Dreno de Fundo Principal, junto ao cruzamento com o caminho de serviço, onde houve contaminação das camadas drenantes por sedimentos finos. Fonte: SAMARCO (2009) *apud* MPF (2016).

Ocorrência de Processo Erosivo – Piping

Em 13 de abril de 2009, quando o reservatório do Dique 1 encontrava-se em fase inicial de enchimento, ocorreu uma surgência (vazamento) no seu talude de jusante, próxima à saída do Dreno de Fundo Principal, no local onde havia ocorrido um princípio de escorregamento, observado em janeiro do mesmo ano. Esta surgência evoluiu rapidamente para um processo erosivo interno, com carreamento de material do aterro (*piping*), com diâmetro aproximadamente de 1,00 m (Fig. 9).



Figura 9 - Imagens do *piping* ocorrido em 13/04/2009 acima da saída do dreno de fundo.
 Fonte: SAMARCO (2009) *apud* MPF (2016).

O referido *piping* provocou a decisão, pelos responsáveis técnicos da empresa SAMARCO, de adotar três ações emergenciais, a fim de evitar o rompimento da barragem:

- a) Interrupção do lançamento de rejeitos e esgotar emergencialmente o reservatório a montante do Dique 1;
- b) Construção imediata de um aterro de blocos de itabirito (rocha) na base do talude de jusante com camadas de transição, controlando a saída da percolação, mediante a filtragem e retenção dos finos carregados;
- c) Manutenção, no reservatório da Barragem de Santarém, situado à jusante do Dique 1, de um volume de espera superior ao volume existente no reservatório do Dique 1, para o caso de rompimento.

Apesar dessa ocorrência, as condições de controle foram consideradas satisfatórias e de risco controlado pela equipe técnica da empresa mineradora.

Em face dos problemas surgidos, foram executadas escavações investigatórias a jusante do Dique 1, nas imediações da surgência, no intuito de investigar e reparar possíveis cavidades formadas no maciço pelo processo erosivo sofrido. E, também no pé do talude de montante, na porção mais profunda do talvegue, no local de implantação do dreno de fundo, com o propósito de verificar as suas condições. As investigações realizadas constataram:

- a) Obstrução na região de saída do dreno de fundo;
- b) Camadas dos materiais constituintes do dreno de fundo foram implantadas em desacordo com aquelas previstas no projeto executivo do SRF (Fig.10);
- c) Material contaminante (solo) constatado no interior de determinadas camadas do dreno de fundo.



Figura 10 - Imagens da investigação dos drenos de fundo no talude de montante em 20/08/2009, constatando inconformidades nas camadas drenantes previstas em projeto, como espessuras a menor e até mesmo ausência de camadas. Fonte: SAMARCO (2009) *apud* MPF (2016).

Conforme constatado, os drenos de fundo apresentaram sinais inequívocos de colmatagem, tornando-se pouco efetivos, sendo suas recuperações pouco confiáveis, levando à conclusão de que os mesmos não poderiam ser recuperados para desempenhar suas funções originais de forma eficiente e segura, o que ensejou na alteração do projeto de drenagem interna da barragem, tendo sido tomadas as seguintes providências:

- a) Eliminação da condição original drenante dos dois drenos de fundo, construindo um selo argiloso a montante deles, de forma a bloquear o fluxo direto de água pelas suas entradas (Fig. 11), com o objetivo de evitar que um incidente semelhante ao ocorrido voltasse a ocorrer;
- b) Isolamento do dreno de paramento (tapete drenante) do talude de montante, que originalmente era acoplado aos drenos de fundo, a fim de não permitir aporte de água a estes últimos dispositivos;
- c) Vedação também dos drenos de contingência das ombreiras, executada antes do completo enchimento do reservatório entre os Diques 1 e 1A;
- d) Construção de um tapete drenante em substituição aos drenos de fundo, o qual se mostraria posteriormente insuficiente para promover a drenagem interna do material contido no reservatório.



Figura 11 - Imagem da conclusão da construção do septo de argila nos drenos de fundo, a montante do Dique 1. Fonte: SAMARCO (2009) *apud* MPF (2016).

Falha na Galeria Principal

Após a recuperação do sistema de drenagem interna do Dique 1, a SAMARCO retomou a operação da barragem em abril de 2010. O reservatório do Dique 1 recebeu rejeitos granulares até 12/07/2010, quando foi observada uma passagem de rejeito granular para jusante do Dique 1 através da galeria principal, verificada de imediato através de um cone de sucção (vórtice) visualizado no interior do reservatório do Dique 1.

De imediato, o lançamento de rejeito granular no reservatório do Dique 1 foi novamente interrompido. A SAMARCO implantou uma ensecadeira para isolar a área da Galeria Principal, possibilitar o seu reparo e dar continuidade ao lançamento de rejeitos.

A partir das inspeções na galeria principal, ficou evidente que alguns de seus módulos sofreram deslocamentos devido a um recalque da fundação, que provocou a abertura de juntas de dilatação entre alguns módulos, possibilitando a passagem de rejeitos para o interior da estrutura. Conforme previsto em projeto, o trecho afetado deveria ser assentado sobre corte no terreno natural, mas foi constatado que o mesmo fora assentado em aterro não controlado, inferindo-se que a execução da galeria ocorreu em locação em desconformidade com o projeto. Essas não conformidades indicam falha no processo construtivo e falha na fiscalização e acompanhamento da execução das obras.

A Galeria Principal de Fundão passou por serviço de reforço de fundações no trecho em que houve o recalque, com a utilização do método de injeção de concreto (*jet grouting*). Ao

mesmo tempo, foram executados serviços de tratamento de juntas de dilatação dos módulos da galeria, através da instalação de juntas *Jeene* e injeção de gel acrílico polimérico.

*Alteração da Geometria do Dique Principal do Fundão (Setembro/2011)*¹³

A geometria ou arranjo do Dique 1 do Fundão com seus respectivos alteamentos foi alterada em setembro de 2011 para, em tese, satisfazer à segurança da estrutura (Dique 1 + empilhamento drenado) até a cota 920 m, de modo a manter o fator de segurança (FS) do SRF acima de 1,5.

A então projetista Pimenta de Ávila Consultoria - PAC, considerando o novo cenário com a incorporação do Dique 1A, verificou que o arranjo final, para a cota 920 m originalmente proposto, não mais atenderia aos quesitos de estabilidade global do maciço, tendo em vista que a implantação do Dique 1A acarretaria disposição de lama em seu reservatório a montante, fato este não previsto inicialmente.

Este argumento técnico, ainda que plausível, contudo, aconteceu após mais de dois anos da escolha da alternativa do Dique 1A, ocorrida em maio de 2009, que implicou na referida deposição de lama.

O novo arranjo atendeu principalmente à solicitação da SAMARCO para ocupação do talvegue, situado na margem esquerda do SRF, imediatamente a montante do Dique 1, local onde existe a saída do sistema de drenagem interna e superficial da Pilha de Estéril Permanente 2 da Mina de Fábrica Nova, de propriedade da VALE. Solicitação essa devido à detecção quatro meses antes, em maio de 2011, de aumento de volume de produção e consequentemente da demanda para disposição de rejeito.

A ocupação desse vale, diferentemente da situação prevista no projeto original, requereria a avaliação da situação da Pilha de Estéril (PDE) frente à subida da superfície dos rejeitos e eventual interferência no sistema de drenagem interno dessa estrutura. Recomendou-se em setembro de 2011 que a empresa responsável pela estrutura procedesse com tal avaliação.

¹³ Fonte: Justificativa para Mudança da Geometria do Arranjo Final da Barragem do Fundão na El. 920,0m de setembro/2011, ref.: SA-420-NT-24994-00, elaborada pela Pimenta de Ávila, contida na mídia CD, presente à folha 945, Item 2 do Material anexo ao Memorando nº 0067/2016 – IPL1843/2015-4 SR/DPF/MG \ Item2 – Projetos \ 2.Fundão alteração eixo \ SA-420-NT-24994-00.

Adicionalmente, o sistema de drenagem superficial da PDE deveria ter sido avaliado e suas vazões analisadas no que tange à operacionalização da disposição de rejeitos do Fundão. É oportuno observar que o projeto original do SRF previu a implantação de um dispositivo hidráulico, o qual não foi implantado, para captar e conduzir o fluxo superficial, oriundo da bacia hidrográfica de contribuição do talvegue, onde o rejeito passaria a ser disposto, para a área situada a jusante do Dique 1. Desta forma, toda contribuição de drenagem superficial proveniente da PDE seria descartada no reservatório do Fundão.

Nessa nova concepção da Barragem do Fundão, as ombreiras em cotas mais elevadas da barragem conformar-se-iam aproximadamente em arco com o terreno natural, mantendo a região central do corpo da barragem com eixo longitudinal retilíneo.

Além das questões anteriores, o novo arranjo geométrico acarretou a necessidade de revisão do sistema de drenagem superficial do SRF, do projeto de instrumentação originais, bem como do projeto de drenagem superficial da área a jusante do Dique 1. Ocorre que, segundo Morgenstern et. al. (2016), “o projeto não era adaptável à variação da proporção de areias e lamas recebidas. E o mais importante, ele dependia de uma drenagem adequada das areias.”

Destarte, devido à incorporação de um terceiro sistema extravasor, foi avaliada pela SAMARCO quanto a possíveis interferências decorrentes da sua incorporação ao SRF. Também foi solicitado à PAC a revisão do trânsito de Cheias do SRF e da drenagem superficial da área a jusante do Dique 1, considerando as interferências citadas.

Recuo do Eixo da Barragem (Setembro/2012)¹⁴

Diante da alteração do eixo de alteamento, apresentada em setembro de 2011, sem a implantação de um patamar de recuo do eixo longitudinal na EL. 845 m, constatou-se um ano depois, em setembro de 2012, quando o reservatório já se encontrava na EL. 855 m, que a Galeria Secundária, instalada na região da OE, não estaria dimensionada para os novos carregamentos decorrentes do alteamento da barragem sem o referido patamar. Apesar do argumento apresentado ser tecnicamente plausível, não foram localizados na documentação analisada os

¹⁴ Fontes: Arquivos em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 04 - Monitoramento e inspeção \ 02_Inspeção \ Inspeções Geotécnicas \ 01-Barragem e Cava \ 2012 \ Dique 1 \:

- Dique 1_jan-dez_2012.xls;
- Subsistência \ Subsistência Fundão_25 de novembro de 2012;

Apresentação por Wanderson Silvério da SAMARCO em 06/09/2012 em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 02 – Planejamento de Curto Prazo \ 03 – Apresentações \ 2012_09_06_Barragem Fundão_Alteração Eixo Alteamento Cota 855m_R1.ppt.

projetos executivos, relativos à galeria secundária, para ratificá-lo. Em face do problema detectado, a SAMARCO elencou as duas alternativas seguintes:

- 1) Retornar para a configuração anterior: uma reavaliação da estabilidade da estrutura deve ser levada a cabo para definir sua viabilidade. Gera alterações na drenagem superficial e na região da grota da VALE;
- 2) Manter a configuração atual: neste caso, a galeria secundária deverá ser plugada ou reforçada estruturalmente possivelmente reduzindo sua capacidade de escoamento. Condições de fundação devem ser avaliadas.

a) Vantagens relacionadas à 1ª alternativa:

O traçado da crista relocada (cota 855 m) foi escolhido de tal forma que:

- Gerasse a menor movimentação de material possível pela equipe da infraestrutura naquele momento;
- Permitisse o descarregamento da galeria secundária para os níveis considerados no seu projeto, caso fosse tomada a decisão de escavar a praia de rejeitos para reestabelecer as cargas previstas, o que deveria ser avaliado;
- Atendimento ao alinhamento do projeto anterior caso optasse por sua adoção, evitando-se retrabalhos.

b) Por outro lado, essa 1ª alternativa tinha como principal desvantagem o risco do alteamento em região de fundações inadequadas, elencado pela própria SAMARCO, conforme transcrito a seguir:

É importante observar que a Pimenta de Ávila em um de seus relatórios (G021600-O-1MD200_R-01), justifica a alteração do arranjo da Barragem do Fundão para a configuração atual, dentre outros fatores, ao não atendimento da estabilidade global da configuração anterior em função da implantação do Dique 1A e disposição de lamas à montante deste, cuja praia tornar-se-ia a fundação dos alteamentos futuros;

c) Vantagens relacionadas à 2ª alternativa:

O arranjo atual é mais vantajoso para a SAMARCO em função de:

- Permitir uma disposição de cerca de 11 Mm3 de rejeitos;
- Melhores condições operacionais;
- Contrapilhamento da Pilha de Estéril da VALE melhora a sua condição de estabilidade.

Apesar da SAMARCO ter ciência do risco de realizar alteamentos em região com fundações que comprometeriam a estabilidade global, em função da implantação do Dique 1A,

com disposição de lamas a montante deste, a alternativa adotada foi justamente a 1ª, recuando o eixo da barragem na sua ombreira esquerda, em aproximadamente 80 m (Fig. 12), portanto, assumindo todo risco inerente a essa decisão.



Figura 12 - Imagem do início do alteamento no eixo recuado em outubro/2012, onde é notada a contaminação do rejeito arenoso com lama (coloração ocre) na elevação aproximada de 860 m.¹⁵

Por volta das 08 h do dia 25 de novembro de 2012, foi constatada uma subsidência (*sink hole*), com diâmetro em torno de 5 m e profundidade de cerca de 1 m, distante aproximadamente de 10 m a montante do último, e já recuado, alteamento da barragem do Fundão (Fig. 13). A partir das 15 h do mesmo dia, foram realizadas inspeções dentro da Galeria Secundária, que revelaram um vazamento contínuo com carreamento de rejeito pela junta nº 18, semelhante a uma vazão de uma tubulação de diâmetro de $\frac{3}{4}$ de polegadas.

A junta nº 18 da Galeria Secundária estava localizada na estaca nº 11, dentro do trecho nº 4, que estaria dimensionado para suportar um carregamento correspondente a uma coluna de até 80 m de rejeitos a partir da cota 810 m, ou seja, até a cota 890 m. Entretanto, o reservatório ainda se encontrava em torno da cota 860 m¹⁶, isto corresponderia a um alívio de carregamento referente a uma coluna de 30 m de rejeito com relação a máxima capacidade de suporte dimensionada. Assim, o problema prematuro indica falha de projeto ou de execução das juntas da Galeria Secundária.

¹⁵ Fonte: Relatório Mensal de Inspeção de Campo em HD_busca \ Geotecnia \ Privado \ Processos \ 04 – Monitoramento e inspeção \ 02_Inspeção \ Inspeções Geotecnicas \ 01 – Barragem e Cava \ 2012 \ Dique 1 \ Dique 1_jan-dez_2012.xls.

¹⁶ Fonte: Projetos elaborados pela Pimenta de Ávila, presente no doc 10 do Ap III, Vol II, anexo ao Memorando nº 9709/2015 – IPL 1843/2015-4 SR/DPF/MG \ (ref.: SA-717-DS-12216-00 e G021600-C-130125.dwg).



Figura 13 - Imagem da subsidência da galeria secundária (A) e da junta com vazamento (B).
Fonte: SAMARCO (2012) *apud* MPF (2016).

Devido à falha da junta nº 18 da Galeria Secundária, a SAMARCO avançou o recuo do eixo na OE em mais 70 metros. O recuo do eixo, que havia sido iniciado dois meses antes com 80 m inicialmente, então, totalizou aproximadamente 150 m (Fig. 14). Assim, a SAMARCO assumiu um risco ainda maior com relação às condições desfavoráveis de fundações para a estabilidade global, uma vez que, como já destacadas pela PAC, os alteamentos subsequentes seriam executados sobre região onde antes houvera o lançamento de lama devido ao Dique 1A.

Além disso, houve o desrespeito à premissa fundamental de projeto da praia mínima de segurança de 200 m, estabelecida para manter os alteamentos afastados da região de rejeitos composta por material com granulometria mais fina, devido à segregação hidráulica, causada pela forma de lançamento adotada, e onde o lençol freático é mais raso.



