

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA



ESTUDO DAS CAUSAS DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO DE
MINERAÇÃO NO BRASIL E PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO

Mestranda: Rafaela Gonçalves Pires Morgado

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

São Carlos - SP

2022

Versão corrigida

Original se encontra disponível na unidade que aloja o programa

RAFAELA GONÇALVES PIRES MORGADO

ESTUDO DAS CAUSAS DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO DE
MINERAÇÃO NO BRASIL E PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

São Carlos - SP

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M827 Morgado, Rafaela Gonçalves
ESTUDO DAS CAUSAS DE RUPTURAS DE BARRAGENS DE
REJEITO DE MINERAÇÃO NO BRASIL E PROPOSTA PARA
AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO / Rafaela Gonçalves Morgado;
orientador Heraldo Luiz Giacheti Giacheti. São Carlos,
2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2022.

1. Mineração. 2. Barragem de Rejeito. 3. Método
Construtivo. 4. Ruptura. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **RAFAELA GONÇALVES PIRES MORGADO**.

Título da dissertação: "Estudo das causas de rupturas de barragens de rejeito de mineração no Brasil e proposta para avaliação da operação".

Data da defesa: 11/11/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Dr. **Heraldo Luiz Giacheti**
(Orientador)

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

Aprovada

Prof. Associado **Vagner Roberto Elis**

(Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/IAG-USP)

Aprovada

Dr. **Luciano Rocha**

(Mineração Jundú/MJundu)

Aprovada

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:

Profa. Associada **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTO

Ao poder superior (Deus), por ter permitido e dado condições para realização este trabalho.

Ao meu marido, obrigada por ler e revisar tantas vezes este documento e entender minhas angústias e os nervos à flor da pele para o desenvolvimento dessa dissertação, sempre me apoiando.

À minha família, por entenderem toda a ausência e apoio durante esse processo.

Ao meu orientador, Heraldo Luiz Giacheti, por aceitar o desafio de me ajudar com esse trabalho, sendo sempre tão assertivo nas cobranças e posicionamento. Agradeço por todas as conversas e por compartilhar comigo o seu conhecimento e sua experiência de vida.

À mineração Jundu, através da pessoa do Dr. Luciano Rocha, por ter permitido minha ausência alguns dias no trabalho para desenvolvimento dessa dissertação.

À todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

RESUMO

MORGADO, R. G. P. **Estudo das causas de rupturas de barragens de rejeito de mineração no Brasil e proposta para avaliação da operação**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A indústria de extração mineral é essencial às atividades humanas. Os produtos extraídos do subsolo são transformados em máquinas, equipamentos, ferramentas, e diversos outros, constituindo parte da rotina diária das pessoas. Para que ocorra essa transformação é necessário o emprego de diferentes formas de extração e tratamento do minério, que além dos produtos, também geram uma quantidade considerável de rejeito, ou seja, os resíduos minerais sem valor econômico, os quais são armazenados por meio das barragens de rejeito. Principalmente nas décadas passadas, tais barragem eram largamente utilizadas pelo baixo custo inicial e a falta de tecnologia disponível. Quando estas estruturas não são projetadas, construídas, operadas e gerenciadas corretamente e com segurança, elas podem romper, causando desastres ambientais, sociais e econômicos, como aconteceu recentemente no Brasil. Neste trabalho apresenta-se um histórico de rompimento de barragens de mineração no Brasil, a partir dos dados disponíveis em artigos, reportagens, relatórios técnicos e acadêmicos, e aqueles disponíveis na Agência Nacional de Mineração. O objetivo desse estudo foi identificar as principais causas que levaram a ruptura dessas barragens, bem como compreender e apresentar os principais motivos. Constatou-se que as barragens antes de romper apresentaram várias anomalias que podem ser identificadas durante um acompanhamento contínuo da operação. Se este processo for sistematizado pode-se ter maior garantir da estabilidade e da segurança dessa estrutura. Assim, este trabalho também apresenta uma proposta para avaliar continuamente a operação, tendo como instrumento uma ficha de operação da barragem. Nela constam as recomendações operacionais elaboradas a luz dos conhecimentos geotécnicos, bem como um modelo de ficha de operação simplificada, a fim de agilizar a avaliação e a tomada de decisão durante a atividade *in loco*, por meio de um critério de pontuação simples para verificar se é necessário a intervenção de especialista. Esta proposta foi aplicada a dois casos de ruptura de barragens conhecidos e disponíveis na literatura, a fim de avaliá-la. Os resultados para uma das barragens, construída pelo método de jusante, confirmam a importância da operação na estabilidade da estrutura e a necessidade de apoio técnico especializado para a operação durante toda a vida útil da barragem. Resultado semelhante também foi encontrado quando se avaliou uma barragem construída pelo método de montante, e que recentemente teve uma ruptura catastrófica. Assim, a proposta apresentada é um instrumento importante para tomada de decisão no gerenciamento do empreendimento, pois conseguiu identificar problemas de operação, projeto e gestão, para as duas barragens construídas por métodos distintos. Conclui-se que os problemas identificados por meio do emprego desta proposta poderiam ser reduzidos ou mesmo evitados se ela fosse devidamente empregada durante sua operação. Além disso, destaca-se a importância do gerenciamento destes empreendimentos, segundo as boas práticas de projeto e operação, com destaque para o monitoramento contínuo e a integração de todas as equipes envolvidas.

Palavras-Chave: Mineração. Barragens de rejeitos. Métodos construtivos. Ruptura. Monitoramento. Controle de operação.

ABSTRACT

MORGADO, R. G. P. **Study of the causes of failure of mining tailing dams in Brazil and proposal for the operation assessment.** 2022. Dissertation (Master in Geotechnics). University of São Paulo, São Carlos, 2022.

The mining industry is crucial for human development. The mined resources from subsoil are used to manufacture machines, equipment, tools, and various products, constituting as part of the daily people's lives. For this transformation to occur, it is necessary the employment of various mining and ore treatment methods that in addition to producing the final products, it also generates a considerable amount of tailings, that is, subeconomic residues that will be stored through tailings dams. Historically, tailings dams have been widely used due to low initial costs and lack of available technology. When these infrastructures are not properly designed, built, operated, and managed on a safely manner, they can fail, causing sever environmental-social-economic disasters, as has recently occurred in Brazil. This study presents the history of Brazil's dam failures based on papers, publications, newsletters, technical reports, and documents available at the Mining National Agency (ANM). The objective of this study is to identify the main causes that led to the dam failures, as well as to diagnose and explore the main reasons. It was found that prior to a dam failure, several issues that can be identified during the monitoring processes. When systematic monitoring procedures are in place, the risk for failures are greatly diminished, thus ensuring the dam's stability and safety. Therefore, this study also presents a proposal for continuously monitoring the operations by carrying out standard operating procedures. They contain operational recommendations based on rock mechanics best practices, as well as a simplified operation model form, in order to speed up the evaluation and decision-making process during the on-site activity, through a simple scoring system to determine on whether or not a specialist intervention is required. This proposal was applied to two dam known historical failures in order to validate this methodology. The results for one of the dams, built by the downstream method, confirm the importance of monitoring procedures for dam stability and the need for specialized technical support for the operations during the entire useful dam's life. A similar result was obtained when evaluating a dam built by the upstream method which recently had a catastrophic failure. Thus, this study proposes the implementation of decision-making instruments for the operations management, as they were able to identify issues on the design, operations and management of both case studies built by different methods. The conclusion is that the issues identified through the use of this proposal could have reduced or outright avoided the failures if it was properly implemented in the operations. Furthermore, the importance of managing these projects is highlighted by applying best practices on designing and operations, with emphasis on continuous monitoring and integration of all teams involved.

Keywords: Mining. Tailings dams. Construction methods. Failure. Monitoring. Operation Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Falha em barragens de rejeito por período	15
Figura 2 - Falha em barragens de rejeito por tipo de barragem e modo de falha	15
Figura 3 - Perdas de vida e volume de rejeito em decorrência de rompimento de barragens	17
Figura 4 – Perfil de Segregação Hidráulica	27
Figura 5 - Fases para construção de uma barragem	28
Figura 6 - Sequência construtiva pelo método construtivo de montante	30
Figura 7 - Sequência construtiva pelo método a jusante	32
Figura 8 - Sequência construtiva pelo método de linha de centro	33
Figura 9 - Quantitativo com o número de barragens Inseridas na PNSB	44
Figura 10 - Classificação das barragens por volume da estrutura.	45
Figura 11 - Quantitativo de barragem em relação à altura	45
Figura 12 - Quantidade de barragens por método construtivo	46
Figura 13 - Estágio de desenvolvimento de ruptura por piping	50
Figura 14 - Número de casos de rupturas <i>versus</i> a idade da barragem	52
Figura 15 - Quantidade de acidentes por tipo de material empregado	53
Figura 16 - Etapas da ruptura da Barragem de Fernandinho.	56
Figura 17 - Desativação da Barragem de Contenção de Rejeitos Cataguases	59
Figura 18 - Vista da crista e do talude de jusante da barragem de São Francisco.	61
Figura 19 - Local de ruptura da B1(linha em vermelho) Barragem Herculano.	62
Figura 20 - Barragens do complexo Samarco Mineração S/A	63
Figura 21 - Avanço da lama sobre o rio até chegar ao mar.	64
Figura 22 - Localização das Barragens I e IV	68
Figura 23 - Alteamento e estágios de construção da barragem I, em perfil.	69
Figura 24 - Localização das barragens que romperam	75
Figura 25- Tipo de ruptura e método construtivos das barragens que romperam	75
Figura 26- Altura das barragens estudadas que romperam	84
Figura 27 – Mecanismo que levaram a ruptura das barragens estudadas	87
Figura 28-Sínteses do levantamento histórico de ruptura de barragens brasileiras	89
Figura 29-Definição das etapas para avaliação por meio da abordagem sugerida	104
Figura 30 - Topografia local da Barragem 1	104
Figura 31 - Local antes da implantação da Barragem 1 de Brumadinho.	105
Figura 32 - Projeto conceitual do dique de partida da Barragem I.	107
Figura 33 - Representação da instrumentação instalada na Barragem I.	109
Figura 34 - Alteração na forma de disposição de rejeito na Barragem I.	109
Figura 35 - Foto Ilustrativa da barragem com destaque para a Etapa 1.	110
Figura 36 - Foto Ilustrativa da barragem com destaque para a Etapa 2.	113
Figura 37 - Investigação geotécnica por meio de ensaios SPT	114
Figura 38 - Foto ilustrativa da barragem com destaque para a Etapa 3	118
Figura 39 - Representação do sistema de drenagem para terceiro alteamento.	120
Figura 40 - Foto ilustrativa da barragem destaca quarto alteamento – Etapa 4.	123
Figura 41 - Foto ilustrativa da barragem destaca quinto alteamento–Etapa 5.	127
Figura 42 - Foto ilustrativa da barragem destaca sexto alteamento – Etapa 5	129
Figura 43 - Foto ilustrativa da barragem destaca sétimo alteamento – Etapa 5	130
Figura 44 - Representação da seção transversal típica do sétimo alteamento.	131