Figura 14 - Imagem do avanço do recuo do eixo em função do *sink hole* da galeria secundária.
Fonte: SAMARCO (2013) *apud* MPF (2016).

Em 2012 ainda, a empresa VOGBR realizou estudos em nível conceitual para compreender os mecanismos de entrada, circulação e saída da água do SRF. Nessa oportunidade também foi realizada uma avaliação do sistema de drenagem interna, considerando o alteamento final previsto para EL. 920 m.

Neste estudo, concluiu-se através de modelagem hidrogeológica preliminar que, sem a implementação de estruturas de drenagem auxiliares à existente, o nível de água subterrânea poderia aflorar próximo às ombreiras da barragem. Tal conclusão corroborou a recomendação feita pelo ITRB (painel de especialistas contratado pela mineradora), que em 2011 solicitou a implantação de drenos nas ombreiras do empilhamento de rejeitos da Barragem do Fundão, visto que o tapete drenante implantado não contemplava a região das ombreiras.

Ainda, nas análises de percolação realizadas para a condição de operação existente em 2012, foram obtidos valores inferiores de vazão com relação ao efetivamente medido em campo. Dessa forma, recomendou-se àquela época uma calibração do modelo de percolação. Também foi identificado na OE da barragem um gradiente hidráulico elevado. Essa anomalia poderia estar relacionada ao nível d'água mais elevado na região da PDE da VALE, onde se formou um lago na saída do dreno interno dessa estrutura (Fig. 15).

A VOGBR então elaborou em abril de 2013 o Projeto Executivo de Drenagem do Pé da Pilha de Estéril (PDE União - VALE) com o objetivo de reduzir o aporte de água para o reservatório da Barragem do Fundão, considerando os alteamentos previstos até a cota 920 m, a fim de conduzir adequadamente o fluxo de água percolada no interior da PDE da VALE para fora do SRF.



Figura 15 - Vista geral do Dique 1 em maio/2013, onde se observa o início do recuo do eixo de out/12, a subsidência de 25nov12 e avanço do recuo do eixo pós subsidência, bem como a formação de lago na grota da VALE e sua proximidade, influenciando na saturação do reservatório do Fundão.¹⁷

Movimento de Escorregamento no Maciço do Recuo do Eixo (Agosto/2014)¹⁸

Relatório da empresa PAC, relativo à inspeção realizada no dia 31/08/2014, descreveu que foi observado pela equipe da SAMARCO diversas trincas transversais à crista do maciço de recuo e outro conjunto paralelo à crista, além de sinais de planos de compressão, também paralelos ao pé do talude do recuo (Fig. 16). Estas trincas caracterizaram um início de movimento de escorregamento do maciço na área do recuo junto da OE do SRF. A SAMARCO

¹⁷ Fontes: Imagem Google Earth de 07/05/2013 e Relatório Técnico sobre Drenagem Interna Complementar, de 29/10/2014 a 13/03/2015, elaborado pela VOGBR, ref.: SAMARCO G001613-O-1RT090, presente na mídia CD, constante do Material registrado sob o nº 111/2016 no Sistema de Criminalística \ VG14-045- DRENAGEM INTERNA BARRAGEM FUNDÃO EL.940 \ Projeto Executivo – Drenagem Interna \ VG14-045-1-GT-RTE-0007_3.

¹⁸ Fontes: Relatório da Inspeção do SRF de 04/09/2014, elaborado pela Pimenta de Ávila, ref.: SA-900-RL-38702-0A, contido na mídia CD, presente à folha 945, Item 2 do Material anexo ao Memorando nº 0067/2016 – IPL1843/2015-4 SR/DPF/MG \ Item2 – Projetos \ 7. Recomendações Joaquim Pimenta \ G004023-O-1RI003_R-00;

Movimento de Escorregamento no Maciço do Recuo da Pilha (Memo 067/2016 / anexo Item 1 \ CD-R folha 945 \ Item 2 - Projetos \ Recomendações Joaquim Pimenta \ arquivo: G004023-O-1RI003_R-00 Pimenta de Ávila em 15/09/2014);

Inspeção Trincas Processo Monitoramento e Inspeção Setembro \ 2014 – SAMARCO – G001625-O-2RA002_R-02 (Anexo ao Memo 067/2016, Item 2, CD-R da folha 945 Relatórios de Registros \ Documentos de Registro).

construiu, de imediato, uma berma de equilíbrio formada por um aterro de reforço no pé do talude do recuo.

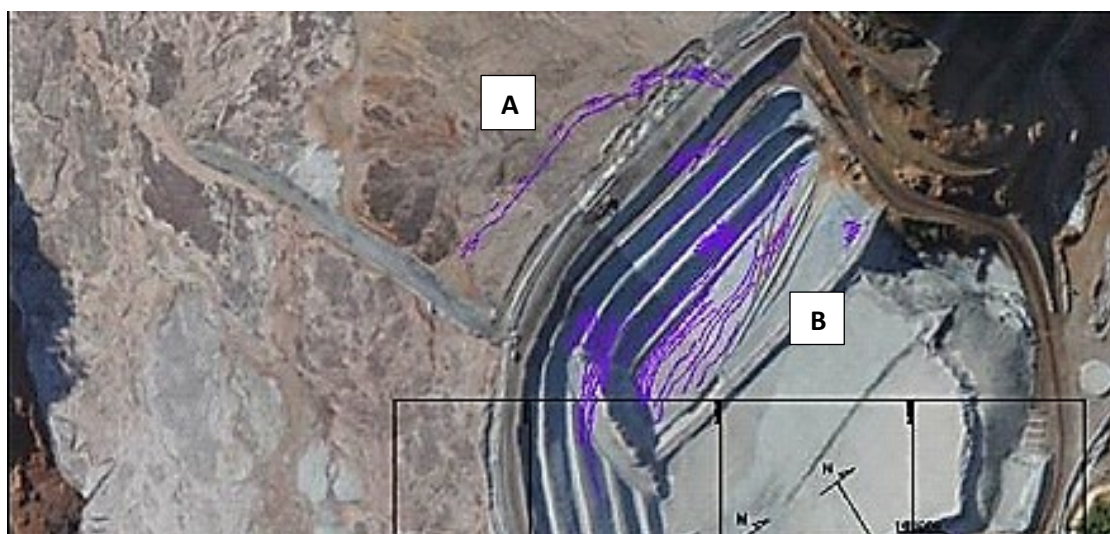


Figura 16 - Imagem com representação das trincas de tração (A) e compressão (B) na região do eixo recuado junto à ombreira esquerda da barragem. Fonte: SAMARCO (2014) *apud* MPF (2016).

As análises de estabilidade realizadas em função do princípio de escorregamento encontraram coeficientes de segurança (FS) próximos da unidade para hipóteses de linha freática em posição aflorante em toda a altura do talude, o que não se observou. Para posições de freática saindo no talude mais próximas do seu pé os coeficientes de segurança encontrados foram próximos de 1,3. Com a implementação do aterro de reforço, o coeficiente de segurança foi considerado amplo mesmo para freáticas elevadas.

A empresa PAC advertiu que as análises de estabilidade, até então realizadas para a berma de equilíbrio na região do recuo do eixo, estavam limitadas à verificação para a condição estática de equilíbrio limite. Considerando os resultados apreciados e as observações de campo, sugeriu que fossem realizadas novas análises de estabilidades onde a hipótese de liquefação também deveria ser considerada, o que não fora verificado pelas análises iniciais.

Após o princípio de instabilização do talude, foi projetada e executada uma berma estabilizadora (Fig. 17) na base dos alteamentos na região do recuo. Os documentos analisados indicam que, a análise realizada limitou-se a avaliar tão somente a estabilidade da geometria existente, considerando a execução da berma de equilíbrio, contudo, não simulou situações para futuros alteamentos. Também não há menção no projeto da berma de reforço sobre análise de estabilidade após eventual liquefação do rejeito, conforme havia alertado a empresa PAC em seu relatório.



Figura 17 - Imagem da construção da berma de equilíbrio no eixo recuado, iniciada em 28/08/2014. Fonte: SAMARCO (2014) *apud* MPF (2016).

Velocidade de alteamento da barragem superior à recomendada

No período de 2010 a 2015, segundo documentação analisada, os valores médios da velocidade de alteamento da Barragem do Fundão estiveram em torno de 11 m/ano ou 1 m/mês aproximadamente. Nos dois anos onde ocorreram os maiores valores, 2011 e 2014, eles atingiram 20 m e 14,6 m, respectivamente, muito acima do valor médio.

Além disso, a boa técnica recomenda o alteamento anual entre 4,6 m e 9,1 m para barragens de rejeito arenoso (SETEC, 2016), em condições similares, ou até mesmo menos, especialmente em face da possibilidade, não caracterizada mediante ensaios *in situ* até final de 2015, da susceptibilidade à liquefação.

Para que se proceda um maior ritmo de lançamento de rejeito arenoso, melhores devem ser as condições de drenagem da barragem, quer sejam relacionadas às estruturas de engenharia ou à natureza do material depositado. Na Barragem do Fundão, em razão dos problemas operacionais que se sucederam, é pouco provável que a condição de drenagem tenha sido excelente.

Os problemas operacionais exigiram manutenção corretiva constante do sistema e até mesmo a substituição parcial das estruturas originais de drenagem, com revisão dos drenos e introdução de novos diques de alteamento intermediários, que tinham como propósito bloquear a passagem da lama.

Foram ainda constatadas ocorrências indicativas de falhas no processo de segregação granulométrica do rejeito e deposição de fração argilosa superior à planejada no reservatório do Dique 1. Além disso, estudos mostravam a susceptibilidade do rejeito granular depositado em Fundão ao fenômeno da liquefação, a exemplo daquele conduzido por Rezende (2013).

Sendo assim, os valores de alteamento verificados na prática indicam que o alteamento anual da Barragem do Fundão, que variou entre 10 m e 20 m anualmente, pode ter contribuído para a perda de qualidade da drenagem do sistema, bem como para acumulação da poropressão, especialmente quando os valores mais acentuados foram observados, possibilitando a propensão à ocorrência do fenômeno de liquefação estática.

Além disso, ao examinar os intervalos de tempo mais curtos, fica ainda mais evidente a sucessão de períodos em que o ritmo de alteamento foi alto, em contraste com longos períodos, em que o nível do reservatório não sofreu alteração.

Em agosto de 2015 iniciou-se a construção dos tapetes drenantes da ombreira esquerda, dividida em duas fases, e da ombreira direita (Fig. 18), conforme previsto pelo projeto de alteamento do SRF para a EL. 940 m, elaborado pela empresa VOGBR. Somente após a conclusão da 1ª fase do tapete drenante da ombreira esquerda é que seria possível iniciar os trabalhos de deposição de rejeito arenoso para a retificação do eixo da barragem.

Nessa oportunidade, verificou-se a ocorrência de saturação sobre o patamar de recuo. Em 05 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem (Fig. 19) e boa parte das vítimas fatais do desastre era constituída por operários que trabalhavam na construção dos tapetes drenantes.



Figura 18 - Imagem em primeiro plano da construção do tapete drenante da OD, e ao fundo, em destaque, a geometria curva do eixo recuado em direção da OE. Fonte: SAMARCO (2015) *apud* MPF (2016).



Figura 19 – Fotografia da área da Barragem do Fundão instantes após o sinistro em 05/11/2015 a partir da PDE da VALE. Fonte: VOGBR (2015) *apud* MPF (2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 A TÉCNICA ANÁLISE DE CONSTELAÇÃO

Introdução

A técnica Análise de Constelação (AC), utilizada no presente trabalho, trata-se de uma abordagem de pesquisa que objetiva a compreensão de processos complexos. A técnica foi desenvolvida na Universidade Técnica de Berlim no início dos anos 2000 (Schön *et al.*, 2004) como uma ferramenta para a pesquisa multidisciplinar sobre tecnologia, sustentabilidade e inovação. Seu conjunto de ferramentas facilita o acesso a objetos científicos de estudo a partir de diferentes pontos de vista e utilizando diferentes abordagens.

A metodologia é caracterizada em particular por dois fatores: de um lado, fatores heterogêneos de influência e sua efetividade em processos de inovação são considerados iguais. Isto significa que elementos que são essencialmente equivalentes existem em relação uns com os outros e assim figuram juntos dentro das constelações. Esta premissa caracteriza a abordagem analítica da AC voltada para processos de inovação e fundamentalmente a distingue de outras abordagens. De outro lado, essa metodologia facilita a abordagem “de baixo para cima”, ou seja, a partir da perspectiva de quem está nas pontas, lidando diretamente com os problemas.

De acordo com este princípio, constelações são descritas baseado nas suas unidades singulares e em suas relações mútuas. Essa metodologia faz, desse modo, justiça ao respectivo curso individual dos processos de inovação. Ela possibilita a busca por novos modelos (ou padrões) através da comparação de diferentes experiências de inovação e permite a experimentação com abordagens estratégicas como uma forma especial de validação (Ohlhorst e Schön, 2015).

Conceito de Inovação na Análise de Constelação

A AC vê os processos de inovação não apenas como um tipo específico de mudança social, mas incorpora outros processos de mudança além disso, que não são sempre exclusivamente socialmente determinados, mas existem em vez disso em interação com outros fatores, tais como natureza e tecnologia (Feldhoff *et al.*, 2019).

A técnica parte da conclusão de que objetos sociais de investigação empíricos não podem ser entendidos sem os artefatos técnicos e sistemas de infraestrutura interligados, e vice e versa.

Fenômenos tais como mudança climática, mudança demográfica ou mudança estrutural econômica envolvem em uma interação de fatores sociais, técnicos e naturais – e a AC leva em consideração esses elementos heterogêneos e sua efetividade dentro dos processos de inovação como forças equivalentes. Por essa razão, é baseada sobre um amplo conceito de inovação, que vê inovação como uma invenção ou aprimoramento de algo existente, que é mais ou menos técnica, bem como social na sua natureza.

O problema dos métodos e as questões resultantes

O ponto de partida para o desenvolvimento da técnica foi o desafio de conciliar questões de ciência social e engenharia, métodos e experiências dentro dos grupos de pesquisa interdisciplinar nos campos de tecnologia, inovação e pesquisa de sustentabilidade. Esta foi precisamente a tarefa do Centro de Tecnologia e Sociedade da Universidade Técnica de Berlim, que foi estabelecida em meados dos anos 1990 (Ohlhorst e Schön, 2015).

A tarefa se tornou mais difícil pelas diferenças fundamentais na cultura científica que existia entre engenheiros e cientistas sociais – diferenças que tornaram a cooperação quase impossível: enquanto engenheiros tendem a estar mais orientados para soluções em seu trabalho, cientistas sociais são mais orientados para o conhecimento; enquanto engenheiros sentem-se impedidos pela bagagem teórica dos cientistas sociais (muita conversa), estes consideram os engenheiros como sendo pessoas de pouca reflexão (visão de túnel).

De um ponto de vista cognitivo, essas diferenças frequentemente levam à divisão na produção do conhecimento ao longo de linhas disciplinares, e do ponto de vista social para as equipes da pesquisa simplesmente se colocando uns acima dos outros.

Fazia-se necessário um método que permitisse a preservação dos interesses epistêmicos, trabalhando práticas e métodos de acordo com as diferenças existentes nas culturas científicas e disciplinares, trazendo juntos a experiência e o conhecimento para adquirir resultados comuns. A questão era, portanto, que conjunto metodológico de ferramentas poderia possibilitar a colaboração construtiva que preservaria as particularidades disciplinares, ao mesmo tempo unindo as culturas científicas das ciências da engenharia, ciências naturais, ciências sociais e humanas.

Por volta da virada do milênio, um grupo de trabalho heterogêneo do Centro de Tecnologia e Sociedade aceitou esse desafio metodológico e, por necessidade, desenvolveu a AC como uma abordagem funcional muito prática para a integração cognitiva de métodos diferentes,

resultados parciais e corpos de conhecimento. O conceito-chave integrante da técnica é a visualização de vários elementos – atores sociais, elementos técnicos e naturais, símbolos – e sua respectiva interação dentro de constelações específicas.

Esse mapeamento gráfico permite que as constelações sejam inicialmente capturadas em toda a sua complexidade, depois do que elas podem ser gradualmente reduzidas, através de processos de discussão interdisciplinares e transdisciplinares, aos elementos e relações essenciais.

A representação gráfica conseguiu não apenas convencer os engenheiros a participar, mas também trouxe uma melhoria fundamental na cooperação com atores que têm experiências práticas em projetos de pesquisa transdisciplinares: ela permite uma representação e discussão estruturada das descobertas científicas altamente complexas, a identificação de pontos de consenso e discordância por parte dos vários participantes e o desenvolvimento conjunto de áreas estratégicas de ação e pacotes de medidas.

Objetivo e função da Análise de Constelação

Segundo Schön *et al.* (2007), a técnica não é apenas uma abordagem analítica, mas é também uma metodologia discursiva, porque o objetivo da AC é desobstruir processos de pesquisa e inovação para diferentes perspectivas considerando problemas, corpos de conhecimento e abordagens para solução de problemas praticados por cientistas, especialistas e interessados.

O foco da AC se direciona a tudo o que é relevante, fatores materiais e não materiais de influência que estão relacionados a uma inovação ou problema particular. Esses incluem fatores sociais, institucionais, técnicos, ambientais e espaciais, bem como sua correlação com cada um dos outros.

O objetivo é o delineamento de uma arquitetura do sistema (constelação) em que os elementos heterogêneos são ligados uns aos outros baseado em suas funções, que podem mudar a qualquer tempo. A falta de ligações entre elementos é também uma informação relevante. Os elementos centrais e suas relações são identificados e visualizados pelo mapeamento das constelações e, baseado nesse mapeamento, o conhecimento disciplinar é integrado em um processo discursivo.

Os resultados são mapeamentos ajustados de problemas complexos, em que padrões podem ser identificados, passíveis de serem compartilhados por todas as partes envolvidas no processo de pesquisa.

A questão orientadora como ponto determinante para o desenho dos limites

O ponto de partida para a aplicação da AC é a formulação de um problema ou uma questão que permite que os elementos relevantes para o problema sejam definidos e dispostos em relação aos outros. Diante da experiência da questão comum ou problema, a equipe concorda em um discurso sobre que elementos devem ser incluídos na constelação e como eles devem ser posicionados. Isto também determina os limites da constelação.

O conteúdo de uma constelação pode apenas ser estabelecido através da finalidade pretendida (pergunta ao alcance) que ela persegue – uma avaliação da constelação que objetiva seu completo balanço é quase impossível, além de não ter muita utilidade. Um valor central da representação da constelação é que ela ressalta as relações relevantes dos elementos identificados dentro do significado da questão orientadora.

Tecnologia e Etapas do Trabalho

Dentro da estrutura da AC, quatro tipos de elementos são distinguidos (Fig. 20). O elemento denominado “atores” se refere a pessoas ou grupo de atores (como, por exemplo, instituições ou organizações); o símbolo “elementos técnicos” retrata os artefatos (elementos técnicos, equipamentos, estruturas, procedimentos etc.); “elementos naturais” se referem a materiais, recursos naturais, meio-ambiente, plantas e animais, o relevo ou um fenômeno natural; e o elemento denominado “símbolos” significa conceitos, ideologias, padrões, leis, normas, discursos, bem como fatores institucionais, legais ou econômicos.



Figura 20 – Representação gráfica dos elementos da AC (Paula *et al.*, 2014).

Os objetos de pesquisa (por exemplo, tecnologia específica, atores, relevo, leis etc.) das disciplinas participantes são representados no mapeamento da constelação por essas categorias de elementos. Eles fornecem ligações com todas as disciplinas científicas (ciências

naturais, engenharia, ciências sociais etc.), bem como com os participantes não-científicos, e permitem uma incorporação de suas próprias perspectivas. A AC desempenha assim o seu papel como um conceito-ponte, pois consegue unir visões diferentes acerca de um mesmo objeto.

Na aplicação da técnica, tem sido mostrado que uma diferenciação maior dessa tipologia de elementos não melhora a funcionalidade da metodologia. A técnica é idealmente realizada em três etapas: Mapeamento da Constelação, Análise e Interpretação das Características e Análise do Processo de Mudança.

Mapeamento da Constelação

A etapa inicial do trabalho identifica aqueles elementos que caracterizam o problema particular que se quer estudar. Cada constelação foca naquelas forças diretoras que são consideradas centrais.

Esse núcleo da constelação pode ser destacado com um círculo. A proximidade espacial ou a distância entre os elementos mostra o grau de intensidade da relação entre os mesmos, que pode ser direta ou indireta, de oposição, de conflito, ou mesmo indeterminada.

Uma relação de conflito significa que um elemento, explícita e intencionalmente, age contra um ou vários outros elementos; uma relação de oposição, por sua vez, significa que um elemento oferece, de forma passiva e não explicada, resistência às expectativas ou atribuições de outros. Na representação gráfica da constelação, as relações entre os elementos são mostradas por linhas correspondentes ou tipo seta (Fig. 21).

As relações entre os elementos não são necessariamente rígidas no sentido de mensurabilidade; em vez disso, o indicador é o relacionamento empiricamente determinado. As descobertas das diferentes disciplinas e parceiros profissionais envolvidos no projeto de pesquisa formam a base de dados para a AC. Uma vez que as diferentes disciplinas utilizam diferentes métodos científicos de coleta de dados, a base de dados para a técnica apresenta diferentes formatos.

Finalmente, a constelação recebe um nome. Essas etapas são realizadas pela equipe responsável pela aplicação da AC, cuja composição pode ser tanto interdisciplinar quanto transdisciplinar por natureza. A relevância dos elementos e relações é desenvolvida através do discurso, fruto de uma análise interpretativa.

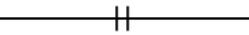
Relação	Representação	Características
Simple		Dois elementos estão simplesmente interligados
Direcionada		Um elemento atua sobre o outro
Conflituosa		Existem conflitos explícitos e intencionais entre dois ou mais elementos
Resistência		Indica resistência contra uma expectativa ou atribuição de outros elementos
Incompatível		Dois ou mais elementos são mutuamente incompatíveis
Recorrente		Dois elementos são inter-relacionados mutuamente intensificados

Figura 21 – Representações gráficas das relações da Análise de Constelação (Costa, 2018).

A respectiva constelação está inserida em um contexto. As condições do contexto se referem às condições gerais da estrutura com uma relevância significativa para a sociedade como um todo, e que têm uma influência não apenas sobre os elementos individuais dentro da constelação, mas também sobre a constelação completa (por exemplo, mudanças políticas, catástrofes ou eventos que afetem a percepção do problema). Eles formam a experiência que conduz ou restringe certos desenvolvimentos.

Um princípio conceitual central na AC é que os elementos heterogêneos que integram a constelação são considerados equivalentes. Isso se destina a prevenir uma diferenciação prematura entre os tipos de elementos. Esse princípio é também destinado a facilitar a cooperação entre os parceiros como iguais (Feldhoff *et al.*, 2019).

O núcleo metodológico da AC é o mapeamento dos fatores relevantes para a questão ao alcance, bem como de suas relações recíprocas. As ilustrações são empiricamente garantidas; elas são baseadas nas fontes e no conhecimento dos cientistas envolvidos e, se necessário, na experiência (expertise) dos profissionais parceiros.

Análise e Interpretação das Características

Uma segunda etapa do trabalho determina os princípios de acordo com os quais a constelação funciona (princípios funcionais) e as características e particularidades que ela exibe (características).

A constelação não é autoexplicativa, mas sempre necessita uma descrição textual. Imagem e texto se complementam, compensando, assim, suas respectivas deficiências: enquanto o mapeamento força uma concentração sobre os principais fatores influenciadores e suas

relações, a análise textual e interpretação põem ênfase maior sobre a complexidade que existe na realidade. Não apenas a representação gráfica, também a interpretação das constelações acontece em um processo de negociação discursiva sobre a melhor representação da realidade.

O modelo da constelação não reflete a íntegra da realidade, mas a compreensão das perspectivas dos participantes sobre aquela realidade. O modelo promove, assim, a compreensão interdisciplinar e transdisciplinar. É essencial, portanto, fazer as respectivas reduções e abstrações na construção da observação científica explícita e transparente, isto é, em uma linguagem que é concebida para ser acessível a todas as disciplinas.

Análise do Processo de Mudança

A terceira etapa envolve o processo de mudança que afeta ou poderia afetar a constelação. Questões cruciais para apresentar retrospectivamente são: O que mudou, e de que maneira? O que deflagrou as mudanças? Quando e como as mudanças tiveram lugar? E as questões para apresentar prospectivamente são: Quais elementos poderiam mudar a constelação no futuro, e de que forma? A análise olha o quão estável é a constelação e o que poderia possivelmente desestabilizá-la. De um lado, ela foca na história prévia (retrospectivamente). Por outro, ela tenta antecipar desenvolvimentos futuros, e no processo pergunta quais elementos precisam ser mudados em uma constelação, objetivando atingir certas metas ou implementar estratégias (prospectivamente).

Em geral, tanto a perspectiva retrospectiva quanto a prospectiva olham para os processos sociais de mudança e transformação, que não estão limitados a inovações técnicas. O foco da AC está na interação dos fatores de influência através de períodos cronológicos mais longos. Quando se trata da transformação ativa, o foco é nas possibilidades de intervenção nesta interação nos modos que têm um efeito de direção.

Essas três etapas, que se constroem uma sobre a outra, são misturadas no trabalho prático da AC e representam processos iterativos que podem ser repetidos em ciclos. É importante que todos os três estágios sejam executados pelo menos uma vez.

Algumas aplicações anteriores da técnica AC

Desde que foi concebida no início dos anos 2000, a técnica AC já foi aplicada em alguns países em estudos realizados em diversos campos de atividades, principalmente

relacionados a recursos hídricos, meio ambiente e energia. Costa e Silva (2016) apresentam algumas dessas aplicações na Alemanha e no Brasil, dentre as quais figuram:

- Reuso de equipamentos eletrônicos. Utilização da AC para descrever a situação encontrada sobre a reutilização de computadores na Alemanha, objetivando desenvolver estratégias para aumento de sua vida útil, a partir da perspectiva do desenvolvimento sustentável (Schön et al., 2004).
- Energias renováveis. Estudo sobre a evolução histórica da inovação tecnológica com uso da energia renovável (biogás, energia fotovoltaica, energia eólica, energia geotérmica e hidrelétrica) na Alemanha (Schäfer et al., 2010, Bruns et al., 2011, Bruns e Ohlhorst 2011, Haack et al. 2014 e Best, 2015).
- Utilização de fontes renováveis de energia. Estudo sobre o desenvolvimento da energia eólica na Alemanha (Schäfer et al., 2010).
- Redes agroalimentares. Pesquisa com o objetivo de desenvolver estratégias e instrumentos para contratos públicos de alimentos orgânicos para jovens na Alemanha (Nolting, Loes e Strassner, 2009 e Burandt et al., 2013).
- Uso sustentável da água e do solo. Desenvolvimento de uma gestão integrada da terra através do uso sustentável da água e utilização de materiais no Nordeste da Alemanha (Schön e Wendt-Schwarzburg, 2009 e Kröger, Rückert-John, Schäfer, 2012).
- Gestão integrada das bacias hidrográficas. Estudo sobre a gestão da terra sob os aspectos da governança e controle governamental, além de elementos relacionados à gestão da terra, aquicultura, irrigação, água potável, entre outros temas, na área do reservatório de Itaparica, Rio São Francisco, Brasil (Rodorff et al., 2013).
- Governança da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando as Constelações realizadas ao longo do Projeto INNOVATE (Rodorff et al., 2016).
- Governança de perímetros públicos de irrigação de base familiar no semiárido do nordeste do Brasil (Melo, 2015)

Outros estudos utilizando a técnica AC também foram mais recentemente realizados no Brasil, como é o caso, por exemplo, do planejamento estratégico e integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Gramame, Paraíba, Brasil (Costa et al., 2021), bem como acerca do uso e ocupação do solo e da água nas margens do reservatório Poço da Cruz, Ibimirim, Pernambuco, Brasil (Aguiar, 2019).

4.2 METODOLOGIA UTILIZADA NA PESQUISA

Após a elaboração e aprovação do Plano da Dissertação, teve início a fase de revisão bibliográfica e revisão documental, cujo objetivo principal foi identificar o atual estado da arte relativo ao projeto, construção e operação de barragens de rejeitos de mineração, bem como caracterizar a Barragem de Rejeitos do Fundão, no que diz respeito aos seus aspectos físicos e locais, além de apresentar, através da análise de seu histórico operacional, os problemas ocorridos ao longo da vida da barragem, que teriam de certa forma criado as condições para o seu rompimento em novembro de 2015.

De posse das informações obtidas através dessa ampla pesquisa, foram enviados, através de e-mail e após um primeiro contato telefônico, convites para diversos profissionais, especialistas, professores, peritos e atores envolvidos com o rompimento da Barragem do Fundão e com a segurança de barragens de mineração, para participação em entrevistas, com no máximo 1 (uma) hora de duração, realizadas na modalidade *On Line* (modelo do Convite no Apêndice A), as quais, com vistas à posterior aplicação da técnica Análise de Constelação, foram realizadas a partir de uma pergunta norteadora, através da qual foram colhidas as visões de todos os participantes a respeito do objeto de estudo. No caso da presente pesquisa, a questão proposta foi:

O que podemos fazer para evitar novos casos de ruptura de barragens de rejeitos de mineração?

Outras questões subsidiárias também importantes para a aplicação da técnica Análise de Constelação foram abordadas nas entrevistas, tais como: a) a identificação dos principais atores envolvidos com o projeto, construção, operação e fechamento de barragens de rejeitos de mineração e os principais tipos de relação existentes entre eles; b) identificação dos principais elementos técnicos e naturais que têm relação direta com essas estruturas de disposição de rejeitos; c) identificação dos símbolos (de acordo com a definição utilizada na técnica AC) relacionados a barragens de rejeitos de mineração.

Juntamente com os convites para as entrevistas, foi enviado aos participantes um texto contendo explicações acerca da técnica AC. Foram entrevistados, no período de 17/03/2022 a 13/05/2022, os seguintes profissionais:

- a) Três (03) Peritos da Polícia Federal com formação em Engenharia Civil e Geologia que atuaram no caso do rompimento da barragem do Fundão, em Mariana/MG;

- b) Integrante do corpo técnico do Ministério Público Federal – MPF, com formação em Geologia, que também atuou no mesmo caso;
- c) Integrante do corpo técnico do Ministério Público de Minas Gerais – MPMG, que atua na área de segurança de barragens de mineração;
- d) Integrante do corpo técnico da Agência Nacional de Mineração – ANM, que atua na área de segurança de barragens de mineração;
- e) Integrante do corpo técnico da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais – FEAM/MG, com formação em Geografia, que atua no monitoramento das consequências ambientais dos desastres de Mariana e de Brumadinho;
- f) Representante da Defesa Civil do Município de Mariana/MG, que atuou no socorro aos atingidos pelo desastre de Fundão;
- g) Diretor técnico de empresa de consultoria, Doutor em Geotecnia, que trabalha para diversas mineradoras no Brasil e no Exterior;
- h) Professores da área de Geotecnia de 03 (três) Universidades, sendo duas do Brasil e uma de Portugal, dois dos quais prestam também consultoria para empresas e órgãos governamentais.