Figura 45—Foto ilustrativa da barragem com destaca oitavo alteamento – Etapa 6	134
Figura 46 - Foto ilustrativa destaca nono e décimo alteamento – Etapa 6	135
Figura 47 – Vista da Barragem de São Francisco, destaca a barragem principal	143
Figura 48 - Vista aérea da Barragem de São Francisco	144
Figura 49 - Representação do layout da Barragem de São Francisco.	145
Figura 50- Drenagem interna implantado na Barragem de São Francisco	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking de falhas com barragem de rejeito no mundo.....	16
Tabela 2- Extração de minério em 2017.....	23
Tabela 3 - Algumas rupturas de barragens no mundo entre 1965 e 1996.....	34
Tabela 4 - Número de rupturas de barragem ocorrido no mundo.	35
Tabela 5 - Definição da categoria de Risco	39
Tabela 6 - Pontuação para as Características Técnicas (CT)	40
Tabela 7 - Pontuação para o Estado de Conservação (EC)	40
Tabela 8 - Pontuação para o Plano de Segurança da Barragem (PS).....	41
Tabela 9 - Classificação Geral DPA	42
Tabela 10 - Pontuação para cada item do DPA	43
Tabela 11 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração	48
Tabela 12 - Síntese das rupturas de barragens no Brasil.	77
Tabela 13 - Informações adicionais e classificação ao CRI, DPA das barragens.	82
Tabela 14 - Recomendações Operacionais.....	92
Tabela 15 - Ficha de Operação Simplificada.....	96
Tabela 16 - Proposta para pontuação na ficha de operação simplificada.	99
Tabela 17 - Sequência construtiva da Barragem I de Brumadinho.....	103
Tabela 18 - Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios para o dique.....	106
Tabela 19 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação, Etapa 1.	112
Tabela 20 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação, Etapa 2.	117
Tabela 21 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação, - Etapa 3.....	122
Tabela 22 - Resultado da verificação da estabilidade para o quarto alteamento.	125
Tabela 23 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação – Etapa 4	126
Tabela 24 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação – Etapa 5.	133
Tabela 25 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação – Etapa 6.....	139
Tabela 26 - Instrumentos e quantidade deles empregados na Barragem.	148
Tabela 27 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação incidente 2006....	152
Tabela 28 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação acidente 2007.....	154

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Objetivo	18
1.3	Justificativa	19
1.4	Organização do trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Mineração no Brasil.....	22
2.1.1	Indústria de mineração no Brasil.....	24
2.2	Considerações sobre o rejeito de mineração.....	24
2.2.1	Propriedades geotécnicas do rejeito	26
2.2.2	Segregação hidráulica	26
2.3	Barragens para contenção de rejeitos	27
2.3.1	Métodos construtivos para barragens de rejeito	29
2.3.2	Método de montante	30
2.3.3	Método de jusante	31
2.3.4	Métodos de linha de centro.....	32
2.4	Alguns acidentes com barragens da mineração no Mundo.....	34
2.5	Agências de fiscalização das barragens no Brasil.....	35
2.5.1	Conselho Nacional dos Recursos Hídricos	37
2.6	Legislação Brasileira: LEI 12.334 (BRASIL, 2010)	46
2.7	Principais mecanismos de ruptura em barragens de mineração.....	48
2.7.1	Instabilidade de Talude.....	49
2.7.2	Fundação	49
2.7.3	Erosão Interna Progressiva (<i>Pipping</i>)	50
2.7.4	Galgamento	50
2.7.5	Liquefação	51
2.7.6	Idade da barragem	51
2.7.7	Tipo de material de construção	52
3	HISTÓRICO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL....	54
3.1	Considerações iniciais	54
3.2	Eventos de rupturas de barragens de mineração no Brasil.....	54
3.3	As barragens de mineração que romperam.....	55
3.3.1	Barragem de Fernandinho	55
3.3.2	Barragem das Pedras	57
3.3.3	Barragem de Macacos.....	58

3.3.4	Barragem de Contenção de Rejeitos Cataguases	59
3.3.5	Barragem de São Francisco	60
3.3.6	Barragem Herculano Mineração	61
3.3.7	Barragem do Fundão	63
3.3.8	Barragem de Brumadinho	67
3.3.9	Barragem TB01 – Nossa Senhora do Livramento	74
3.3.10	Síntese das rupturas de barragens de rejeito estudadas	75
4	RECOMENDAÇÕES OPERACIONAIS PARA BARRAGENS DE REJEITO	90
5	ESTUDO DE CASOS	101
5.1	Considerações iniciais	101
5.2	Barragem I de Brumadinho	102
5.2.1	Considerações iniciais	102
5.2.2	Avaliação de desempenho - Etapa 01	104
5.2.3	Avaliação de desempenho - Etapa 02	113
5.2.4	Avaliação de desempenho - Etapa 03	118
5.2.5	Avaliação de desempenho Etapa 04.....	123
5.2.6	Avaliação de desempenho Etapa 05.....	127
5.2.7	Avaliação de desempenho Etapa 06.....	134
5.2.8	Considerações sobre o fenômeno de liquefação para a Barragem I.....	140
5.2.9	Considerações finais sobre avaliação da Barragem I de Brumadinho ..	141
5.3	Barragem de São Francisco	143
5.3.1	Considerações iniciais	143
5.3.2	Avaliação de Desempenho	144
5.3.3	Incidente ocorrido em 2006	150
5.3.4	Acidente ocorrido em 2007	150
5.3.5	Considerações finais sobre avaliação da Barragem de São Francisco.	155
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE.....	156
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	159

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A exploração do recurso mineral do subsolo pode ser realizada de diferentes maneiras, dependendo da viabilidade técnica e econômica de cada ocorrência mineral. A esta atividade é dado o nome de lavra, que pode ocorrer a céu aberto ou subterrâneo, podendo ser efetuada por desmonte mecânico, hidráulico ou fazendo uso de explosivos (Avila *et.al* 2007).

Antes do início da extração mineral é necessário passar o licenciamento do empreendimento. Neste processo, a empresa que requer o direito de extração mineral, precisa explicar como a extração do minério será realizada, onde o estéril da mina será depositado e qual a área de supressão vegetal necessária. Após a lavra do recurso mineral, o minério retirado será tratado e processado nas chamadas usinas de beneficiamento mineral, para que seja retirado os contaminantes e ajustada sua granulometria. Como resultado deste processo tem-se o produto, material com valor econômico; e o rejeito, material sem valor econômico. Este último precisa ser descartado em local apropriado (Avila *et.al* 2007).

O descarte do rejeito pode ser realizado de várias formas: o rejeito seco pode ser descartado formando pilhas, com uso de transportador de correias ou levado por caminhões. O rejeito em forma de polpa, formado por sólidos e água do processo, geralmente é direcionado por gravidade ou bombeado, por tubulação, para as barragens de rejeito, a depender da topografia. As barragens que têm como função o recebimento de rejeito de mineração são denominadas Barragens de Rejeito (Espósito, 2000).

Barragens são estruturas que podem ser utilizadas para diversos fins como represar água, irrigação, gerar energia elétrica entre outras finalidades. Barragem de rejeito de mineração são estruturas projetadas para receber o rejeito do processo de beneficiamento mineral na forma de polpa, geralmente com 30% do volume de sólido e 70% do volume de água. A água é reutilizada no processo de beneficiamento em circuito fechado (Espósito, 2000).

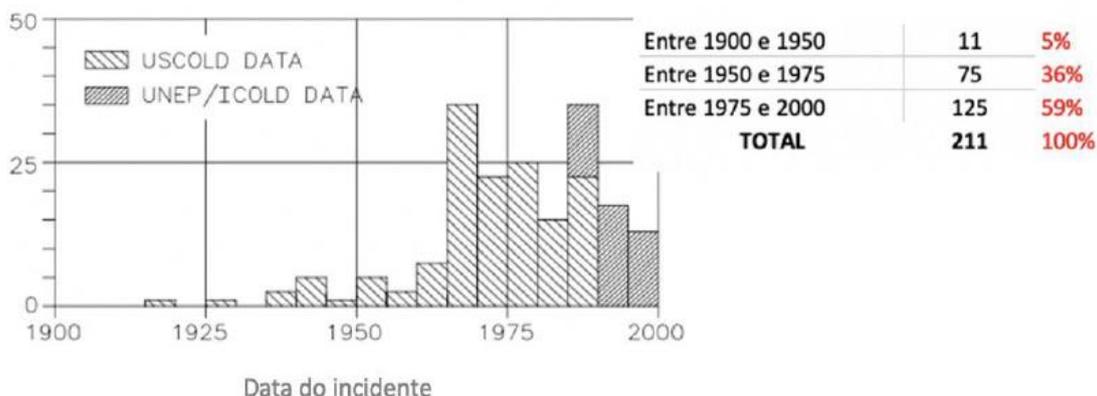
Os acidentes com barragens de rejeito causam grandes impactos sociais, ambientais e econômicos que podem ser minimizados ou até mesmo erradicados fazendo uso de boas práticas operacionais e geotécnicas (Oliveira, 2010). A aplicação dos conhecimentos geotécnicos na indústria de mineração, do Brasil e no mundo, é fundamental para prevenir e evitar rupturas ou incidentes com barragens, fazendo uso de instrumentação, monitoramento, amostragem, dentre outros. O manejo de rejeito é uma atividade de risco e tal atividade requer gerenciamento adequado. A gestão de riscos de estruturas geotécnicas envolve avaliação dos riscos de falhas e instalação de atividade para mitigação e controle destes (Fernandes, 2020). Órgãos como o *International Commission on Large Dams* (ICOLD), *Australian Committee On Large Dam* (ANCOLD) e *Canadian Dam Association* são exemplos de entidades internacionais que estudam e publicam diretrizes e recomendações abordando o tema de segurança de barragens (Fernandes, 2020).

O Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), organização não governamental que atualmente reuni 81 membros, tem objetivo de orientar o profissional na construção e gerenciamento de barragens de forma eficiente, segura e econômica. Estudo de falhas e incidentes nas fundações de barragens realizado em 1964 pelo ICOLD, com objetivo de entender o comportamento das barragens existentes à época, possibilitou vários estudos e publicações com dados sobre incidentes ocorridos com barragem distribuídas nos mais diversos continentes. Ao todo foram 517 casos analisados, embora o número de estruturas pesquisadas fosse 570, cinquenta e três destas não tinham informações suficientes para serem avaliadas neste estudo (Fernandes, 2020).

No boletim 121 do ICOLD (2001) encontram-se 211 casos de falhas em barragens de rejeito espalhados por todo o mundo, integrando assim, diferentes bases de dados com descrição sucinta de cada evento. Uma das principais conclusões desse estudo foi que a maioria das falhas ocorreu por gerenciamento inadequado, uma vez que o conhecimento geotécnico disponível era suficiente para entender o comportamento das barragens e elaborar projetos seguros. A Figura 1, adaptada do mesmo boletim, por Fernandes (2020), apresenta a quantidade de falhas em barragem de rejeitos em função do tempo. Por meio

desta figura, observa-se que mais da metade das falhas ocorreram entre 1974 e 2000.

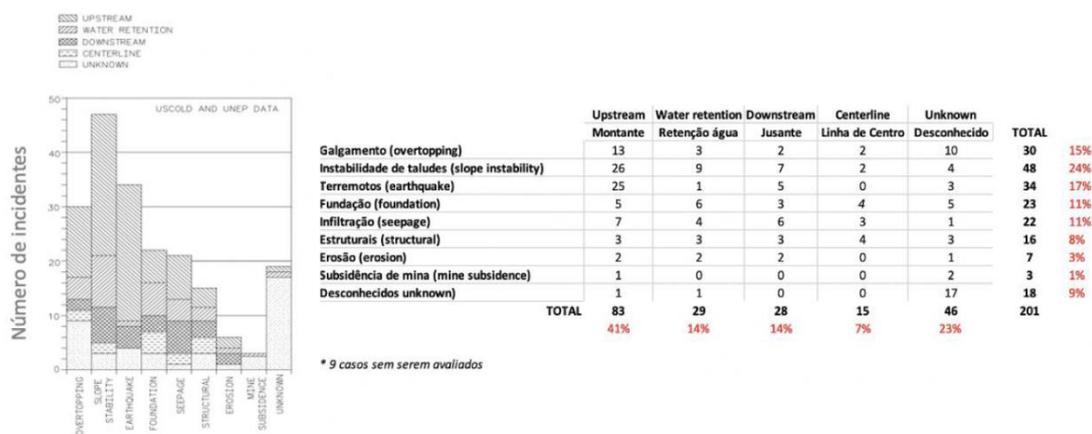
Figura 1 - Falha em barragens de rejeito por período



Fonte: Adaptado por Fernandes (2020) do ICOLD (2001).

Ainda com base no ICOLD (2001), e adaptado por Fernandes (2020), a Figura 2 apresenta o total de falhas em barragens de rejeito discriminadas por tipo de barragem e modo de falha. Com base nessa informação, observa-se que os principais problemas são: instabilidade de talude correspondendo a 24% das falhas, terremoto e galgamento, com 17% e 15%, respectivamente, além de fundação e infiltração com 11% na categoria. Quando se avalia o método construtivo empregado, 43% das falhas ocorreram em estruturas construídas pelo método a montante. Importante destacar que, neste estudo, em 23% das estruturas estudadas não se conhece o método construtivo utilizado.

Figura 2 - Falha em barragens de rejeito por tipo de barragem e modo de falha



Fonte: Adaptado por Fernandes (2020) do ICOLD (2001).

O *Center for Science in Public Participation* (CSP2) realizou levantamento de dados históricos de falhas em barragem de rejeitos entre os anos de 1900 a agosto 2016. Nesta pesquisa, um total de 289 registros de rupturas foram identificados, considerando barragens localizadas em diversos países. Analisando o resultado de ruptura por país, foi possível elaborar ranking, apresentado na Tabela 1. Observa-se que os Estados Unidos das Américas estão em primeiro lugar, com 41%, seguido por Chile e China. O Brasil tem apenas 4% das falhas listadas e ocupa o sétimo lugar, com o mesmo número de ruptura/incidente ocorridas na Austrália. Dos 193 países existentes no mundo, 83% das falhas e incidentes ocorreram em 14 países, sendo a 14^o posição ocupada por pequenos países na Europa (FERNANDES,2020).

Tabela 1 - Ranking de falhas com barragem de rejeito no mundo

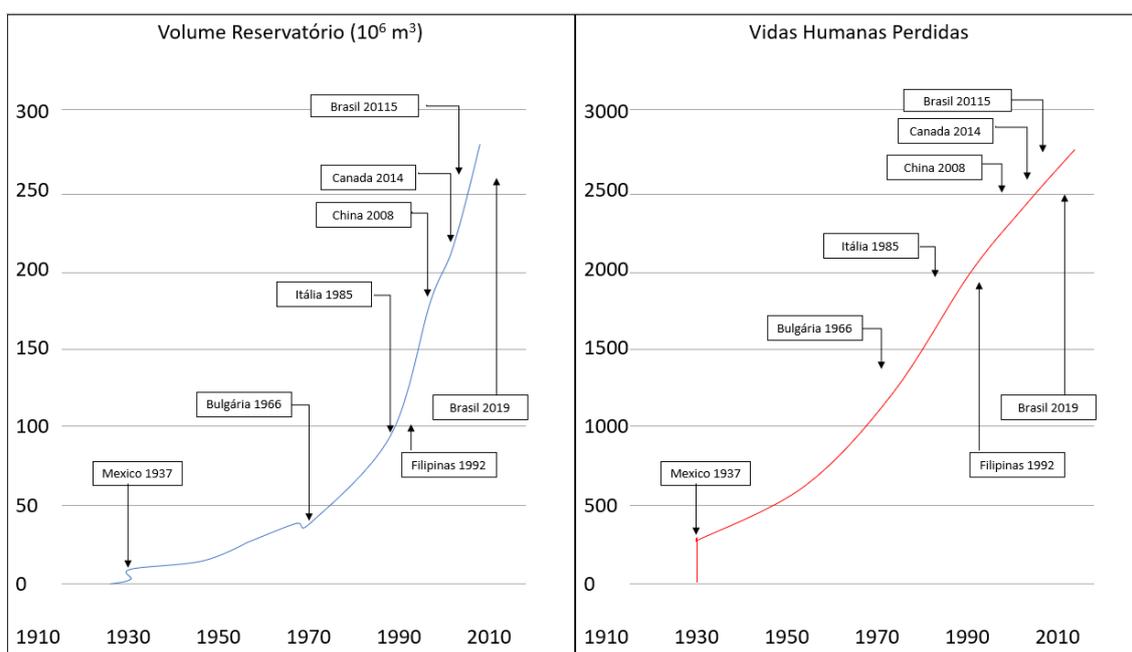
Posição	País	Nº total de Ruptura/Incidente	%
1º	USA	98	41%
2º	Chile	35	15%
3º	China	17	7%
4º	Filipinas	17	7%
5º	Reino Unido	17	7%
6º	África	12	5%
7º	Brasil	9	4%
8º	Austrália	9	4%
9º	Peru	5	2%
10º	Japão	5	2%
11º	México	4	2%
12º	Bulgária	4	2%
13º	Espanha	4	2%
14º	Indefinido	4	2%
Total		240	100%

Fonte: Adaptado de CSP2 (2016), por Fernandes (2020).

No Brasil, em 2020, a Agência Nacional de Mineração (ANM), indicou que existem 830 barragens cadastradas, e destas apenas 428 estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Este número corresponde a 51,5% das barragens existentes no Brasil.

Santamarina *et al.* (2019) destacaram que as rupturas históricas de barragens podem contribuir para o entendimento do comportamento delas, e servir de ferramenta para a previsão de ocorrência de novas falhas. Há milhares de barragens de rejeito no mundo e a compreensão das causas das rupturas podem ajudar a melhorar as práticas de gerenciamento. Na Figura 3 são apresentadas as perdas de vida decorrentes destes incidentes e volume de rejeito liberado, em muito dos casos, com impactos significativos ao meio ambiente.

Figura 3 - Perdas de vida e volume de rejeito em decorrência de rompimento de barragens



Fonte: Adaptado de Santamarina (2019).

O levantamento do histórico de rompimento de barragens no Brasil, realizado nesta pesquisa, tem por objetivo buscar informações e compreender melhor a realidade das barragens existentes no Brasil. A motivação é que nas últimas décadas, no país, ocorreram rompimentos de grandes proporções com consequências ambientais, humanas, sociais e econômicas. Assim, quando o

trabalho teve início, fez-se contato com a ANM para confirmar os registros disponíveis. A agência fez um breve relato das rupturas que ocorreram no Brasil. Constatou-se, com base nesse relato, que até 20/05/2020, houve rompimento de nove barragens, oito no estado de Minas Gerais e uma no estado do Mato Grosso.

Destas nove barragens, seis foram construídas pelo método de montante (67%), e 13% foram construídas por método desconhecido. Das barragens construídas pelo método de montante, 80% têm como causa principal do rompimento falha na drenagem e erro na forma de disposição do rejeito, levando ao fenômeno de liquefação. Observa-se as últimas duas grandes rupturas, ocorridas em 2015 e 2019, esse foi o principal motivo de rompimento.

Outro aspecto importante do levantamento realizado, é a forma de operação da estrutura. Constatou-se que a operação inadequada das barragens aumenta significativamente as chances de ruptura por liquefação, isso ocorre em função de alguns procedimentos operacionais inadequados, como: método de disposição dos rejeitos, que pode gerar estratificação de camadas, que influenciam negativamente nas condições de consolidação, permeabilidade; e deformabilidade e resistência do depósito, principalmente se o método construtivo for a montante.