Apesar de terem recebido o convite, não participaram das entrevistas os representantes da empresa SAMARCO Mineração S/A e das entidades representantes das vítimas (Movimento de Atingidos por Barragens – MAB e Movimento dos Atingidos pela Mineração – MAM). Entretanto, a visão dos mesmos acerca do rompimento de barragens de rejeitos foi parcialmente reproduzida nos discursos de alguns entrevistados, como os consultores, que trabalham junto às empresas mineradoras, e a Defesa Civil, que mantém um contato mais direto com a população atingida, sendo muitas vezes um canal para suas reivindicações, bem como através da pesquisa bibliográfica realizada.

Foi acordado com os entrevistados que suas identidades seriam preservadas, razão pela qual seus nomes não constam do texto da presente dissertação de Mestrado. As entrevistas foram gravadas (algumas somente em áudio e outras em áudio e vídeo) somente para uso do autor, por ocasião da análise interpretativa das informações coletadas.

A partir do registro das gravações realizadas, foram elaborados resumos das entrevistas, nos quais, além das contribuições de cada um dos entrevistados à resposta da questão norteadora proposta, foram identificados os principais atores, elementos técnicos, elementos naturais e símbolos (de acordo com as definições da técnica AC) citados pelos mesmos, bem como as principais relações existentes entre esses elementos, de acordo com as diversas

percepções e visões do problema apresentadas. Ao final, os dados foram tratados de forma agrupada, no intuito de se chegar aos resultados da pesquisa.

Em face da dificuldade de se reunir numa mesma seção todos os entrevistados, que residem em diversos estados do Brasil e também em Portugal, seja em virtude da impossibilidade de se encontrar uma data comum viável, seja pela resistência de alguns em participar de uma discussão pública sobre assunto tantas vezes polêmico, optou-se por construir a Constelação (representação gráfica), um dos produtos da técnica de análise utilizada, a partir apenas das entrevistas individuais, as quais foram bastante proveitosas, pois, além de se sentir mais à vontade para falar de pontos às vezes delicados, cada entrevistado teve a oportunidade de expor a sua visão sobre o rompimento de barragens de rejeitos e suas causas por cerca de 1 (uma) hora.

Posteriormente, algumas afirmações feitas nas entrevistas que não puderam ser consideradas como opinião da maioria, porque não haviam sido abordados por todos os participantes, foram encaminhadas, através de e-mail, a todos os entrevistados, a fim de que os mesmos manifestassem a sua concordância ou não acerca dos pontos abordados, permitindo assim a avaliação do grau de consenso existente. A Matriz de Consenso, contendo as respostas dos participantes para os 16 (dezesesseis) pontos submetidos, encontra-se no Apêndice B.

Trata-se, na verdade, da adaptação da técnica de análise a uma situação especial, em que houve, de fato, um ganho na qualidade das informações coletadas, e que foi possível graças às facilidades de se realizar reuniões por videoconferência, que passaram a ser bastante utilizadas em face do necessário isolamento social durante a pandemia de covid-19.

Este procedimento apresenta similaridade com aquele utilizado na técnica DELPHI, que é caracterizada por uma sequência de rodadas que contempla o envio dos questionários aos especialistas e o retorno dos mesmos ao grupo de pesquisadores. No método são realizadas consultas sucessivas com vistas à obtenção de consenso ou maioria nas decisões (Duarte e Piffer, 2020).

Como a Constelação, apesar de importante na identificação dos tipos de relação existentes entre os diversos atores e elementos envolvidos no problema em estudo, não é autoexplicativa, necessitando de um texto que a complemente, passou-se então à segunda fase da aplicação da técnica, que consistiu na realização de uma análise interpretativa acerca das diversas relações e interações existentes entre os atores envolvidos, elementos técnicos, elementos naturais e símbolos (conceitos, normas, legislação etc.).

Essa análise teve por objetivo rastrear, a partir de uma visão multidisciplinar, construída com base nas exposições realizadas pelos entrevistados, as causas técnicas e gerenciais do rompimento da Barragem do Fundão, que podem, de maneira geral, ser extrapoladas para outros eventos de rompimento de barragens de rejeitos, com vistas à prevenção de novos desastres semelhantes, o que foi um consenso entre os entrevistados.

A Fig. 22 apresenta graficamente o roteiro metodológico utilizado no presente trabalho de pesquisa.

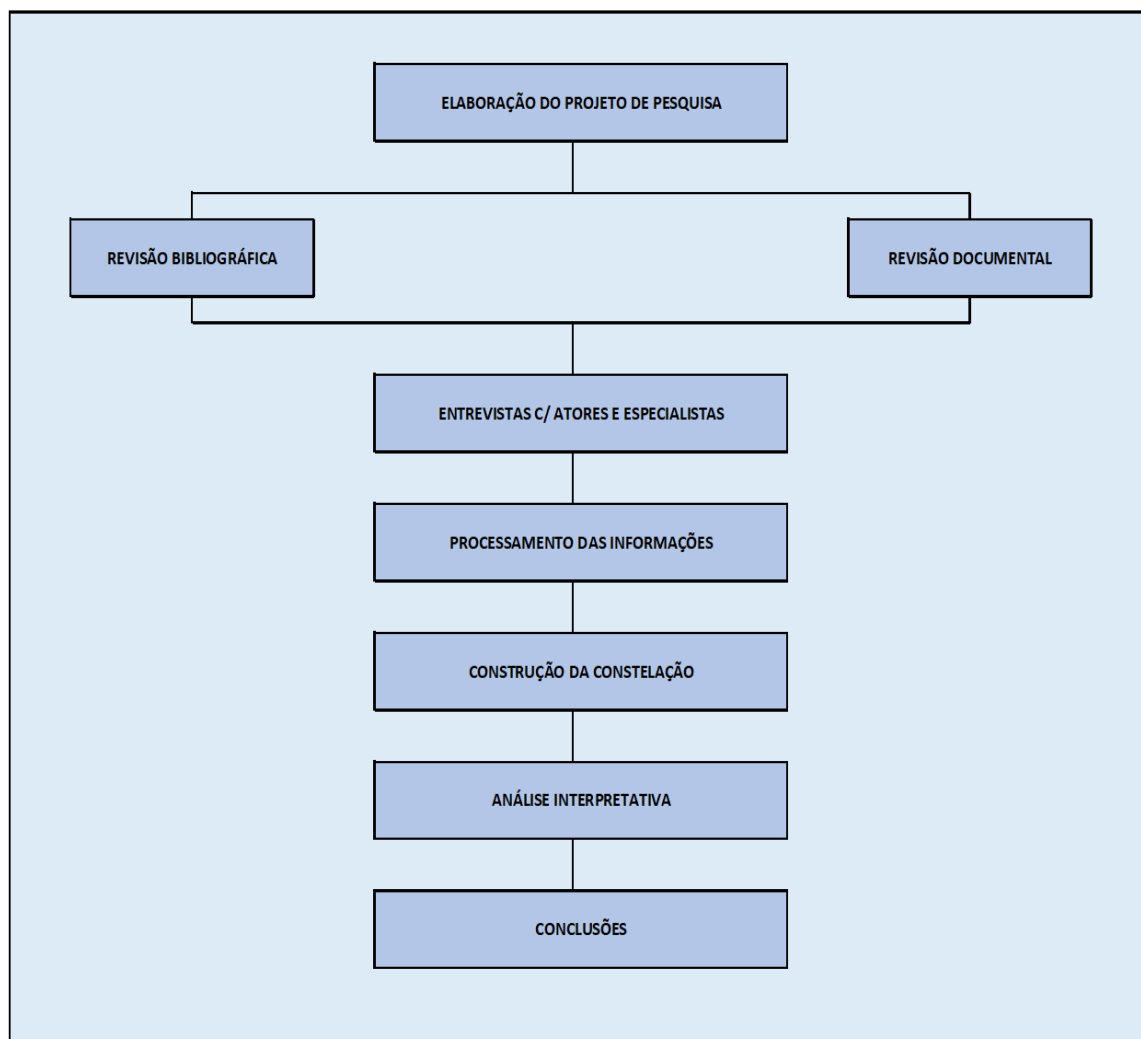


Figura 22 – Roteiro Metodológico adotado na presente pesquisa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A construção da Constelação a partir das entrevistas

A construção da constelação foi realizada com base nas informações colhidas por ocasião das entrevistas realizadas com alguns dos atores envolvidos, peritos que trabalharam na investigação das causas do desastre de Fundão, bem como com especialistas em geotecnia, segurança de barragens de mineração e em ciências ligadas ao meio-ambiente.

A Tabela 05 apresenta os elementos (atores, símbolos, elementos naturais e elementos técnicos) citados pelos entrevistados durante suas explanações, objetivando responder à questão norteadora: *O que podemos fazer para evitar novos casos de ruptura de barragens de rejeitos de mineração?* Foram citados 15 atores, 8 símbolos, 5 elementos técnicos e 4 elementos naturais.

A constelação obtida a partir das entrevistas pode ser visualizada na Fig. 23.

Tabela 05 – Elementos citados nas entrevistas com atores, peritos e especialistas.

Tipo de Elemento	Elementos Citados nas Entrevistas	
Atores	Companhia Mineradora Empresas de Consultoria Auditores Externos Escritórios de Projeto Técnicos da Mineradora Universidades Políticos Fundação Renova	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM/MG Agência Nacional de Mineração – ANM Ministério Público Defesa Civil População Atingida Movimentos Sociais (MAB e MAM)
Símbolos	Legislação Ambiental Legislação de Barragens Normas Técnicas Mercado	Metodologia de Cálculo Tecnologia de Construção Plano de Emergência – PAEBM Gestão de Riscos
Elementos Naturais	Geomorfologia do local Precipitação Pluviométrica	Sismos Meio Ambiente
Elementos Técnicos	Barragem de Rejeitos Atividade Minerária (Lavra) Usina de Beneficiamento	Sistema de Drenagem Operação da Barragem

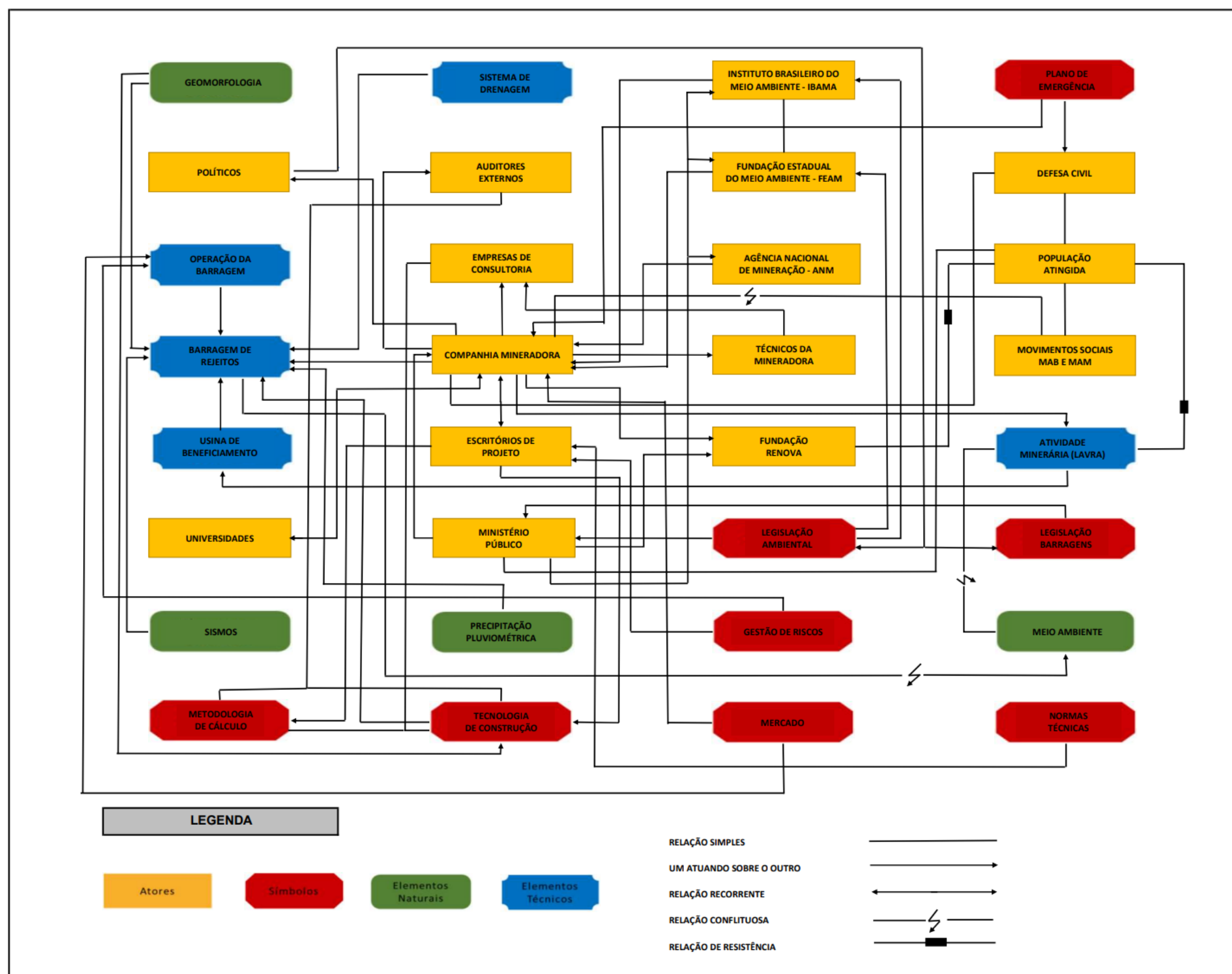


Figura 23 – Constelação construída a partir das entrevistas com atores, peritos e especialistas. Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Resultados obtidos a partir da Constelação Construída

Com base na constelação construída a partir das entrevistas, foi possível, num primeiro momento, identificar os atores, elementos naturais, elementos técnicos e símbolos relacionados com o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG, e, numa fase posterior, considerando as informações e as visões do desastre fornecidas por cada entrevistado, individuar, com foco nas medidas necessárias à prevenção de novos eventos semelhantes, as principais causas do desastre objeto da pesquisa.

Atores identificados

No que diz respeito aos atores relacionados ao rompimento da barragem, identificou-se um primeiro núcleo constituído pela empresa mineradora, pelo projetista da barragem, pelos técnicos da mineradora, pelas empresas de consultoria e pelos painéis de especialistas (auditores externos), aos quais incumbe realizar as atividades ligadas à gestão técnico-administrativa da barragem de disposição de rejeitos.

De forma semelhante, foram identificados outros atores que juntos representam o Estado no acompanhamento e fiscalização das atividades relacionadas com a disposição de rejeitos de mineração. Esse núcleo, no caso em estudo, e de acordo com os dados colhidos nas entrevistas, é formado pela Agência Nacional de Mineração-ANM, pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis-IBAMA e pela Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais-FEAM.

Além desses dois primeiros núcleos, foi constatada ainda a existência de um terceiro núcleo, constituído basicamente pelos atores que sofreram as consequências socioeconômicas e ambientais do desastre e pelos que lutam para que se faça justiça aos atingidos. Integram esse núcleo a população atingida, os movimentos sociais, em especial o Movimento de Atingidos por Barragens-MAB e o Movimento dos Atingidos pela Mineração-MAM, os órgãos da Defesa Civil, além do Ministério Público, a quem cabe defender os interesses da sociedade e a fiel observância da Lei.

Outros atores foram ainda citados nas entrevistas, os quais, embora não fazendo parte de nenhum dos três núcleos supramencionados, são de grande importância na produção e difusão do conhecimento para a construção de barragens de rejeitos seguras e na evolução da legislação e tomada de decisões acerca da segurança dessas estruturas. São eles as Universidades e os Políticos.

Elementos naturais identificados

Com relação aos elementos naturais que exercem influência sobre as barragens de rejeitos de mineração, de acordo com os dados coletados nas entrevistas, foram identificados o meio-ambiente (meios físico, biológico e socioeconômico), as precipitações pluviométricas, os sismos (naturais e induzidos) e a geomorfologia do local da barragem.

Elementos técnicos identificados

Os elementos técnicos relacionados à disposição de rejeitos de mineração citados pelos entrevistados foram, em primeiro lugar, a barragem de rejeitos, como centro de toda a discussão, depois a atividade minerária (lavra), a usina de beneficiamento, o sistema de drenagem da barragem e, por fim, a operação da barragem (aspectos técnicos e de gestão).

Símbolos identificados

No que se refere aos símbolos (conforme definidos na técnica AC) relacionados a barragens de disposição de rejeitos, tem-se a legislação e normas técnicas aplicadas a barragens de rejeitos de mineração, a legislação ambiental, o estado da arte da tecnologia de construção de barragens de rejeitos, a metodologia de cálculo de estabilidade, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM, a Gestão de Riscos e, finalmente, os aspectos econômicos, estes representados basicamente pelas leis de mercado.

Relações identificadas entre os diversos elementos

No que se refere aos atores envolvidos, um dos pontos levantados pela grande maioria dos entrevistados é o fato de que as barragens de rejeitos são geralmente vistas pelas mineradoras como passivos, representando apenas despesas. Assim, há uma relutância por parte de muitas empresas em realizar os investimentos necessários à segurança dessas estruturas, promovendo muitas vezes o contingenciamento dos orçamentos das equipes técnicas responsáveis por sua operação e manutenção.

Enquanto as barragens para acumulação de água sempre tiveram à disposição as melhores técnicas de engenharia e os profissionais mais capacitados, as barragens de rejeitos, até um passado bem recente, eram tratadas como a “lixreira da mineração”, sem fazer jus a muitos investimentos, sendo geridas geralmente pelos técnicos da área de mineração, que não detinham os conhecimentos necessários para lidar com os problemas estruturais surgidos, que dizem respeito mais especificamente à área de engenharia geotécnica.

Outro aspecto importante mencionado pela maioria dos entrevistados foi que as empresas de consultoria são em muitos casos controladas pelas mineradoras que as contratam, não tendo, portanto, muita autonomia para apontar erros na gestão das barragens de rejeitos e, quando o fazem, buscam amenizar a gravidade dos problemas constatados, com receio de contrariarem os interesses econômicos da contratante e serem substituídas por outras empresas.

Os relatórios técnicos produzidos pelos consultores passam primeiramente pelo crivo da equipe técnica da contratante e, mesmo que apontem falhas graves que deveriam ser comunicadas imediatamente às autoridades, são modificados no sentido de evitar-se a paralização da atividade produtiva da mineradora. Essa situação, entretanto, vem mudando após os desastres de Fundão e Brumadinho, principalmente com o advento do SIGBM.

O mesmo acontece com as auditorias externas, que são também contratadas pela própria mineradora, que tem acesso em primeira mão aos resultados das inspeções e, portanto, exerce o poder de censura sobre a divulgação de suas conclusões, já que as mesmas podem ter implicações sobre a continuidade da atividade minerária. A maioria dos entrevistados defende, inclusive, que a contratação dessas auditorias deveria ser acompanhada de perto pelo poder público, mesmo que custeadas pelas empresas.

Ainda com relação às consultorias, como há muitas vezes, por parte das empresas mineradoras, a priorização do lucro em detrimento da segurança das estruturas de disposição de rejeitos, que as levam a cortar gastos da área de geotecnia, os serviços de consultoria passaram, dentro de uma estratégia de redução de custos, a ser contratados levando-se em consideração prioritariamente o menor preço cobrado pelos consultores, o que, segundo a maior parte dos entrevistados, teve uma péssima influência sobre o desempenho operacional das barragens.

Assim, têm sido contratadas empresas de consultoria que, a despeito de terem um quadro de técnicos com boa formação acadêmica, detêm pouca experiência nas questões relativas ao comportamento geotécnico das barragens. Os profissionais são bastante qualificados na operação de softwares de modelagem geotécnica, mas carecem de experiência para analisar os resultados obtidos, o que leva, muitas vezes, a erros grosseiros e interpretações equivocadas das condições de estabilidade das estruturas.

Por outro lado, painéis de especialistas contratados pela empresa mineradora Samarco para assessorá-la no gerenciamento técnico de suas barragens de rejeitos, teriam sido, segundo a maioria dos entrevistados, omissos com relação aos graves problemas surgidos com a barragem

de Fundão, pois nada teriam feito para solucioná-los, apesar de terem conhecimento de sua existência.

A maioria dos entrevistados que participaram da investigação das causas técnicas do rompimento da barragem de Fundão apontou alguns erros cometidos na gestão técnico-administrativa do sistema de rejeitos como um todo, que ocasionaram uma série de problemas operacionais que teriam contribuído para o colapso da estrutura. Os principais erros apontados foram:

- a) Omissões de projeto, como, por exemplo, a desconsideração da interferência da drenagem de uma pilha de estéreis existente no local sobre a barragem de Fundão, bem como a falta de uma análise mais aprofundada com relação às cargas dinâmicas, em especial a possibilidade de ocorrência de sismos naturais ou induzidos na área;
- b) Falhas construtivas que levaram à inutilização dos drenos de fundo ainda no início da operação da barragem, obrigando a mudanças na concepção do projeto, com a construção de um tapete drenante, que viria a se mostrar insuficiente para promover a drenagem eficiente da água presente nos rejeitos depositados;
- c) Falhas operacionais, como, por exemplo, a deposição conjunta de lama e rejeito arenoso no mesmo reservatório, contrariando uma das principais premissas de projeto, bem como o controle deficiente do processo de disposição dos rejeitos por espigotamento, gerando uma segregação que dificultava a drenagem interna;
- d) Desrespeito à largura mínima da praia de rejeitos prevista no projeto, permitindo que a superfície freática, em diversas ocasiões, se aproximasse do barramento;
- e) Excesso de produção de rejeitos, principalmente lamas, em relação à capacidade de armazenamento da barragem;
- f) Adoção, na prática, de uma taxa de alteamento da barragem superior à recomendada na literatura e àquela prevista no projeto;
- g) Instalação de instrumentos de monitoramento de má qualidade e em quantidade insuficiente;
- h) Alteração da conformação geométrica da barragem, mediante a execução de um recuo no seu eixo, sem a elaboração de qualquer projeto, sem licenciamento ambiental, bem como sem a implantação de um sistema de monitoramento após a sua execução.

Nesse sentido, uma preocupação foi expressa pela maioria, a partir da opinião inicialmente expressa por alguns entrevistados, também com relação à situação dos técnicos pertencentes aos quadros das próprias empresas mineradoras, que, segundo os mesmos, sofrem

uma pressão muito grande para que a operação dos sistemas de disposição de rejeitos não seja interrompida, levando-os a trabalhar com planejamento mínimo, o que aumenta a probabilidade de falhas.

No caso de Fundão, as diversas falhas ocorridas ao longo da vida operacional da barragem não teriam sido – segundo concorda a maioria dos entrevistados – por incapacidade técnica, pois o corpo técnico da empresa tinha a exata noção da complexidade daquela estrutura e da situação na qual ela se encontrava. Havia, entretanto, uma sujeição às questões de natureza econômica, dentre elas a necessidade de manter a unidade operando a qualquer custo, que levaram a área técnica a assumir os riscos associados à operação de um sistema de disposição que já apresentara tantos problemas desde o início de seu funcionamento.

A despeito da inegável capacidade dos quadros técnicos das empresas mineradoras, a maioria dos entrevistados mencionou a existência de uma certa “arrogância técnica” por parte dos mesmos, manifestada numa resistência a considerar opiniões e críticas, mesmo construtivas e fundadas, acerca de condutas operacionais adotadas, ou no sentido de reconhecer erros cometidos na gestão técnico-administrativa das barragens.

Outra constatação expressa pela maioria dos entrevistados, concordando com afirmação feita em algumas entrevistas, é a respeito da influência que as grandes empresas mineradoras exercem naturalmente em diversos setores da sociedade, como, por exemplo, sobre as universidades, financiando pesquisas e contribuindo para a formação de mão de obra qualificada para atuar na mineração; na produção das normas técnicas, mediante a participação de seus representantes nas câmaras técnicas responsáveis por sua elaboração; no processo legislativo em todas as esferas de poder, de forma a resguardar, na medida do possível, seus interesses; enfim, no mercado como um todo, pois a atividade minerária demanda uma enorme gama de outros bens e serviços, de naturezas as mais variadas.

Tudo isso gera, muitas vezes, conflitos de interesses, dificultando o controle do Estado sobre esse ramo da Economia, não somente no Brasil, mas em todo o mundo, uma vez que boa parte dos atores sociais nas áreas de influência da mineração (professores, consultores, comerciantes, políticos, empreiteiros etc.) está de certa forma ligada às empresas mineradoras.

Esse fato se manifesta, por exemplo, na dificuldade em se conseguir a colaboração de professores das universidades situadas nas áreas de influência da mineração na investigação das causas dos recentes desastres em Minas Gerais, pois muitos prestam serviços como consultores

para as empresas mineradoras ou têm seus projetos de pesquisa por elas financiados ou apoiados de alguma forma.

Entretanto, há praticamente uma unanimidade entre os entrevistados no sentido de que deve haver uma relação estreita entre as empresas mineradoras e as universidades, que são necessárias para melhorar tecnicamente o sistema, evitando-se assim novos desastres. Assim, o bom senso deve prevalecer na equalização da questão dos conflitos de interesse envolvendo o setor produtivo e a academia, uma vez que há benefícios mútuos nessa relação.

A maioria dos entrevistados concordou com a afirmação feita por parte deles acerca da relação muitas vezes existente entre as grandes empresas mineradoras e o mundo político, através do financiamento de campanhas, que foi classificada como prejudicial à efetividade do controle a ser exercido pelo Estado sobre a atividade minerária, pois é comum se ver atores políticos agindo em favor das companhias, seja no processo legislativo, seja no controle da fiscalização, ou mesmo “fazendo vista grossa” sobre os erros cometidos pelas empresas mineradoras.

A maioria dos entrevistados mencionou a escolha do método de alteamento a montante como um grande equívoco cometido na fase de projeto da barragem de Fundão, o qual já era internacionalmente reconhecido como inseguro, havendo, inclusive, uma recomendação, na versão da Norma Brasileira ABNT NBR 13028 publicada em 1993 (ABNT, 1993), no sentido de evitar-se a sua utilização. Essa recomendação seria retirada da referida norma na sua revisão de 2006 (ABNT, 2006). O projeto da barragem, no entanto, foi elaborado em 2005, na vigência, portanto, da versão anterior.

A escolha do referido método de alteamento, ainda segundo a maioria dos entrevistados, tornou-se, em face de seu menor custo, quase um padrão por parte das empresas mineradoras operando na região do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais, o que, durante cerca de 30 anos, esteve associado a diversos eventos envolvendo falhas ou rupturas de barragens de rejeitos. Somente após o desastre de Brumadinho, viria a ser definitivamente proibida a sua utilização no Brasil.

Outra questão de natureza técnica que obteve a concordância da maioria, e que foi levantada por especialistas entrevistados, foi a de que há uma deficiência dos programas computacionais para a realização de modelagem geotécnica, os quais não funcionam para muitas das situações reais envolvendo barragens de rejeitos, sendo comum também haver lacunas no histórico dessas estruturas, que são construídas ao longo do tempo, o que leva a imprecisões na estimativa dos parâmetros geotécnicos necessários à construção dos modelos.

Os métodos de cálculo de estabilidade também estariam defasados, segundo a maioria. Fatores de segurança, por exemplo, calculados através do método do Equilíbrio Limite, utilizando a razão de resistência de pico não drenada, seriam muito baixos, de forma que, levando os mesmos em consideração, boa parte das barragens de rejeitos existentes não estaria de pé. Faz-se necessário, assim, realizar análises de tensão-deformação das barragens de rejeitos, o que é inclusive recomendado pela Comissão Internacional de Grandes Barragens – ICOLD.

A maior parte dos atores e profissionais entrevistados defende que, à época do desastre de Mariana/MG, já se tinha um bom conhecimento acerca do fenômeno da liquefação nesses reservatórios, o que permitia a adoção de medidas para prevenir a ocorrência desse modo de ruptura da estrutura. Nessa linha de pensamento, a maior parte dos entrevistados foi categórica em afirmar que um desastre semelhante ao de Fundão não é imprevisível. Tudo é modelado matematicamente. O risco é calculado, transformado em um número (monetizado) e assumido.

Essa opinião, entretanto, não foi objeto de consenso, pois, segundo opinou parte dos entrevistados, estudos sobre liquefação de barragens de rejeitos estariam ainda muito incipientes até bem pouco tempo, tendo sido mais aprofundados a partir do desastre de Fundão, antes do qual as empresas de projeto ainda não conheciam muito bem os fatores que poderiam levar ao processo de ruptura por liquefação estática.

O papel desempenhado pelo então Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, principal entidade responsável pela gestão dos bens minerais no Brasil, também não foi objeto de consenso nas entrevistas, dividindo os entrevistados. Para a maioria, o órgão buscava desempenhar bem o seu papel na fiscalização da atividade minerária, esbarrando, no entanto, na sua falta de estrutura para fazer face às suas atribuições. Para parte dos entrevistados, ao contrário, aquele órgão colocava-se, via de regra, do lado das mineradoras, contribuindo, através de suas resoluções e portarias, para justificar os erros cometidos pelas empresas, com a inclusão de cláusulas que legitimavam posicionamentos técnicos equivocados por parte das mesmas.

A grande maioria concorda, por outro lado, com o fato de que, após os desastres de Mariana e Brumadinho, e até mesmo um pouco antes deles, em virtude da ruptura de uma barragem de rejeitos no município de Herculano/MG, ocorrida em 2014, o órgão, que foi transformado em agência em 2018, sob a denominação de Agência Nacional de Mineração – ANM, vem passando por um processo de estruturação, para fazer face aos novos desafios envolvendo barragens de rejeitos de mineração, e, segundo a opinião da maioria dos entrevistados, vem realizando um bom trabalho junto às mineradoras, aprimorando os seus

instrumentos normativos e sendo rigorosa na exigência da adoção de medidas que visem a melhorar a segurança dessas estruturas.

A maioria dos entrevistados concorda também no sentido de que, após os desastres de Mariana e Brumadinho, houve uma evolução da legislação e normas aplicáveis, aumentando as exigências com relação à segurança das barragens de rejeitos de mineração, mas ressalta que há ainda muitos aspectos a serem melhorados.

Essa evolução teria ocorrido mais no sentido da obrigatoriedade de se realizar inspeções de segurança e análises de estabilidade com uma periodicidade menor, exigindo inclusive melhores coeficientes de segurança. No entanto, há ainda a necessidade de se promover uma atualização dos métodos de cálculo de estabilidade e análise de risco, alinhando-os com as melhores práticas internacionais no setor minerário, mediante a introdução de métodos probabilísticos na definição dos parâmetros que irão alimentar as modelagens numéricas.

A maioria dos entrevistados defende, acatando a opinião de especialistas, que as empresas mineradoras devem ter um núcleo fixo de profissionais, liderados por alguém com bastante experiência, como, por exemplo, a figura do *Engineer of Record*, existente em empresas norte-americanas, responsável por realizar todos os registros acerca da vida operacional das barragens, que devem ficar disponíveis para todos os estudos que venham a ser realizados no futuro, evitando-se, assim, a perda de informações úteis à avaliação da segurança dessas estruturas de disposição de rejeitos, o que se tornou recentemente regra no Brasil a partir da publicação da Resolução ANM nº 95, de 07/02/2022 (ANM, 2022).

Outra questão também abordada pela maioria dos entrevistados foi o fato de que, após os desastres de Mariana e Brumadinho, em que o rompimento das barragens se deu por liquefação, algumas mineradoras, preocupadas com a ação de gatilhos dinâmicos, têm recorrido ao serviço de geofísicos para realizar a medição da atividade sísmica nas áreas das barragens de rejeitos, o que não tem nada de anormal, já que isso está dentro de suas atribuições.