Baseado nestas observações, elaborou-se uma proposta para avaliar a operação, empregando como instrumento uma ficha de recomendações operacionais simplificada, onde as boas práticas de operação de barragem disponíveis na literatura são destacadas. A proposta para avaliação da operação tem como objetivo identificar se a operação da barragem está sendo feita como previsto no projeto e se é necessária intervenção de especialista, por meio de uma pontuação simples, numa escala de 0 a 3.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é fazer um levantamento das principais barragens de rejeito de mineração que romperam no Brasil entre 1986 e 2019, a fim de fazer uma síntese das principais causas de ruptura, com base nos fundamentos de

geotecnia, e considerando aspectos da operação de barragens. O destaque será dado a importância da operação para garantir segurança das barragens, e apresentar uma proposta para a avaliação dessa operação.

Para atingir esse objetivo as seguintes etapas e trabalhos serão realizados:

- Apresentar um histórico de ruptura de barragens de rejeito de mineração, no Brasil durante o período de 1986 a 2019;
- Compreender e apresentar as principais causas que levaram a ruptura destas barragens;
- Fazer uma síntese dessas ocorrências, com foco no papel da geotecnia no projeto, monitoramento e na operação destas barragens;
- Avaliar o modo de operação das barragens ao longo do tempo, considerando os diferentes procedimentos operacionais, com destaque para disposição, gerenciamento das águas, sistemas de drenagem, alteamento, monitoramento e manutenção; e
- Apresentar uma proposta para avaliação da operação e controle das barragens, a fim de procurar garantir sua segurança. A proposta para avaliação da operação utilizará como instrumento uma ficha simplificada de operação, que será a ferramenta utilizada para auxiliar na tomada de decisão, com o intuito de avaliar o *status* das condições das estruturas, com ênfase na geotecnia e como estes podem ser adequados com os procedimentos de operação orientado por especialista.

1.3 Justificativa

Na indústria de mineração observa-se a prática antiga de disposição de rejeito em forma de polpa, em barragens de rejeito de mineração. Estas estruturas, no início dos tempos, foram construídas praticamente sem projeto. Com o passar dos anos, com o crescimento da indústria de extração mineral e em função do aquecimento do mercado, estruturas cada vez maiores foram necessárias. A complexidade de construção aumentou, assim com o porte destas. Assim, foi necessário a elaboração de projetos para construção de barragens, e o acompanhamento da obra até entrega para operação e monitoramento (Avila *et al.*2007).

Recentemente, a legislação brasileira incorporou o *As Build* como documentação necessária para classificação de risco de uma barragem (FERNANDES, 2020). Constata-se, porém que após a entrega da estrutura, não existia procedimentos que descrevesse a forma de operar destas barragens. Tal fato é de extrema importância para seu bom desempenho, estabilidade e segurança das operações, pessoas e meio ambiente (FERNANDES, 2020).

Recomendações para a operação dessas estruturas, a fim de auxiliar os profissionais que são responsáveis pela operação de barragens, a executar esta atividade de forma eficiente são necessárias para melhor eficiência do empreendimento. Também é interessante neste processo aproximar os profissionais que atuam na operação desses empreendimentos com a comunidade acadêmica, que muito podem auxiliar durante toda a vida útil da barragem e após sua paralização até o descomissionamento.

O estudo histórico de rompimento de barragem no Brasil, com foco nos aspectos geotécnicos, aponta vários erros, observados durante a operação. Destaca-se também que a instrumentação das estruturas é importante para que seja possível fazer um bom gerenciamento das condições internas do maciço. O histórico de ruptura de barragem é importante para entender como os aspectos geotécnicos e a correta operação das barragens é essencial para garantir a estabilidade da estrutura.

O histórico de rompimento de barragens no Brasil evidencia que grande parte das falhas foi causada por problema de drenagem ligado a problemas operacionais. Uma síntese sobre a construção e operação deste sistema, também é uma contribuição relevante para melhor compreensão desta questão.

A operação adequada é indispensável para manter a segurança da barragem de rejeitos. Manutenção e operação impróprias podem resultar em situações críticas que levam a graves falhas, podendo causar ruptura da barragem (OLIVEIRA, 2010). Sendo assim, proposta para avaliação da operação, considerando as particularidades de cada estrutura, devem ser desenvolvidas e entregue a operação antes da estrutura entrar em operação.

Entende-se que a elaboração de uma proposta para avaliação da operação empregando uma ficha simplificada de operação é diferente da que em geral se

faz apenas com uma ficha de inspeção, pois a primeira tem como objetivo informar a melhor forma de operar a barragem e caso seja necessário solicitar intervenção de especialista. Já, a segunda, ou seja, a ficha de inspeção, procura-se evidenciar as condições estruturais da barragem.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho tem início com uma revisão da literatura, apresenta os principais aspectos de interesse desse estudo e identifica as barragens de rejeitos brasileiras, em especial aquelas que apresentaram problemas. O material estudado será aquele gerado pela academia, por meio de artigos científicos de circulação nacional e internacional e aqueles disponíveis na Agência Nacional de Mineração e comitês de estudo. Após esta revisão será realizada a interpretação dos dados e uma síntese, de modo a identificar os mecanismos de falhas destas estruturas à luz dos fundamentos da geotecnia, buscando identificá-los e compreendê-los. Uma proposta para avaliação da operação tendo como instrumento uma ficha simplificada de operação das barragens, considerando as particularidades de cada estrutura, será elaborada com objetivo de que ela seja utilizada na operação das barragens de rejeito. A proposta de avaliação da operação será apresentada e testada no estudo de dois casos de ruptura de barragens de rejeito, uma construída pelo método de montante e outra de jusante, reportados na literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineração no Brasil

Tem-se, no Brasil, grande potencial para a extração de recursos minerais bem diversificados. Os minerais encontrados nas rochas são largamente utilizados e pode-se extrair dos minerais substâncias que serão utilizadas nas indústrias químicas, metalúrgicas, farmacêuticas. Estes recursos naturais podem ser usados também na construção civil e agroindústria. O vidro das janelas de nossas casas é fabricado a partir da mistura de dois minerais “feldspato” e quartzo. Na lâmpada elétrica o mineral utilizado é o tungstênio para produção do filamento retirado do mineral Scheelita. Também existe o caso das rochas ornamentais, como mármore e granitos usados para revestimentos que também dependem da atividade de mineração (AVILA *et.al.*,2007).

A mineração é uma das atividades mais primitivas da humanidade, usada pelo homem para sobrevivência, produção de bens sociais e industriais. A atividade de pesquisa para descoberta do recurso mineral é a primeira atividade dentro da mineração. Após a descoberta do recurso mineral é realizado a extração: onde o material sem valor econômico, ou aplicação, é denominado estéril, que é removido para a liberação do minério material de interesse. O minério extraído é levando, então, para a usina de tratamento de minério onde irá passar por processo de cominuição, peneiramento, classificação até chegar à especificação necessário para atender a demanda do mercado. Ao final do tratamento do minério têm-se dois materiais: o produto que será comercializado e o rejeito que será descartado (Espósito, 2000).

A atividade de mineração brasileira, segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2018), realizado pela ANM está concentrada nos estados de Minas Gerais e Pará, existe mineração nos outros estados brasileiros, porém em menor concentração.

No ano de 2017 os minerais metálicos foram responsáveis por 80% da produção mineral comercializada. Tal categoria é seguida dos minerais não metálicos que corresponderam a 20% da produção, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2- Extração de minério em 2017

Substância	Quantidade (ROM)		Contido		Teor Médio		
Alumínio (bauxita)	49.714.940	t	23.529.698	t	47,33	%	Al₂O₃
Pará	45.570.808	t	21.747.257	t	47,72	%	Al ₂ O ₃
Minas Gerais	2.620.668	t	1.056.207	t	40,30	%	Al ₂ O ₃
Goiás	827.800	t	445.987	t	53,88	%	Al ₂ O ₃
São Paulo	680.674	t	273.502	t	40,18	%	Al ₂ O ₃
Santa Catarina	14.989	t	6.745	t	45,00	%	Al ₂ O ₃
Cobre	111.340.233	t	616.934	t	0,55	%	Cu
Pará	76.154.412	t	499.193	t	0,66	%	Cu
Goiás	33.410.950	t	94.486	t	0,28	%	Cu
Bahia	1.774.872	t	23.255	t	1,31	%	Cu
Cromo	1.445.137	t	245.165	t	16,96	%	Cr
Bahia	1.445.137	t	245.165	t	16,96	%	Cr
Estanho	20.759.504	t	17.196.564	kg	828,37	g/t	Sn
Rondônia	9.792.415	t	6.600.755	kg	674,07	g/t	Sn
Amazonas	6.494.375	t	7.244.647	kg	1.115,53	g/t	Sn
Pará	3.952.752	t	2.800.983	kg	708,62	g/t	Sn
Mato Grosso	360.600	t	430.658	kg	1.194,28	g/t	Sn
Minas Gerais	159.361	t	119.521	kg	750,00	g/t	Sn
Ferro	585.337.085	t	318.587.105	t	54,43	%	Fe
Minas Gerais	406.877.966	t	204.829.783	t	50,34	%	Fe
Pará	168.495.286	t	110.293.917	t	65,46	%	Fe
Mato Grosso do Sul	5.020.295	t	3.094.736	t	61,64	%	Fe
São Paulo ⁽¹⁾	4.850.498	t	317.663	t	6,55	%	Fe
Maranhão	45.237	t	20.356	t	45,00	%	Fe
Bahia	36.459	t	23.510	t	64,48	%	Fe
Amazonas	5.913	t	4.139	t	70,00	%	Fe
Ceará	3.613	t	2.230	t	61,71	%	Fe
Rio Grande do Norte	1.818	t	771	t	42,42	%	Fe
Manganês	5.805.557	t	1.934.237	t	33,32	%	Mn
Pará	3.988.646	t	1.412.337	t	35,41	%	Mn
Mato Grosso do Sul	814.263	t	356.891	t	43,83	%	Mn
Rondônia	537.260	t	51.577	t	9,60	%	Mn
Minas Gerais	368.018	t	82.371	t	22,26	%	Mn
Ceará	45.867	t	11.338	t	24,72	%	Mn
Mato Grosso	39.600	t	14.929	t	37,70	%	Mn
Bahia	10.660	t	4.295	t	40,29	%	Mn
Goiás	1.242	t	497	t	40,01	%	Mn
Nióbio	23.575.307	t	142.324	t	0,60	%	Nb₂O₅
Goiás (pirocloro)	12.507.212	t	61.062	t	0,49	%	Nb ₂ O ₅
Amazonas (columbita-tantalita)	6.494.375	t	2.403	t	0,04	%	Nb ₂ O ₅
Minas Gerais (pirocloro)	3.032.878	t	78.554	t	2,59	%	Nb ₂ O ₅
Rondônia (columbita-tantalita)	1.540.842	t	304	t	0,02	%	Nb ₂ O ₅
Níquel	7.253.656	t	111.970	t	1,54	%	Ni
Goiás	6.289.441	t	92.102	t	1,46	%	Ni
Pará	964.215	t	19.868	t	2,06	%	Ni
Ouro ⁽²⁾	92.206.502	t	59.684	kg	0,65	g/t	Au
Goiás	36.037.863	t	15.238	kg	0,42	g/t	Au
Minas Gerais	33.371.797	t	28.748	kg	0,86	g/t	Au
Pará	13.313.709	t	3.891	kg	0,29	g/t	Au
Bahia	3.273.576	t	6.613	kg	2,02	g/t	Au
Mato Grosso	3.076.811	t	1.037	kg	0,34	g/t	Au
Amapá	3.021.802	t	3.733	kg	1,24	g/t	Au
Paraná	79.893	t	356	kg	4,45	g/t	Au
Tocantins	18.537	t	22	kg	1,19	g/t	Au
Rio Grande do Norte	12.513	t	46	kg	3,66	g/t	Au
Vanádio	1.165.950	t	19.143	t	1,64	%	V₂O₅
Bahia	1.165.950	t	19.143	t	1,64	%	V ₂ O ₅
Zinco	2.510.582	t	198.835	t	7,92	%	Zn
Minas Gerais	2.425.977	t	187.524	t	7,73	%	Zn
Rondônia	84.605	t	11.312	t	13,37	%	Zn