Ocorre que, extrapolando os limites da sua formação, esses profissionais estariam também avaliando as condições de estabilidade das estruturas de disposição de rejeitos em face dos resultados obtidos nas medições, o que é atividade afeta à engenharia civil, considerando, inclusive, o fato de que os padrões de aceleração existentes na literatura são relativos a estruturas de concreto armado e não se prestam para barragens de rejeitos, o que, sem dúvida, conduz a conclusões equivocadas.

Uma questão não relacionada propriamente ao evento do rompimento da barragem do Fundão, mas ligada diretamente à remediação de suas consequências, também foi abordada pela maioria dos entrevistados. Ela diz respeito à Fundação RENOVA, entidade criada pelas controladoras da SAMARCO (Vale S/A e BHP) para promover a reparação dos danos causados pelo rompimento da barragem do Fundão, como resultado da celebração de um Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC) com o Ministério Público Federal (Renova, 2022).

Há uma queixa – segundo se apurou nas entrevistas e na revisão bibliográfica – por parte das entidades que representam a população afetada e dos órgãos governamentais em relação à entidade, que é controlada pela mineradora, no sentido de que a mesma estaria burocratizando a implementação dos programas sob sua responsabilidade, dificultando a reparação dos impactos ao meio ambiente e a indenização das vítimas do desastre. Essa opinião obteve a concordância da maioria dos entrevistados.

Com relação ao que pode ser feito para se evitar novos desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração, foram apresentadas pela maioria dos atores, peritos e especialistas entrevistados algumas medidas, que estão a seguir elencadas:

- 1) Explorar o minério de ferro em áreas onde há maiores teores de ferro, uma vez que o minério de ferro atualmente explorado em Minas Gerais, possuindo baixo teor de ferro, produz muito rejeito, exigindo a construção de barragens de grande porte;
- 2) Construir as barragens em locais adequados, evitando-se zonas geologicamente instáveis, zonas com presença de falhas e zonas de cisalhamento, fazendo-se a limpeza adequada do terreno, com a retirada de coluviões, aluviões, vegetação arbustiva e arbórea etc.;
- 3) Melhorar o relacionamento das empresas mineradoras com a comunidade e com a Defesa Civil. As empresas precisam estar mais presentes na vida da comunidade, inclusive investindo na melhoria da qualidade de vida da população. Caso contrário, não irão obter a adesão da comunidade para colocar em prática as medidas necessárias à sua própria segurança, como, por exemplo, a realização de simulados de situações de emergência;
- 4) Estruturação e capacitação da Defesa Civil para o exercício de suas atribuições, o que irá repercutir na prevenção da ocorrência de vítimas fatais dos rompimentos de barragens de rejeitos;

- 5) As mineradoras devem tratar as barragens de rejeitos como ativos da empresa, requerendo, portanto, constantes investimentos na sua segurança e operação eficiente;
- 6) Utilização dos novos métodos de cálculo de estabilidade, alinhados com as melhores práticas internacionais;
- 7) Confiar a gestão das barragens de rejeitos a profissionais qualificados para atuar diante de problemas estruturais que possam surgir ao longo da vida dessas estruturas;
- 8) Documentar todas as etapas da vida das barragens, devendo os registros serem cuidadosamente mantidos para serem oportunamente disponibilizados para todos os estudos, análises e avaliações que se façam necessários;
- 9) Atualizar a legislação e as normas técnicas com vistas a sua adequação aos novos paradigmas relativos às análises de estabilidade através de métodos de cálculo probabilísticos;
- 10) Continuidade do processo de estruturação das agências estatais para melhor exercerem as suas atribuições na fiscalização da atividade e mineração e seus potenciais impactos sobre o meio ambiente;
- 11) Redução gradativa da disposição de rejeitos de mineração em barragens, construídas através de qualquer um dos métodos existentes;
- 12) Incentivo à pesquisa e implantação de formas sustentáveis de reutilização dos rejeitos/resíduos gerados pela indústria, em especial, a indústria da mineração;
- 13) Tornar a matriz econômica nacional menos dependente da produção de commodities minerais (considerando o seu caráter não renovável e seu grande potencial poluidor).

Discussão acerca dos resultados obtidos

A análise da constelação construída a partir das visões de cada um dos entrevistados, acerca do problema dos desastres tecnológicos envolvendo barragens de rejeitos de mineração, tendo como objeto de estudo imediato o caso do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG, bem como das revisões bibliográfica e documental procedidas no decorrer da pesquisa, permitiu a identificação de diversas causas para o desastre e para suas consequências catastróficas, que possuem também – como se verá adiante – naturezas distintas.

Falta de integração entre os atores envolvidos

A primeira constatação que pôde ser realizada foi a de que não há uma integração entre os diversos atores envolvidos na busca de solução para os problemas relacionados ao projeto, construção e operação de barragens de rejeitos de mineração. Foram identificados alguns núcleos de atores – conforme anteriormente citado – que possuem um relacionamento mais próximo, como, por exemplo, aquele constituído pela empresa mineradora, pelo projetista da barragem, pelos técnicos da mineradora, pelas empresas de consultoria e pelos painéis de especialistas (auditores externos), os quais, mesmo internamente, nem sempre agem de forma coordenada e integrada, embora gravitem em torno da mineradora, que contrata os seus serviços.

Deslocando o foco para o núcleo que representa o Estado na sua ação fiscalizatória, ou seja, as agências governamentais responsáveis pela fiscalização da atividade minerária e das suas consequências sobre o meio ambiente, observou-se que a falta de integração é ainda maior, cada uma agindo de forma isolada, obrigando as empresas mineradoras a ampliar suas estruturas burocráticas, a fim de atenderem a exigências semelhantes, ou mesmo idênticas, formuladas por diferentes órgãos.

Nesse sentido, é comum as empresas terem que apresentar um mesmo documento técnico a dois ou mais órgãos, só que em formulários diferentes, como é o caso, por exemplo, das declarações de condição de estabilidade (DCE), apresentadas simultaneamente à ANM e ao órgão ambiental do ente federado – a FEAM, no caso de Minas Gerais. Essa situação, entretanto, tem melhorado consideravelmente com o advento do SIGBM, uma vez que as mineradoras alimentam diretamente o sistema com as informações acerca da segurança das barragens de rejeitos sob sua responsabilidade, evitando-se o trâmite de documentos físicos.

Subordinação demasiada da gestão técnica a interesses econômicos

Há, conforme apurado na pesquisa, uma subordinação das equipes responsáveis pela gestão das barragens, cujo trabalho possui natureza eminentemente técnica, aos interesses da empresa mineradora, que são, via de regra, motivados por questões de natureza econômica, uma vez que a atividade produtiva desenvolvida pela mesma está sempre voltada para o comportamento do mercado, com as suas inúmeras variáveis.

Assim, é comum que os aspectos econômicos sejam priorizados em detrimento das boas práticas da engenharia, comprometendo a segurança das estruturas de disposição de rejeitos. Um exemplo disso foi a adoção do método de alteamento a montante para a construção da barragem,

que já era reconhecidamente inseguro, mas que foi escolhido em função de seu baixo custo, quando comparado aos demais métodos.

A sua escolha demandaria maiores cuidados (e maiores gastos) com questões técnicas importantes, como o controle do processo de deposição dos rejeitos, disposição de material granular e lamas em diques separados, manutenção de praia mínima, eficiência do sistema de drenagem interna etc., mas o que se viu foi o contingenciamento dos recursos financeiros destinados à área responsável pela gestão técnico-administrativa da barragem, obrigando a equipe técnica a atuar de forma temerária, elevando os riscos de desastre.

Falta de estrutura por parte dos órgãos fiscalizadores

Uma terceira constatação, não menos importante, foi a de que, havia à época do desastre de Fundão, uma grande falta de estrutura por parte dos órgãos estatais encarregados de exercer a fiscalização da atividade minerária, em especial o então DNPM (hoje ANM) e os órgãos ambientais (IBAMA e FEAM), que se ressentiam de uma deficiência, em termos quantitativos e qualitativos, de quadros de pessoal e de meios logísticos e tecnológicos adequados para cumprirem as suas atribuições.

Assim, o controle do Estado exercido sobre as empresas mineradoras, no que diz respeito à gestão das barragens de rejeitos, era de certa forma frágil e pouco efetivo, levando estas, muitas vezes, a agirem de forma negligente em relação à adoção das medidas necessárias à garantia da segurança das estruturas de disposição.

A partir do desastre de Fundão, e até mesmo um pouco antes, os órgãos encarregados da fiscalização da atividade minerária vêm passando por um processo de estruturação, que tem permitido aos mesmos agir de forma mais eficiente e tempestiva junto às empresas mineradoras, a fim de que as mesmas cumpram a legislação e normas do setor relativas à segurança das barragens de rejeitos.

Segundo apurado nas entrevistas, a estruturação da ANM em curso inclui ações importantes, tais como: 1) a capacitação de seu quadro de pessoal para atuar na área de barragens de rejeitos; 2) realização de concurso público para contratação de técnicos com formação em geotecnia; 3) a evolução dos normativos emanados da agência, com a emissão de novas resoluções; 4) modernização tecnológica mediante a aquisição de novos veículos e equipamentos; 5) a criação do Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração – SIGBM; e 6) a transformação da Gerência Nacional de Segurança de Barragens de

Mineração em Superintendência, o que lhe confere mais autonomia e agilidade diante de qualquer situação de emergência.

Sobre esse processo de estruturação, sem discutir a sua necessidade e importância, cabe ressaltar que, seria de muito proveito para a agência ter também, nos seus quadros de pessoal, especialistas em desastres, com formação não somente nos campos das ciências naturais e engenharias, mas também em ciências sociais, dado o forte componente social associado às consequências de desastres como aqueles ocorridos em Mariana e Brumadinho.

Com relação ao SIGBM acima mencionado, o mesmo foi criado após o desastre de Fundão, através da Portaria nº 70.389 do DNPM, de 17/05/2017, e é alimentado pelas empresas mineradoras no mínimo quinzenalmente, mediante a inserção dos dados dos Extratos de Inspeção de Segurança Regular – ISR, atividade sob a responsabilidade das empresas, que visa identificar e avaliar eventuais anomalias que afetem potencialmente as condições de segurança e operação das barragens, o que permite o acompanhamento pela ANM da situação e níveis de risco das barragens integrantes do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, também criado através da mesma portaria.

Falta de adequação da legislação e normas em relação aos critérios de segurança

Outra constatação realizada por ocasião da pesquisa foi a de que a legislação e as normas brasileiras, em que pesem os avanços conseguidos nas últimas décadas, eram, até bem pouco tempo, muito frouxas no que diz respeito ao estabelecimento de critérios mais rígidos com relação ao projeto, construção e operação de barragens de rejeitos, bem como à responsabilização das empresas pelos danos socioambientais causados pelos incidentes envolvendo essas estruturas.

No entanto, há um consenso entre os especialistas de que houve progressos na legislação, que tem buscado se adequar às novas exigências para uma gestão técnico-administrativa das barragens de rejeitos que priorize a questão da segurança, não somente das estruturas em si mesmas, mas das populações situadas nas suas áreas de influência.

Inclusive, o alteamento de barragens de rejeitos pelo método de montante, após o desastre de Brumadinho, foi definitivamente proibido no Brasil através da Resolução nº 13 da ANM, 08/08/2019, proibição que foi recepcionada pela Lei nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens), mediante a alteração do seu Artigo 2º através da Lei Ordinária nº 14.066/2020, de 30/09/2020.

Dificuldade no relacionamento das mineradoras com as populações afetadas

A constelação construída a partir das entrevistas e a revisão bibliográfica realizada permitiram também verificar a existência de uma relação de oposição – às vezes até conflituosa – entre as empresas mineradoras e as populações residentes nas áreas potencialmente sujeitas aos efeitos catastróficos do rompimento de barragens de rejeitos.

Apesar de não terem aceitado participar das entrevistas, entidades sociais que reúnem vítimas de desastres dessa natureza têm manifestado, segundo foi apurado na pesquisa, o seu inconformismo diante do fato de as empresas mineradoras não assumirem publicamente as suas responsabilidades, tentando, num primeiro momento, atribuir os desastres a causas naturais, sobre as quais não teriam qualquer controle, para, somente, quando confrontadas pelo Ministério Público, realizarem acordos para garantir minimamente os direitos das vítimas (MAB, 2011 e MILANEZ et al., 2013).

As entidades reclamam, ainda, da resistência de algumas empresas mineradoras em se fazerem mais presentes na vida das comunidades, julgando que já estão fazendo muito ao gerar emprego e renda para algumas famílias, o que nem sempre acontece, uma vez que a mão de obra utilizada na mineração exige um nível de qualificação poucas vezes presente entre os habitantes das comunidades mais carentes.

Segundo alegam ainda os movimentos sociais, as comunidades precisam ser vistas como parceiras e devem ser contempladas com mais investimentos na melhoria de sua qualidade de vida, o que as tornariam mais receptivas e dispostas a cooperar na adoção das medidas que visem à sua própria segurança e à prevenção dos efeitos catastróficos sobre o meio ambiente, do qual depende muitas vezes o seu sustento.

Essa postura das mineradoras em relação às populações potencialmente afetadas tem dado sinais de mudança, principalmente depois da grande perda de vidas humanas no desastre de Brumadinho, que teve uma repercussão negativa para a imagem das empresas mineradoras em todo o mundo.

Um sinal disso é o fato de que simulações de situações de emergência realizadas mais recentemente pelas empresas mineradoras, com a intermediação dos órgãos de Defesa Civil, que gozam de um bom conceito junto à população, têm obtido boa adesão das comunidades em que existe uma presença mais efetiva das empresas, segundo se apurou nas entrevistas realizadas durante os trabalhos de pesquisa.

Mudança de paradigma na gestão de barragens de rejeitos

Os desastres de Mariana e Brumadinho marcaram, principalmente no Brasil, o início de uma mudança de paradigma no que diz respeito à gestão das barragens de rejeitos, que estão começando a ser vistas como estruturas complexas, que requerem cuidados altamente especializados, realizados por profissionais habilitados para compreender o seu comportamento diante das diversas solicitações provocadas pela atividade operacional das mineradoras, e demandam investimentos cada vez maiores na adoção das medidas necessárias à sua operação segura.

As mineradoras têm hoje um olhar diferente para as barragens, vendo-as não como simples passivos, geradoras de despesas, mas como elementos importantes da estrutura produtiva das empresas, já que a produção de rejeitos é inerente ao processo de beneficiamento do minério, indispensável à sua comercialização.

Assim, empresas de consultoria sérias e detentoras de grande experiência têm sido contratadas, para identificar os pontos de fragilidade do sistema que precisam ser trabalhados com vistas à prevenção de novos desastres. Há ainda muito o que melhorar, mas os primeiros passos estão sendo dados no sentido de buscar soluções sustentáveis para o problema da geração e disposição dos rejeitos da mineração.

Nesse sentido, o papel das instituições de ensino superior é de suma importância, não somente na busca de novas tecnologias para disposição de rejeitos, bem como para a sua reutilização em outras atividades econômicas, como, por exemplo, na fabricação de materiais de construção e na pavimentação de vias (Sant’ana Filho *et al.*, 2017; Galvão *et al.*, 2018; e Fontes *et al.*, 2019).

Cabe também às universidades um importante papel na formação de mão de obra técnica especializada, com competências técnicas para utilizar os novos métodos de cálculo de estabilidade e de análise de risco, em sintonia com as melhores práticas internacionais, principalmente de países que se encontram na vanguarda do desenvolvimento tecnológico da atividade minerária, como a Austrália, Canadá e Estados Unidos.

Há ainda a necessidade de se empreender esforços, também na área da pesquisa acadêmica, no sentido de se melhor compreender o comportamento estrutural das barragens de rejeitos, com seus reservatórios estratificados, com características por vezes heterogêneas.