Fonte: AMN (2018a).

2.1.1 Indústria de mineração no Brasil

A indústria de mineração contribui de forma significativa na economia e desenvolvimento social do país, fazendo parte da cadeia produtiva formada pelas indústrias de base mineral. A produção mineral do Brasil é uma das maiores do mundo. Segundo Relatório Anual Atividades do IBRAM (2019) o Brasil exportou, em 2018, o volume superior a 409 milhões de toneladas. Este volume representa 12,5% do total de exportação do Brasil e corresponde a 36,6% do saldo comercial. Quando analisado o Produto Interno Bruto (PIB) a indústria extrativa corresponde a 3,7% de todo o PIB, composto por 71,2% setor de serviço, 23,8% setor industrial e 5% setor agropecuário.

A indústria de mineração é, em sua maior parte, formada por empresas de pequeno e médio porte. Sendo esta indústria essencial na promoção de empregos em vários seguimentos dentro do setor. A cada oportunidade criada de emprego, na mineração, estimula outros 11 empregos em subcontratados e fornecedores. Até janeiro de 2019, aproximadamente 195 mil novos empregos foram gerados de forma direta, segundo dados da Secretaria do Trabalho e Ministério de Economia.

2.2 Considerações sobre o rejeito de mineração

Antigamente, a produção de rejeito pela indústria extrativa, e os impactos do descarte deste material no meio ambiente, era considerado desprezível. Sabe-se da ocorrência de barragens de rejeitos apenas no século XV. No Brasil, antes da exploração do ouro, se tem indício de algumas estruturas elaboradas para contenção de rejeito. Com o desenvolvimento das máquinas a vapor, a mineração ganhou capacidade de produção e a geração de rejeito aumentou, surgindo assim a necessidade de melhorar a forma de disposição deste (AVILA *et.al.*,2007).

No século XIV, o desenvolvimento tecnológico permitiu a exploração de recurso mineral com baixo teor mineral, o que aumentou ainda mais a produção de rejeitos de mineração. A exponencial geração de resíduos de mineração

provocou aumentos significativos das estruturas responsáveis por armazenar este material. A simplicidade de operação, associada a viabilidade econômica, quando comparado com outros métodos de disposição de rejeito, faz com que as barragens se tornassem indispensáveis obras para o setor mineral (AVILA *et.al.*,2007).

Rejeito são partículas sólidas sem valor econômico, ou utilização, gerado durante o processo de tratamento do minério. Este ocorre por diferentes maneiras como: britagem, moagem, peneiramento, visando alterar a granulometria do minério e liberação do mineral de interesse. A granulometria varia em função do tipo de minério e a demanda do mercado (ESPÓSITO, 2000).

A partir do momento que é gerado, na usina de beneficiamento, o rejeito pode ser classificado com base no seu percentual de sólido, considerando a quantidade de água que o compõem, a polpa (Fernandes,2020).

- Rejeito Filtrado: é o rejeito com concentração de sólido entre 78 e 88%. Pode ser transportado por caminhões ou correias transportadoras.
- Rejeito em pasta: é o rejeito com concentração de sólido varia entre 60% e 75%. São desaguados até que a viscosidade aumente e a velocidade crítica deixa de existir. São depositados da mesma forma que os espessados: formando pilhas cônicas.
- Rejeito Espessado: é o rejeito com concentração de sólido entre 50% e 60%. Pode ser transportado em forma de polpa, por tubulação, ou gravidade.
- Rejeito não espessado: é o rejeito com concentração de sólido abaixo de 50%.

A seleção de um método ou outro para a disposição dos rejeitos depende da natureza do processo de mineração, das condições geológicas e topográficas da região, das propriedades mecânicas dos materiais e do poder de impacto ambiental do contaminante dos rejeitos (DUARTE, 2008).

2.2.1 Propriedades geotécnicas do rejeito

O comportamento geotécnico dos rejeitos está ligado às características do material, à natureza do depósito e à forma como foi depositado. Estes depósitos resultam em duas classes distintas de material: areias lançadas por mecanismos hidráulicos e lamas depositadas por sedimentação. A granulometria é a característica mais importante e determina o comportamento dos rejeitos (SOARES, 2010).

A compreensão do comportamento geotécnico do rejeito possibilita calcular a vida útil do reservatório, através de teoria de consolidação ou adensamento. O comportamento geotécnico do rejeito é importante para entender o comportamento dos diques em termo de deformabilidade, condições de percolação e estabilidade de taludes, principalmente se o rejeito for usado para alteamento das barragens.

A caracterização geotécnica do rejeito é realizada com base nos conhecimentos de Mecânica dos Solos que são: índice de vazios, densidade in situ, limites de Atterberg, resistência ao cisalhamento, permeabilidade, consolidação ou adensamento, compressibilidade (SOARES, 2010).

2.2.2 Segregação hidráulica

Segundo Soares (2010), a segregação hidráulica está diretamente associada ao processo de deposição das partículas de tamanhos diferentes e a distâncias de lançamento diferentes. Na Figura 4, expõe-se a representação clássica da disposição hidráulica das partículas de rejeito e as permeabilidades esperadas. Na qual se observa três zonas:

- A primeira constituída por areias de alta permeabilidade, situada próxima ao ponto de descarga;
- A segunda, de permeabilidade intermediária situada entre a primeira e a última zona.
- A terceira, de baixa permeabilidade, formada por lamas, situada distante do ponto de lançamento.

Figura 4 – Perfil de Segregação Hidráulica



Fonte: Soares (2010).

A segregação hidráulica ocorre em função do peso das partículas e não pelo tamanho delas. A largura das diferentes zonas varia de acordo com a quantidade de lamas e areias, a localização da barragem em relação ao ponto de descarga também interfere no processo.

2.3 Barragens para contenção de rejeitos

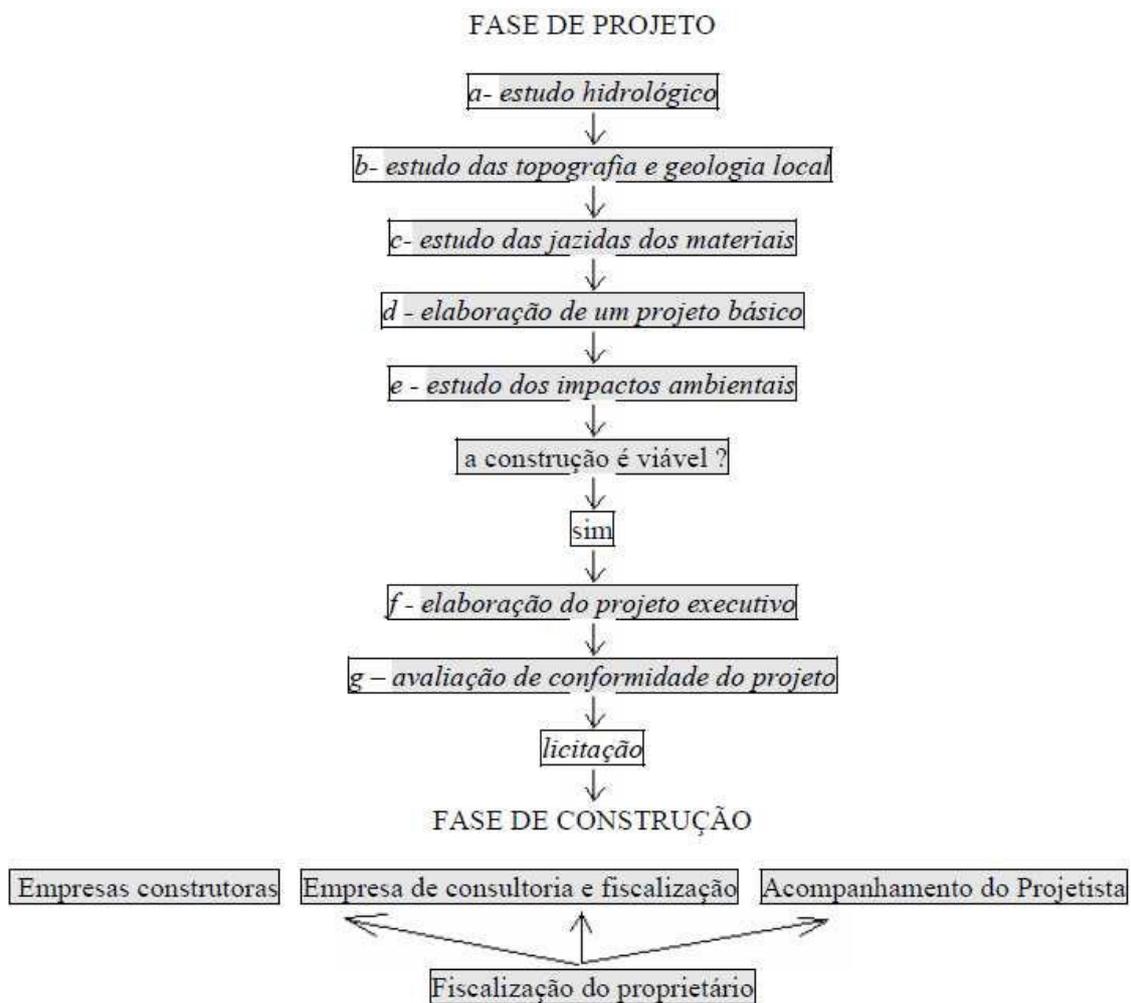
Barragens são estruturas que podem ser utilizadas para diversos fins como: represamento de água, irrigação, geração de energia elétrica entre outras finalidades. As barragens de rejeito de mineração, tem a finalidade de receber o rejeito gerado pelo processo de beneficiamento. Podem ser construídas com aterros, usando material disponível em áreas próximas à estrutura. O estéril proveniente da mina pode ser usado para a construção do aterro, assim com o rejeito da usina de beneficiamento. A utilização de cavas exauridas para disposição de rejeito também é praticável, a depender das condições de topografia pode ser viável a construção de dique nos pontos mais baixos da cava (SOARES, 2010).

A construção de barragens de rejeito pode ser um processo continuado, isto é, estendendo-se por praticamente todo o período da atividade mineral, sendo necessário acompanhamento do desenvolvimento da estrutura e possíveis modificações e aprimoramentos do projeto inicial. Desse modo, pode-se dispor,

de forma segura, todos os rejeitos gerados no processamento, minimizando os riscos de acidentes (SOARES, 2010).

Para Duarte (2008), a construção de uma barragem deve ser composta de duas grandes fases distintas: a de projeto e de construção. A fase de projeto deve seguir algumas etapas, tais como o estudo hidrológico, estudos topográficos, estudos das jazidas dos materiais utilizados na construção, elaboração do projeto básico, estudos dos impactos ambientais, projeto executivo ou detalhamento do projeto básico. Na Figura 5 apresenta-se um resumo das fases para construção de uma barragem.

Figura 5 - Fases para construção de uma barragem



Fonte: Duarte, 2008.

2.3.1 Métodos construtivos para barragens de rejeito

Os reservatórios de rejeitos consistem em estruturas de retenção com a função de barrar o material represado, impedindo que ocorram danos com movimentações horizontais e verticais, em função do empuxo e dos recalques e adensamentos. Para a execução destes barramentos de rejeitos são construídos diques, normalmente alteados com material natural de empréstimo, com características residuais ou coluvionares. Há também a possibilidade de se utilizar saprolitos, ou estéreis de cavas, ou até mesmo o próprio rejeito para a construção destes barramentos, desde que estes possuam propriedades geotécnicas para tal (FERNANDES, 2017).

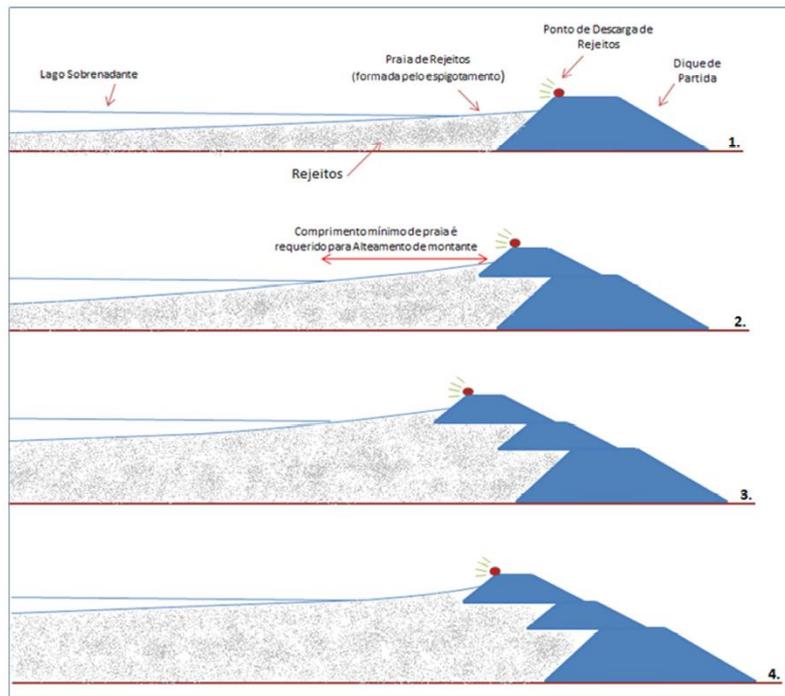
A construção de uma barragem inicia-se pelo dique de partida, o qual deve ser dimensionado com uma altura adequada para atender o primeiro ano de operação e é normalmente formado por solo ou material de enrocamento. Posteriormente, serão realizados os alteamentos conforme o avanço na frente de lavra. A maneira mais comum de realizar um alteamento é adicionar o material novo compactado acima da crista e sobre o talude antigo (carregamento), formando um aterro. Nesse caso, não é necessário rebaixar o nível do reservatório (MACHADO, 2007).

São caracterizadas técnicas do método de construção dos barramentos; de montante, de jusante, e de linha de centro. Estas denominações resultam do deslocamento que o eixo da barragem desenvolve durante seu alteamento. Deve-se assinalar que cada método deverá ser o mais adequado às combinações das variáveis condicionantes de cada projeto: topografia, hidrologia, geologia, tipos e propriedades do subsolo, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura, disponibilidade de equipamentos de terraplanagem, compactação e equipes de controle. A seguir são discutidos os principais itens específicos a cada método de alteamento (SOARES, 2010).

2.3.2 Método de montante

A construção das barragens de rejeitos, com a técnica de aterro hidráulico pelo método de montante, constitui a forma mais antiga e simples, caracterizando-se como uma evolução natural dos procedimentos empíricos de disposição de rejeitos. A etapa inicial de construção deste tipo de barragem consiste, normalmente, na execução de um dique de partida de terra compactada ou enrocamento. Por razões técnicas e construtivas, o rejeito é então lançado a montante da periferia da crista por canhões ou hidrociclones formando uma praia de deposição, que servirá como fundação e fornecerá material para execução dos alteamentos subsequentes, como mostra a Figura 6. Este processo é repetido continuamente até que a cota final prevista para a barragem seja atingida (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Figura 6 - Sequência construtiva pelo método construtivo de montante



Fonte: Adaptado de Vick (1983), por Fernandes (2017).

Este método de construção de barragem é muito usado em mineração, pela facilidade de execução, baixo volume de material necessário nas etapas de alteamento, os equipamentos de terraplenagem para a atividade são poucos, a

velocidade do alteamento é maior quando comparado com os outros métodos, e o custo de execução é menor.

Segundo Soares (2010), durante a operação da barragem pode ocorrer entubamento, provocando surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados. Há risco de ruptura provocado pela liquefação da massa de rejeitos, por efeito de sismos naturais ou vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos. Apresenta menor coeficiente de segurança, em função da linha freática, em geral, situada muito próxima ao talude de jusante. A superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados.

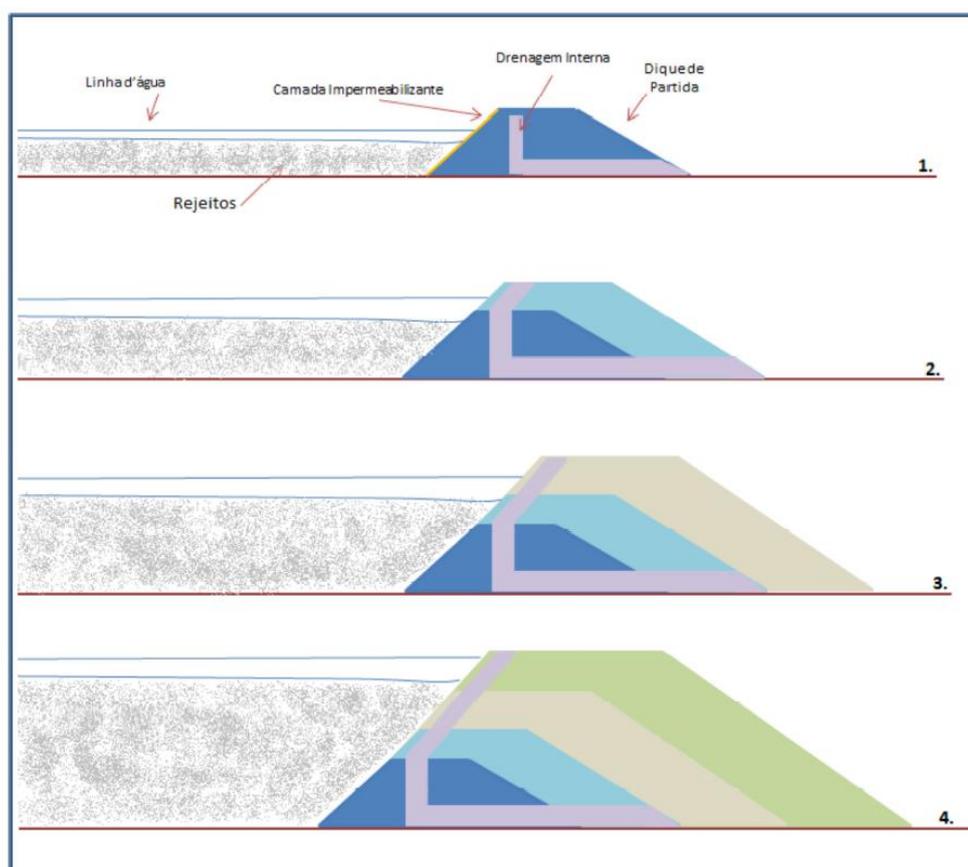
2.3.3 Método de jusante

A execução da barragem de rejeito a jusante é chamada assim porque nos alteamentos, o eixo da barragem se desloca para jusante, como mostra a Figura 7. É construído um dique inicial impermeável, que deve ter drenagem interna, composta por tapete drenante e filtro vertical (LOZANO, 2006).

No Método de Jusante os alteamentos são realizados de modo que o eixo da barragem se desloca para jusante, até atingir a cota de projeto. O método necessita de grande volume de material para os alteamentos, pode ser utilizado o próprio rejeito, solo de áreas de empréstimo ou o próprio estéril da lavra. Em casos de utilização do rejeito para a realização dos alteamentos, são utilizados caminhões, ciclones ou outros métodos de separação, visando desagregar a fração grossa (“underflow”) da fração fina (“overflow”). Somente a fração grossa é utilizada no corpo da barragem (ESPÓSITO, 2000).