Ênfase deve ser dada ao estudo do fenômeno da ruptura em fluxo por liquefação, que foi o modo de falha das barragens de Mariana e Brumadinho, e que ainda não é tão bem conhecido no que diz respeito à dinâmica dos seus mecanismos de desencadeamento e propagação.

Esse aspecto importa tanto àqueles que são incumbidos de construir e operar as barragens de rejeitos quanto àqueles que as projetam. Um projeto bem elaborado, atualizado em relação às novas tecnologias disponíveis, utilizando-se dos métodos de cálculo apropriados e modernos, sem perder de vista as lições aprendidas com os incidentes ocorridos com outras barragens construídas, contribui sobremaneira para que se tenha estruturas seguras.

Assim, os projetistas de barragens de rejeitos precisam ter as competências e os meios necessários para modelar o comportamento das estruturas de disposição diante das mais diversas situações.

Importância da interação entre as mineradoras e as universidades

A interação entre as universidades e as empresas mineradoras, principalmente as instituições de ensino situadas em regiões onde há significativa atuação da indústria da mineração, é vista como importante e mesmo necessária pela maioria dos especialistas entrevistados, uma vez que é essa troca de conhecimentos e experiências práticas que conduz ao desenvolvimento tecnológico, bem como à melhoria das práticas de gestão no âmbito da atividade minerária.

Há que se corrigir, entretanto, as distorções que esse relacionamento entre as universidades e as mineradoras pode sofrer no decorrer do tempo, principalmente no que diz respeito à subordinação da apreciação das questões de natureza técnico-científicas aos fatores de ordem econômica, mediante a cooptação dos profissionais envolvidos com a atividade docente para atuarem como consultores das empresas, das quais passam a defender os interesses e sujeitar suas linhas de pesquisa.

Trata-se, obviamente, de uma questão complexa, cuja solução requer, antes de tudo, bom senso, transparência e a priorização do trabalho científico por parte de ambos os atores, já que há uma dependência recíproca nessa relação e a ciência é o elo de união.

A gestão de risco após o desastre com a Barragem de Fundão

O desastre de Fundão nos traz também algumas lições acerca do gerenciamento dos riscos relacionados a esse tipo de evento, dentre elas a necessidade de se ter uma visão sistêmica acerca

dos diversos problemas a ele associados e identificados através das entrevistas realizadas no âmbito desta pesquisa, o que, segundo Oliveira Lopes e Heller (2020), pode conduzir a formas de como transformar as condutas das diversas instituições envolvidas, como, por exemplo, a postura das empresas mineradoras ao priorizar o lucro em detrimento da segurança das barragens, a inércia dos órgãos estatais na fiscalização da atividade minerária e a falta de uma presença mais efetiva das empresas na vida das comunidades potencialmente afetadas.

A verdade é que limitar as análises de risco somente às questões de natureza técnica ligadas às engenharias ou à geologia, sem considerar, por exemplo, os aspectos econômicos e socioambientais envolvidos, torna ineficiente a gestão dos riscos associados às barragens de rejeitos, além de dificultar a concepção de políticas públicas que assegurem maior justiça social e mitigação dos prejuízos causados às comunidades afetadas.

Tais comunidades precisam ser efetivamente incluídas no processo de obtenção dessa necessária visão sistêmica a respeito dos desastres envolvendo barragens de rejeitos, do qual devem participar ativamente, uma vez que desempenham um papel crítico na caracterização dos riscos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Mediante o exercício de uma atividade interpretativa acerca dos diversos tipos de relação existentes entre todos os elementos citados durante as entrevistas realizadas, as quais foram ilustradas com fatos concretos presentes nos discursos dos atores, peritos e especialistas entrevistados, bem como com base nas revisões bibliográfica e documental realizadas, chegou-se a um conjunto de fatores que contribuíram para criar as condições propícias ao rompimento da Barragem do Fundão, bem como para que suas consequências fossem catastróficas. Esses fatores são:

- Falta de integração entre os diversos atores envolvidos com o projeto, construção e operação de barragens de rejeitos de mineração;
- Subordinação demasiada da gestão técnica das barragens de rejeitos a interesses econômicos, priorizados naturalmente pelas mineradoras;
- Ausência de informações públicas, oportunas e confiáveis acerca da complexa interação entre a mina e seu contexto operacional;
- Falta de estrutura por parte dos órgãos fiscalizadores para atuar com vistas ao cumprimento da legislação e normativos relacionados à segurança de barragens de rejeitos de mineração por parte das empresas mineradoras;
- Falta de adequação da legislação e normas em relação aos critérios de segurança a serem observados por todos os atores envolvidos;
- Dificuldade no relacionamento das mineradoras com as populações afetadas, dificultando a adoção das medidas previstas nos planos de emergência.

As causas técnicas do colapso da estrutura do Fundão – muitas das quais citadas pelos especialistas e peritos durante as entrevistas – já foram exaustivamente investigadas por órgãos públicos, polícias, universidades, inclusive por comitês de especialistas internacionais contratados pela própria empresa mineradora, não tendo havido, de maneira geral, muitas divergências no meio técnico acerca do que teria deflagrado o rompimento da barragem por liquefação, considerando os aspectos relativos à engenharia geotécnica, à hidrologia, à geologia e à sismologia.

Entretanto, a presente pesquisa conseguiu mostrar que causas de naturezas gerenciais, institucionais, econômicas e sociais contribuíram para que as condições de segurança da barragem chegassem a um estado crítico e para que a mesma viesse a romper, com consequências

catastróficas, sob a ação de um evento deflagrador (gatilho). As condições para que esse gatilho ocorresse, além dos fatores já elencados, foram também fruto das ações e omissões da própria empresa ao longo da vida operacional daquele sistema de disposição de rejeitos, ao desrespeitar, de forma reiterada, algumas premissas básicas de projeto.

Tais premissas, segundo consta do laudo da perícia realizada pela Polícia Federal (SETEC, 2016) e do relatório do painel de especialistas contratado pela SAMARCO (Morgenstern *et al.*, 2016), foram a deposição separada de rejeito arenoso e lama, a fim de não comprometer o funcionamento do sistema de drenagem interna, e a manutenção de uma praia mínima de rejeitos, que evitaria que a lama se aproximasse demasiado do barramento, criando uma camada de baixa capacidade de suporte para os alteamentos subsequentes.

Os resultados obtidos na pesquisa realizada, apresentados e discutidos no item anterior, mostram que o objetivo inicialmente proposto de buscar identificar, a partir da experiência do caso concreto do rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG, as principais causas do desastre, bem como explicitar as interações e relações existentes entre os diversos atores, elementos técnicos e naturais envolvidos na implantação e operação de obras de barragens de rejeitos de mineração, foi plenamente atingido.

Foi possível também, com base nas informações e dados colhidos através das entrevistas realizadas, avaliar a natureza das relações e o grau de integração existentes entre os diversos atores envolvidos no processo de licenciamento, planejamento, implantação e operação da barragem de rejeitos objeto da pesquisa, bem como identificar a natureza do problema associado ao rompimento da referida estrutura de disposição de rejeitos, bem como melhor compreender a magnitude dos efeitos e consequências dele decorrentes, buscando estabelecer a sua conexão com suas causas técnicas e gerenciais.

Com base no que foi apresentado pelos atores, peritos e especialistas entrevistados em relação às medidas que precisam ser adotadas para se evitar novos desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração, foram identificadas as dificuldades a serem vencidas com vistas à mitigação e/ou solução do problema e seus impactos, considerando as esferas de atuação e responsabilidades de cada um dos atores envolvidos.

Esse elenco de medidas, que foram apresentadas no item anterior, muitas das quais já em fase de implementação nos âmbitos das diversas esferas de atuação ligadas ao assunto, são uma contribuição do presente trabalho de pesquisa com vistas à melhoria do sistema, o que somente irá ocorrer com o envolvimento e a participação de todos os interessados.

Na verdade, há que se considerar que, a rigor, não há desastres exclusivamente naturais, pois sempre há algum aspecto decorrente de ação antrópica que contribui para que os mesmos ocorram ou que tenham maximizadas as suas consequências.

Por suas características e pelos fatores que lhe deram causa, o desastre decorrente do rompimento da barragem do Fundão pode ser considerado como um desastre tecnológico, que se refere ao tipo de desastre causado pela intervenção humana no ambiente através do uso de tecnologia, ocorrendo devido a processos negligentes ou falhas técnicas (Oliveira Lopes *et Heller*, 2020). Ao contrário de desastres naturais, que estão associados com elementos naturais, sobre os quais se tem pouco controle, desastres tecnológicos têm um grande grau potencial de prevenção (Mayhorn e McLaughlin, 2014).

Assim, através da análise das informações colhidas no decorrer da pesquisa, conclui-se também que o desastre não era imprevisível. Havia, na verdade, em face de todos os fatores já elencados, um risco muito elevado de que o mesmo pudesse ocorrer, mas que foi assumido pelos responsáveis pela gestão técnico-administrativa da barragem.

Vale ressaltar, finalmente, a importância da adoção de uma abordagem multidisciplinar sobre o assunto, sem a qual não teria sido possível captar a influência dos diversos aspectos relacionados aos desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração identificados na presente pesquisa, bem com a eficácia da técnica AC para prover uma visão acerca do problema que pôde, de maneira geral, ser compartilhada pelos atores envolvidos.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como se pode observar, eventos como aquele ocorrido em Fundão são complexos e possuem muitas variáveis envolvidas, muitos aspectos que precisam ser aprofundados, para que se possa compreender cada vez mais os mecanismos, não somente os de natureza técnica, que levam à sua ocorrência.

No que diz respeito à engenharia, inclusive, como ressaltou a maioria dos entrevistados, há que se buscar um maior conhecimento acerca do fenômeno da liquefação estática, causa imediata dos dois últimos grandes desastres envolvendo barragens de rejeitos ocorridos no Brasil, cujos mecanismos de propagação através das estruturas ainda não estão suficientemente delineados.

Assim, se faz necessário debruçar-se sobre alguns pontos abordados apenas de forma conjunta no presente trabalho, mas que podem ser objeto de pesquisas futuras, os quais, a título de sugestão, apresentamos:

- a) Pesquisar formas sustentáveis de reutilização dos rejeitos/resíduos gerados pela indústria, em especial, a indústria da mineração;
- b) Pesquisar formas alternativas para disposição dos rejeitos, a fim de reduzir o número de barragens construídas com essa finalidade;
- c) Pesquisar formas de melhorar a integração entre os diversos atores envolvidos no projeto, construção, operação e fechamento de barragens de rejeitos;
- d) Realizar pesquisas junto às comunidades potencialmente afetadas pelas barragens de rejeitos, a fim de identificar as suas necessidades e expectativas em relação à convivência com os riscos inerentes à atividade minerária;
- e) Desenvolvimento de novos modelos de auditorias externas dos sistemas de disposição de rejeitos (barragens e suas estruturas auxiliares), que reduzam o controle das empresas mineradoras sobre a divulgação de seus resultados por parte das empresas contratadas;
- f) Adaptação dos modelos matemáticos atualmente existentes às diversas situações relativas ao comportamento das barragens de rejeitos, em face das peculiaridades da atividade operacional da mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Mineração – **Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. NBR 13028:2017, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ. 16 p. 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Mineração – **Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. NBR 13028:2006, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ. 10 p. 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração**. NBR 13028:1993, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ. 10 p. 1993.

AGUIAR, B. K. G. **Análise de Constelação em bacias hidrográficas no uso e ocupação do solo e da água nas margens do reservatório Poço da Cruz, Ibimirim, Pernambuco, Brasil**. Trabalho de conclusão do curso superior de tecnologia em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Recife/PE, 2019.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 95/2022, de 07/07/2022. **Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração**. Brasília/DF, 2022.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro 2020**. 37p, Brasília/DF, 2020. Disponível em <http://www.anm.gov.br>. Acesso em: abril/2021.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 13/2019, de 08/08/2019. **Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração**. Brasília/DF, 2019.

ANCOLD – Australian National Committee on Large Dams. **Guidelines on Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation and Closure**. May 2012.

ANCOLD – Australian National Committee on Large Dams. **Guidelines on Selection of Acceptable Flood Capacity for Dams**. 2000.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

ARMSTRONG, M., PETTER, R., PETTER, C. - **Why have so many tailings dams failed in recent years?** Resources Policy, 63 (101412), 2019.

BARABÁS, A. **Mine tailings in Hungary: Legislation, operation and supervision**. 2005

BARBOSA, S. O.; SANTOS, P. C.; SOUZA, L. M.; SOUZA, T. E. **A Perícia de Engenharia da Polícia Federal no caso do rompimento da barragem de rejeitos da empresa**

SAMARCO, em Mariana/MG. Anais do IX Seminário de Perícias de Engenharia da Polícia Federal. Fortaleza/CE. 2018.

BRADLOW, D.D., PALMIERI, A. e SALMAN, S.M.A. **Regulatory Frameworks for Dam Safety. A Comparative Study.** The World Bank, Washington DC, ISBN 0-81'213-5191-5, 159 p., 2002.

BRASIL. Lei nº 14.066/2020, de 30/09/2020. **Altera a Lei nº 12.334/2010, incluindo na mesma o Art. 2º-A, através do qual fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante.** Brasília/DF, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.334/2010, de 20/09/2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.** Brasília/DF, 2010.

CARMO, F. F., KAMINO, L. H. Y., TOBIAS Jr., R., CAMPOS, I. C., CARMO F. F., SILVINO, G., CASTRO, K. J. S. X., MAURO, M. L., RODRIGUES, N.U.A, MIRANDA, M. P. S., PINTO, C. E. F. - **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context.** Perspectives in Ecology e Conservation, 15 (2017) 145–151, 2017.

CBMG – Corpo de Bombeiros do Estado de Minas Gerais. **Operação Brumadinho completa três anos.** Belo Horizonte/MG, Brasil (2022). Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/operacao-brumadinho-completa-tres-anos>. Acesso em: 20/04/2022.

COPAM – Conselho Estadual de Polícia Ambiental do Estado de Minas Gerais. Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17/12/2002. **Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de Mineração no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte/MG, Brasil (2002). Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/copam>. Acesso em: março/2011.

COPAM – Conselho Estadual de Polícia Ambiental do Estado de Minas Gerais. Deliberação Normativa COPAM nº 87, de 17/06/2005. **Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM nº 62, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatórios de água em empreendimentos industriais e de Mineração no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte/MG, Brasil (2005). Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/copam>. Acesso em: março/2011.

COPAM – Conselho Estadual de Polícia Ambiental do Estado de Minas Gerais. Deliberação Normativa COPAM nº 124, de 09/10/2008. **Complementa a Deliberação Normativa COPAM nº 87, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatórios de água em empreendimentos industriais e de Mineração no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte/MG, Brasil (2008). Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/copam>. Acesso em: março/2011.

COSTA, M. L. M. E, SILVA, T. C. DA. **Conceitos, Metodologia e Estudos sobre a Técnica de Análise de Constelação: uma revisão de literatura.** Gaia Scientia, v.10, n.4, 19dez.2016.

COSTA, M. L. M. E. **Desenvolvimento de um modelo conceitual para o planejamento estratégico e integrado dos recursos hídricos**. Tese de Doutorado, PRODEMA/UFPB.2018.

COSTA, M. L. M. E, SILVA, T. C. DA, LIMEIRA, M. C. M. **Investigação sobre as relações interinstitucionais e interdisciplinares para o planejamento integrado de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Gramame, Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.26, n.2, maio/abril, 2021.

DAVIES, M. P.; MARTIN, T. E. **Mine tailings dams: when things go wrong in proceedings of tailing dams**. Las Vegas: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams, p. 261-273. 2000.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 70.389/2017, de 17/05/2017. **Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração**. Brasília/DF, 2017.

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 de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, MG. 114 p. 2008.

DUARTE, V. N., PIFFER, M. **Caracterização do Método Delphi: Aspectos Teóricos e Metodológicos**. II Simpósio Latino-Americano de Estudos de Desenvolvimento Regional. Novembro, 2020.