A sequência de alteamento pode ser vista na Figura 7. A construção do dique não ocorre sobre o rejeito, o lançamento do material de empréstimo para execução da barragem pode ser controlado por técnicas usuais de construção, como ensaio para controle de compactação. A linha de saturação é controlada pelo sistema de drenagem interno, a resistência aos efeitos dinâmicos, como forças sísmicas é satisfatória.

Figura 7 - Sequência construtiva pelo método a jusante



Fonte: Adaptado de Vick (1983) por Fernandes (2017).

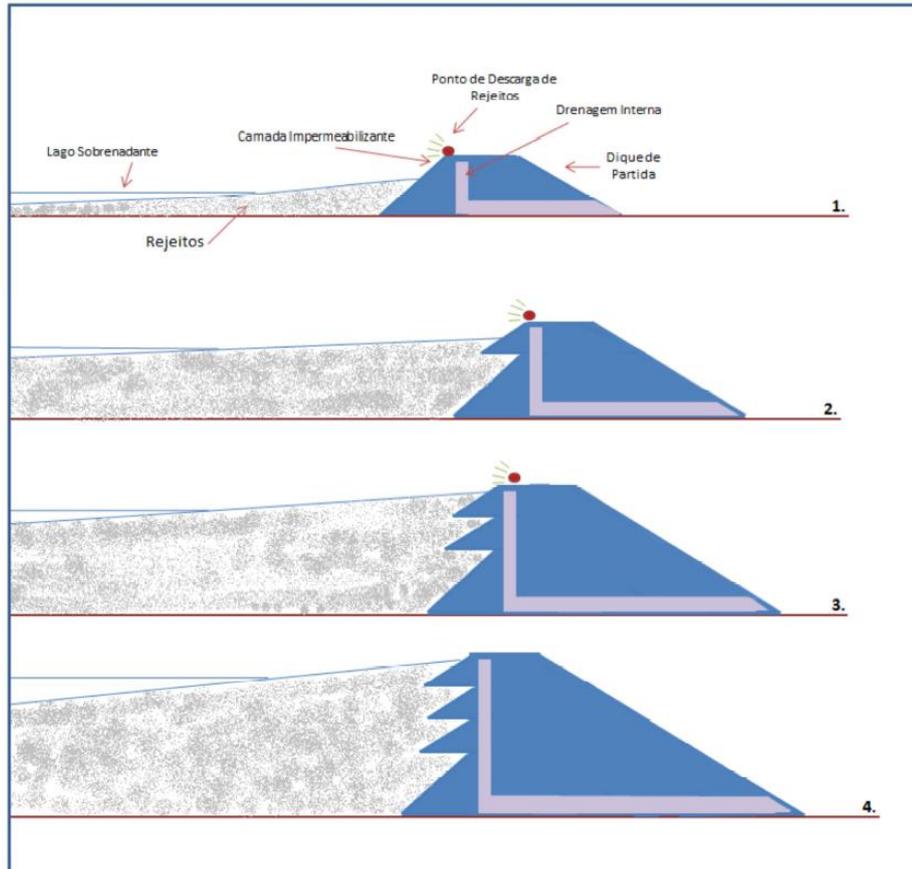
Entretanto, como principal desvantagem na construção de barragens de rejeitos pelo método de jusante destaca-se a necessidade de grandes volumes de material e conseqüentemente o alto custo envolvido na execução destas estruturas. Nesse sentido, a insuficiência de rejeito granular (*underflow*), principalmente nas fases iniciais de operação, pode implicar a necessidade de execução de um dique de partida mais elevado ou utilização de materiais alternativos provenientes de áreas de empréstimo ou do estéril da mina (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

2.3.4 Métodos de linha de centro

É o método intermediário entre o de jusante e o de montante, inclusive em relação a custo. O desempenho da estrutura é semelhante ao método de jusante. A construção de barragens de rejeitos pelo método da linha de centro representa basicamente uma variação do método de jusante em que o alteamento da crista

é realizado de forma vertical. O primeiro alteamento é executado lançando-se o aterro sobre o limite montante da praia e o talude de jusante do maciço do dique de partida, com os alteamentos subsequentes devendo ser coincidentes a este eixo durante toda a vida útil da barragem (ALBUQUERQUE FILHO, 2004). A seqüência de alteamento pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 - Sequência construtiva pelo método de linha de centro



Fonte: Adaptado de Vick (1983) por Fernandes (2017).

2.4 Alguns acidentes com barragens da mineração no Mundo

Segundo Soares (2010) entre os anos de 1970 e 1998, ocorreram 25 acidentes de grandes proporções com barragens de rejeito no mundo. A Tabela 3 apresenta alguns destes acidentes. As principais causas foram resultado de condicionantes geológicos e geotécnicos como *piping*, fundações, sismos, liquefação, entre outros.

Tabela 3 - Algumas rupturas de barragens no mundo entre 1965 e 1996

Ano	Mina/Local	Causas da Ruptura	Danos Provocados
1965	El Cobre - Chile	Terremoto/liquefação	210 vítimas, soterramento do povoado.
1970	Mufaline Mine/África	Não definida	89 vítimas – 453.000 m ³ de rejeitos saturados.
1972	Buffalo Creek/West - Virginia	Não definida	110 mortos, 1.100 feridos, 1.500 casas destruídas – 595.000 m ³ de lama.
1974	Impala Platinum África do Sul	Entubamento (<i>piping</i>)	12 vítimas, 3 milhões m ³ de lama fluíram por 45 km, destruindo estradas, pontes e soterrando reservatório de água potável.
1985	Prealpi/Trento - Itália	Material de construção	Liberção de 200.000 m ³ de rejeitos. 268 vítimas.
1985	Cerro Negro/Chile	Sismo induzido e liquefação	Lama dos rejeitos fluiu até 85 km a jusante.
1985	Pico S.Luiz/Minas Gerais	Solapamento do pé do aterro e entubamento	Lama fluiu até 10 km a jusante. Pontes e estrada de ferro.
1986	Fernandinho/Itaminas - MG	Liquefação	4 vítimas. Destruição de laboratórios e equipamentos.
1996	Mina do Porco/Bolívia	Entubamento (<i>piping</i>)	3 vítimas – Fazendas, gado, flora e fauna; 300 km de rio contaminados.

Fonte: SOARES (2010).

No cenário Internacional, cita-se em 2010, o rompimento do reservatório de lixo tóxico da produção de alumínio na Hungria, no Leste Europeu, que acarretou a morte de quatro pessoas. A China registrou inúmeros acidentes dessa natureza nos últimos anos, com mais de duzentas mortes, sendo que a maioria está associada aos efeitos da liquefação em função do grande número de tremores de terra (FERNANDES, 2017).

Segundo Fernandes (2017), com base no ICOLD (2014), os acidentes com barragens de rejeito não estão limitados a técnicas conservadoras e antigas ou para países com eficiente controle na regulamentação destas estruturas. A maior parte das falhas ocorre em minas em operação, onde 44% dos acidentes no

mundo ocorreram nos Estados Unidos. O Brasil é o oitavo no *ranking* de registro de acidentes com barragem, como observa - se na Tabela 4.

Tabela 4 - Número de rupturas de barragem ocorrido no mundo.

		Rupturas			Outros acidentes	Causas desconhecidas ou sem rejeitos	TOTAL
		Muito Grave	Grave	Demais			
		1	2	3	4	5	
1º	USA	7	12	68	5	1	93
2º	Chile	2	5	32	*	*	39
3º	Canadá	2	1	12	*	3	18
4º	China	6	4	5	1	*	16
5º	Filipinas	6	4	5	*	*	15
6º	Reino Unido	*	*	13	*	*	13
7º	África	3	1	5	1	*	10
8º	Brasil	2	4	2	*	*	8
						Total >	212

Fonte: ICOLD (2014) adaptado por Fernandes (2017)

2.5 Agências de fiscalização das barragens no Brasil

A partir da Lei nº 12.334/2010, as agências e órgãos fiscalizadores sofreram algumas alterações, em função dos efluentes/ rejeitos armazenados. A seguir será descrito a responsabilidade de cada órgão.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a partir da Lei nº 12.334/2010, incorporou a competência de órgão fiscalizador da segurança de barragens de acumulação de água por ela licenciada. É responsável por implementar a Política Nacional de Recurso Hídrico, e responde pela implementação e gestão do Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB). Coordena a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens, responsável por encaminhá-lo anualmente ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos, promovendo a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens (ANM, 2018b).

A Agência Nacional de Mineração (ANM) é a agência responsável pelo licenciamento dos direitos minerários para disposição de rejeitos temporários ou final. O controle e fiscalização da atividade de mineração é competência da ANM,

que tem a responsabilidade de gerenciar as pesquisas minerais, geológicas e tecnologia mineral, desenvolver o planejamento e aproveitamento dos recursos minerais. Autoriza os títulos minerários relativo à extração e aproveitamento dos recursos minerais. Com a Lei nº 12.334/2010, teve incorporadas as competências de órgão fiscalizador da segurança das barragens de acumulação de rejeitos de mineração e suas inerentes obrigações (ANM, 2018b).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) está sobre a responsabilidade desta agência fiscalização das barragens com fins de geração hidrelétrica, sendo esta responsável pelo licenciamento. Tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, tendo, dentre outras, as atribuições de implementar as políticas e diretrizes do governo federal para a exploração da energia elétrica e o aproveitamento dos potenciais hidráulicos. Busca promover, mediante delegação, os procedimentos licitatórios para a contratação de concessionárias e permissionárias de serviço público para produção, transmissão e distribuição de energia elétrica e para a outorga de concessão para aproveitamento de potenciais hidráulicos. A partir a Lei nº 12.334/2010, teve incorporadas as competências de órgão fiscalizador da segurança das barragens cujo uso preponderante seja a geração hidrelétrica e suas inerentes obrigações (ANM, 2018b).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) é responsável pela fiscalização das barragens de resíduos industriais sendo a entidade que outorga ambiental de instalação e operação para este fim. Exerce o poder de polícia ambiental, executar ações das políticas nacionais de meio ambiente, referentes às atribuições federais, relativas ao licenciamento ambiental, ao controle da qualidade ambiental, à autorização de uso dos recursos naturais e a fiscalização, monitoramento e controle ambiental, observadas as diretrizes emanadas do Ministério do Meio Ambiente. Procura executar as ações supletivas de competência da União, de conformidade com a legislação ambiental vigente. Os órgãos ambientais estaduais de alguns estados assumiram esta atribuição por subdelegação. Com a Lei nº 12.334/2010, teve incorporadas as competências de órgão fiscalizador da segurança das barragens de acumulação de resíduos industriais, licenciadas pelo próprio IBAMA, e suas inerentes obrigações (ANM, 2018b).