DULEWSKI, J., MADEJ, B. **New developments in the Polish mining industry – waste management rules now and in the future**. In: Sustainable Post-Mining Land Management, Wroclaw, p. 205, 2004.

ESPÓSITO, T.J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construída por aterro hidráulico**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 363 p. 2000.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais. **Dados da Produção de Rejeitos de Mineração 2017**. Belo Horizonte/MG, 2018. Disponível em: www.feam.br. Acesso em: abril/2021.

FELDHOFF, B., STOCKMANN, N., FANDERL, N., GAHLE, A. K., GRAF, A., LEGER, M., SONNBERGER, M. **Bridging Theories and Practices: Boundary Objects and Constellation Analysis as Vehicles for Interdisciplinary Knowledge Integration**. Sustainability, 11, 5357, 2019.

FERNANDES, G. W., GOULART, F. F., RANIERI, B. D., COELHO, M. S., DALES, K., BOESCHE, N., BUSTAMANTE, M., CARVALHO, F. A., CARVALHO, D. C., DIRZO, R., FERNANDES, S., GALETTI Jr., P. M., MILLAN, V. E. G., MIELKE, C., RAMIREZ, J. L., NEVES, A., ROGASS, C., RIBEIRO, S. P., SCARIOT, A., SOARES FILHO, B. - **Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil**. Brazilian Journal of Nature Conservation, 14 (2016) 35-45, 2016.

FONTES, W. C., CARVALHO, J. M. F. DE, ANDRADE, L. C. R., SEGADÃES, A. M., PEIXOTO, R. A. F. **Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”**. Construction and Building Materials, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.052>.

GALVÃO, J. L. B., ANDRADE, H. D., BRIGOLINI, G. J., PEIXOTO, R. A. F., MENDES, J. C. **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints**. Journal of Cleaner Production, 200, p. 412-422, 2018.

GOLDER Associates Pty Ltd. **Report to United Nations Environment Programme Giving Guidance for Developing Tailings Regulations**. Report no. 01640072, 9 p. + Appendices, 2001.

GOMES, R. C. **Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Resíduos de Mineração**. NUGEO – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, 220p, 2009.

HAMOR, T. **Legislation on Mining Waste Management in Central and Eastern European Candidate Countries**. European Communities, p. 1-20, 2002.

HATJE, V., PEDREIRA, R. M. A., REZENDE, C. E., SCHETTINI, C. A. F., SOUZA, G. C., MARIN, D. C., HACKSPACHER, P. C. - **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide**. Scientific Reports 7:10706, 2017.

HERZA, J., ASHLEY, M., THORP, J. **Factor of Safety? – Do we use it correctly?** Conference: ANCOLD 2017, Hobart, Tasmania, Australia, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Perfil dos Municípios Brasileiros 2011**. Disponível em www.biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo. Acesso em: abril/2022.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília/DF, 127p., 2016.

IBRAOP – **Apresentação de Peritos da Polícia Federal sobre o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Mariana/MG**. XVIII Simpósio Nacional de Auditoria em Obras Públicas – SINAOP. João Pessoa/PB. 2018. Disponível em: www.ibraop.org.br/sinaop18. Acesso em: março/2021.

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Tailings dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences**. Bulletin 121. 144 p. 2001.

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Draft ICOLD Bulletin: General Principles and Framework for Dam Safety**. February/2020.

KOPPE, J. C. - **Lessons learned from the two major tailings dam accidents in Brazil.** Mine Water and the Environment, <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>, 2020.

KREFT-BURMAN, K., SAARELA, J., ANDERSON, R. **Tailings Management Facilities – Legislation, Authorization, Management, Monitoring and Inspection Practices.** Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland, 2005.

LACAZ, F. A. D. C.; PORTO, M. F. D. S.; PINHEIRO, T. M. M. (2016). **Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 42, p 9. ISSN 2317-6369. (online) AGB-Porto Alegre, Porto Alegre <http://dx.doi.org/10.1590/2317-6369000016016.2016>.

LACTEC – Institutos Lactec. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do Rio Doce.** Curitiba, Paraná, 2017.

LA RED – **Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.** Ciudad de Panamá, Panamá, 2015. Disponível em: www.desenredando.org/lared/antecedentes.html. Acesso em: 27/04/2022.

MAB – Movimento dos Atingidos por Barragens. **História do MAB: 20 anos de organização, lutas e conquistas.** 2011. Disponível em: <http://www.mabnacional.org.br/historia>. Acesso em: 13/04/2022.

MAYHORN, C. B. & MCLAUGHLIN, A. C. **Warning the world of extreme events: A global perspective on risk communication for natural and technological disaster.** Safety Science, 61, 43-50, 2014.

MILANEZ, B., PORTO, M. F., PACHECO, T., LEROY, J. P. **Injustiça Ambiental e Saúde no Brasil: o Mapa de Conflitos.** Editora Fiocruz, 2013. Disponível em: www.confliitoambiental.icict.fiocruz.br. Acesso em novembro/2021.

MITTAL, H. K. & MORGENSTERN, N. R. **Seepage control in tailings dams.** Canadian Geotechnical Journal, Edmonton, Canada, Vol. 13(3), pp. 277-293, 1976.

MORGENSTERN, N. R., VICK, S. G., VIOTTI, C. B., WATTS, B. D. **Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão.** Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão. Samarco Mineração S/A, 2016. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com/wp-content/uploads/general/PR/pt/FinalReport.pdf>. Acesso em: 19/03/2021.

MPF – Ministério Público Federal. **Caso SAMARCO – Atuação do MPF.** Minas Gerais, 2016. Disponível em: www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/atuacao-do-mpf. Acesso em: março/2021.

NETO, J. P. F. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade.** Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto/MG, 2009.

OHLHORST, D.; SCHÖN, S. **Constellation Analysis as a Means of Interdisciplinary Innovation Research – Theory Formation from the Bottom Up.** Historical Social Research, v. 40, n. 3, p. 258 -278, 2015. ISSN 10.12759/hsr.40.2015.3.258-278. 2015.

OLIVEIRA LOPES, J. & HELLER L. **Explanatory Matrices on the Causes of a Tailing Dam Collapse in Brazil: The (Dis)Articulation of Epistemes.** Risk Analysis, Vol. 40, 12, 2020.

OWEN, J. R., KEMP D., LÈBRE É., SVOBODOVA K., PÉREZ Murillo G. - **Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure.** International Journal of Disaster Risk Reduction, 42 – 101361, 2020.

PAULA, J., CARVALHO, R. M. C., RODORFF, V., SOBRAL, M. C., SIEGMUND-SCHULTZE, M. **Análise de Constelação como instrumento do planejamento ambiental na gestão de recursos hídricos no Nordeste.** XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal: [s .n.]. 2014.

PENMAN, A.D.M. **Tailings Dams: Risks of Dangerous Occurrence.** In: Köngeter, J. (ed.), Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. N. 124, 229-247, 2001.

RENOVA – Fundação Renova. **Entidade responsável pela mobilização para a reparação dos danos causados pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG.** Disponível em: www.fundacaorenova.org/a-fundacao. Acesso em 20/04/2022.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante.** Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto/MG, 2013.

RODORFF, V.; ARAÚJO, G.J.; GOMES, E.T.; KÖPPEL, J.; SIEGMUND-SCHULTZE, M.; SOBRAL, M.C. **Driving forces and barriers for a sustainable management of the Itaparica reservoir region - basic milestones towards a Constellation Analysis.** In: Sustainable Management of Water and Land in Semiarid Areas: Case Study of the Itaparica Reservoir in Northeast Brazil. Recife: Editora Universitária UFPE, p. 265-279, 2013.

SADREKARIMI, A., RIVEROS, G. A. - **Static Liquefaction Analysis of the Fundão Dam Failure.** Geotechnical and Geological Engineering 38, 6431-6446, 2020.

SANT'ANA FILHO, J. N., DA SILVA, S. N., SILVA, G. C., MENDES, J. C., PEIXOTO, R. A. F. **Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings Dams.** Journal Materials of Civil Engineering, 29(9), 6p. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2017.

SCHÖN, S., NÖLTING, B., MEISTER, M. **konstellationanalyse. Ein interdisziplinäres Brückenkonzept für die Technik, Nachhaltigkeits und Innovationforschung.** Discussion paper n. 12/04, jun. 2004.

SCHÖN, S., KRUSE, S., MEISTER, M., NÖLTING, B., OHLHORST, D. **Handbuch konstellationanalyse: Ein interdisziplinäres Brückenkonzept für die Technik, Nachhaltigkeits, Technik und Innovationforschung.** München: Oeskom Verlag, 2007.

SETEC/MG – Setor Técnico-Científico da Polícia Federal em Minas Gerais. **Lauda nº 994/2016 – SETEC/SR/PF/MG.** Belo Horizonte/MG, 2016. Disponível em: www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/atuacao-do-mpf/denuncia-compilada. Acesso em: março/2021.

SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/SIGBM/publico/estatistica>. Acesso em: abril/2021.

SILVA, W.P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001).** Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 120p. 2010.

SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Lei Estadual nº 23.291/2019, de 25/02/2019. **Institui a política estadual de segurança de barragens no Estado de Minas Gerais.** Disponível em: http://www.snisb.gov.br/Entenda_mais/legislacao-aplicada/mg-lei-n-o-23-291_2019. Acesso em: abril/2021.

SOARES, L. **Barragens de Rejeitos – Metodologia de implantação, operação e manutenção.** São Paulo: EPUSP, 74p. Apostila para a disciplina de pós-graduação do Departamento de Minas e de Petróleo, PMI-5883 - Barragens de Rejeitos – Metodologia de implantação, operação e manutenção. 1998.

SOUZA JÚNIOR, G. R. **Ruptura de taludes em barragens de contenção de rejeitos devido ao desenvolvimento de subpressões.** Dissertação de Mestrado, 113p. Engenharia de Minas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2003.

USGS – U. S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2020** - 200p, 88-89, Reston, Virginia, USA, January 2020.

USGS – U. S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2018** - 204p, 92-93, Reston, Virginia, USA, January 2018.

VANDEN BERGUE, J. F., BALLARD, J. C., WINTGENS, J. F., LIST, B. **Geotechnical risks related to tailings dam operations.** Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, Canada, 11 p., 2011.

ZONGJIE, L., JUNRUI, C., ZENGGUANG, X., YUAN, Q., JUNG, C. - **A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History.** Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2019, Article ID 4159306, 18 pages, 2019.

ZUOAN WEI, GUANGZHI YIN, WANG, J. G., LING WAN, GUANGZHI LI. **Design, Construction and Management of Tailings Storage Facilities for Surface Disposal in China: Case Studies of Failures.** Waste Management & Research, 31(1), 106-112, 2013.

APÊNDICE A – Modelo do convite enviado para a realização das entrevistas



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL



O que podemos fazer para evitar novos casos de ruptura de barragens de rejeitos de mineração?

- 4) Outras questões subsidiárias são também importantes para a aplicação da técnica Análise de Constelação e serão abordadas na entrevista, tais como: a) a identificação dos principais atores envolvidos com o projeto, construção, operação e fechamento de barragens de rejeitos de mineração e os principais tipos de relação existentes entre eles; b) identificação dos principais elementos técnicos e naturais que têm relação direta com essas estruturas de disposição de rejeitos; c) identificação dos símbolos (de acordo com a definição utilizada na técnica AC) relacionados a barragens de rejeitos de mineração.
- 5) Por fim, ressalta o signatário que a identidade dos entrevistados será preservada e seus nomes não constarão do texto da dissertação de Mestrado. As entrevistas serão gravadas somente para uso do discente, por ocasião da análise interpretativa das informações coletadas.

João Pessoa, **XX** de março de 2022.

Sidney de Oliveira Barbosa
Matrícula nº 20201013664

2



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL



CONVITE

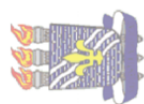
A Sua Senhoria, o Senhor
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

SIDNEY DE OLIVEIRA BARBOSA, engenheiro civil, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Curso de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, matrícula nº 20201013664 (Declaração de Vínculo anexa), tendo como Orientador o Prof. Tarciso Cabral da Silva, tem a honra de convidar Vossa Senhoria a contribuir, em virtude de sua formação acadêmica e larga experiência profissional, com a pesquisa que vem sendo desenvolvida pelo mesmo no âmbito do referido Programa, o que se dará através da participação em uma entrevista individual, com no máximo 1 (uma) hora de duração, a ser realizada na modalidade *On Line*, através das plataformas *Microsoft Teams* ou *Google Meet*, em data a ser acordada, conforme dados gerais apresentados a seguir.

- 1) A pesquisa que vem sendo desenvolvida pelo discente tem como título “Investigação sobre o rompimento da barragem de rejeitos do Fundão a partir de uma abordagem multidisciplinar”, tema que foi escolhido em virtude da experiência profissional do discente, que integrou as equipes de peritos de engenharia da Polícia Federal que trabalharam nos casos dos rompimentos das barragens de rejeitos do Fundão, em Mariana/MG, e do Corrego do Feijão, em Brumadinho/MG, dando também continuidade à realização de trabalhos em uma das linhas de pesquisa desenvolvidas pelo Orientador, que consiste na utilização da técnica Análise de Constelação, ferramenta de análise concebida no início dos anos 2000 na Universidade Técnica de Berlim para estudar objetos complexos de investigação, e que vai ser utilizada de forma pioneira na análise desses casos envolvendo desastres com barragens de rejeitos. Em anexo, segue um texto explicativo acerca da técnica Análise de Constelação (AC).
- 2) Dentre as atividades previstas no cronograma da pesquisa está a realização de entrevistas com os atores envolvidos e com especialistas e/ou profissionais que atuaram na investigação das causas do rompimento da barragem do Fundão, com vistas à construção da Constelação (representação gráfica), um dos produtos da técnica de análise a ser utilizada, que permitirá identificar, a partir de uma atividade interpretativa (segunda etapa), as diversas relações e interações existentes entre os atores envolvidos, elementos técnicos, elementos naturais e símbolos (conceitos, normas, legislação etc.), objetivando rastrear, a partir de uma visão multidisciplinar, as causas técnicas e gerenciais de eventos de rompimento de barragens de rejeitos, com vistas à prevenção de outros desastres semelhantes.
- 3) A aplicação da técnica Análise de Constelação parte sempre de uma pergunta norteadora, através da qual são colhidas as visões de todos os participantes a respeito do objeto de estudo. No caso da pesquisa aqui referida, a questão proposta é:

1

APÊNDICE B – Matriz de Consenso – Respostas



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL



MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DISCENTE: SIDNEY DE OLIVEIRA BARBOSA

MATRIZ DE CONSENSO - RESULTADOS

|

Parágrafo	E1		E2		E3		E4		E5		E6		E7		E8		E9		TOTAIS			
	C	D	CP	C	D	CP	C	D	CP	C	D	CP	C	D	CP	C	D	CP	C	D	CP	NO
1			X	X			X		X		X		X			X		X	6	0	3	
2	X					X	X			X					X			X	3	0	6	
3	X					X	X		X		X		X			X			6	0	3	
4			X		X		X	X	X		X					X			4	1	2	2
5	X			X		X	X		X		X					X		X	7	0	1	1
6	X			X		X	X		X		X		X			X		X	8	0	1	
7	X				X		X		X		X				X				6	0	1	2
8	X			X		X	X		X		X				X				7	1	1	
9	X			X		X	X		X		X		X		X				8	1	0	
10	X			X		X	X		X		X		X		X				8	1	0	
11	X			X		X	X		X		X		X		X				7	1	0	1
12	X			X		X	X		X		X				X				5	0	2	2
13	X			X		X	X		X		X		X		X				6	2	1	
14		X		X		X	X		X		X				X	X			6	2	1	
15	X			X		X	X		X		X		X		X				9	0	0	
16	X			X		X		X	X		X				X				5	0	4	
C – Concorda																						
D – Discorda																						
CP – Concorda Parcialmente						X																
NO – Não Opinou																						
Ei – Entrevistado																						