2.5.1 Conselho Nacional dos Recursos Hídricos

Com base na resolução de nº143, de 10 de julho de 2012, a partir das competências que foram atribuídas pelo sistema legislativo ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a classificação das barragens por dano potencial associado e categoria de risco, pelo tamanho do reservatório será apresentada a seguir, antes será necessário a definição de alguns conceitos de acordo com a resolução citada. No artigo 2 para efeito desta resolução consideram-se (CNRH, 2012).

- Barragem: estrutura em um curso permanente, ou temporário, de água para fins de contenção, acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos (incluindo rejeitos), compreendendo o barramento e as estruturas associadas.
- Reservatório: acumulação não natural de água, de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos.
- Empreendedor: agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade, sendo também o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la.
- Órgão fiscalizador: autoridade do poder público responsável pelas ações de fiscalização da segurança da barragem de sua competência, observada as disposições do art. 5º da Lei no 12.334, de 2010.
- Dano potencial associado: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais; e
- Área afetada: área a jusante ou a montante, potencialmente comprometida por eventual ruptura da barragem, cuja metodologia de definição de seus limites deverá ser determinada pelo órgão fiscalizador.

2.5.1.1 Classificação por categoria de risco

No Artigo 4, as barragens são classificadas de acordo com seus aspectos construtivos, que possam influenciar na ocorrência de acidentes, considerando os seguintes critérios.

I - Características Técnicas:

- a) altura do barramento;
- b) comprimento do coroamento da barragem;
- c) tipo de barragem quanto ao material de construção;
- d) tipo de fundação da barragem;
- e) idade da barragem;
- f) tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro;

II - Estado de conservação da barragem:

- a) confiabilidade das estruturas extravasoras;
- b) confiabilidade das estruturas de captação;
- c) eclusa;
- d) percolação;
- e) deformações e recalques;
- f) deterioração dos taludes.

III - Plano de segurança da Barragem:

- a) existência de documentação de projeto;
- b) estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem;
- c) procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento;
- d) regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; e
- e) relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.

O cálculo para determinação da categoria de risco é feito da seguinte maneira:

Soma da pontuação obtida nos Critérios Técnicos (CT), mais Soma da pontuação obtida no Estado de Conservação (EC) (a pontuação 10 em qualquer item do EC implica na classificação de alto Risco) mais Soma da pontuação obtida no plano de segurança de barragem (PS). Este somatório irá compor a classificação por categoria de Risco, como mostra a Tabela 5: faixa de classificação por categoria de risco. Na Tabela 6 engloba-se a pontuação das características Técnicas (CT). A Tabela 7 apresenta a pontuação para o estado de conservação, e por fim, a Tabela 8, tem-se a pontuação para o Plano de Segurança de Barragens (PS).

Tabela 5 - Definição da categoria de Risco

Categoria Risco	Pontuação
CRI ALTA	Somatório pontos (CT+EC+PS) \geq 60 ou EC=10
CRI MÉDIA	Somatório pontos (CT+EC+PS) entre 35 a 60
CRI BAIXA	Somatório \leq 35

Fonte: CNRH (2012).

Tabela 6 - Pontuação para as Características Técnicas (CT)

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)
Altura ≤ 15m (0)	Comprimento ≤ 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)
30m ≤ Altura ≤ 60m (4)	200 ≤ Comprimento ≤ 600m (2)	TR = 500 anos (5)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)

$$CT = \sum (a \text{ até } c)$$

Fonte: CNRH (2012).

Tabela 7 - Pontuação para o Estado de Conservação (EC)

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (g)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferrugem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)

$$EC = \sum (d \text{ até } g)$$

Fonte: CNRH (2012).

Tabela 8 - Pontuação para o Plano de Segurança da Barragem (PS)

Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)

$PS = \sum (h \text{ até } l)$	
--------------------------------	--

Fonte: CNRH (2012).

2.5.1.2 Classificação por dano potencial associado

Os critérios usados para classificação por dano potencial associado são:

- I - Existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- II - Existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- III - existência de infraestrutura ou serviços;
- IV - Existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- V - Existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- VI - Natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e
- VII - volume.

Para cálculo da pontuação e definição do Dano Potencial Associado (DPA), será realizada soma da pontuação em cada item da classificação. Na Tabela 9 apresenta-se a classificações geral do DPA. Na Tabela 10, por sua vez, tem-se as pontuações para cada item do DPA.

Tabela 9 - Classificação Geral DPA

Categoria Dano Potencial	Pontuação
DPA ALTO	Somatório pontos \geq 13 ou EC=10
DPA MÉDIO	Somatório pontos entre 7 a 13
DPA BAIXO	Somatório pontos \leq 7

Fonte: CNRH (2012).

Tabela 10 - Pontuação para cada item do DPA

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Muito Pequeno <= 500 mil m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande >= 50 milhões m ³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I - Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-

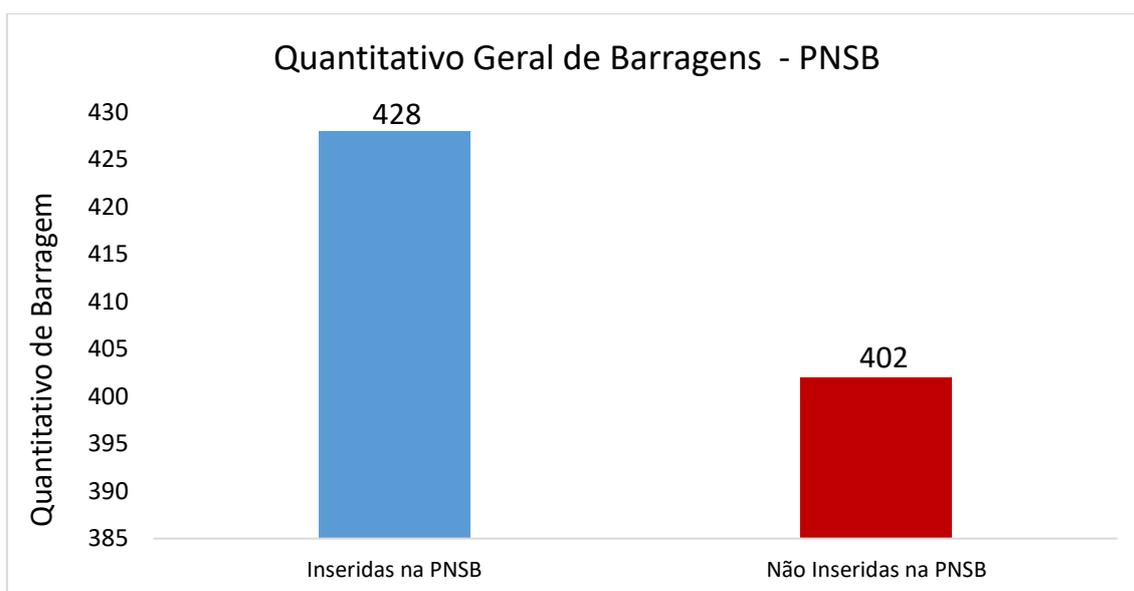
$$DPA = \sum (a \text{ até } d)$$

Fonte: CNRH (2012)

2.5.1.3 Agência Nacional de Mineração

Segundo informações extraídas da ANM, em 2020, o Brasil atualmente tem 830 barragens de rejeito de mineração cadastradas. Destas, 428 estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens. Este número corresponde a 51,5% das barragens existentes no Brasil, como observado na Figura 9.

Figura 9 - Quantitativo com o número de barragens Inseridas na PNSB



Fonte: ANM (2020).

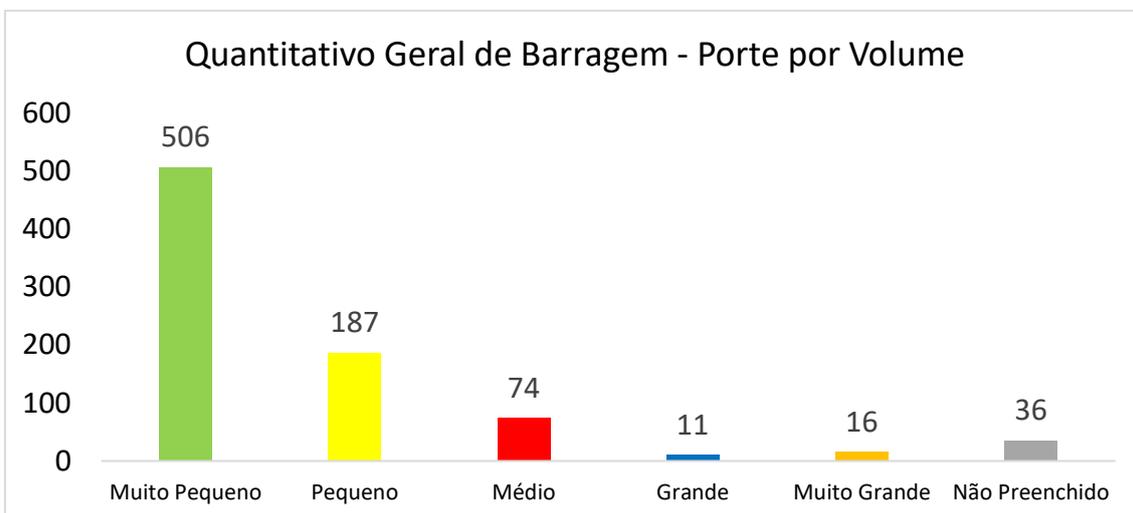
Segundo a ANM (2019), as barragens são classificadas de seguinte forma em função do volume da estrutura:

- Muito Pequeno ≤ 500 mil m^3
- Pequeno 500 mil a 5 milhões m^3
- Médio 5 milhões a 25 milhões m^3
- Grande 25 milhões a 50 milhões m^3
- Muito Grande ≥ 50 milhões m^3

Na Figura 10 tem-se os quantitativos das barragens classificadas pelo volume da estrutura. A classificação das barragens brasileiras, por altura e método construtivo, estão nas Figuras 11 e 12. A Agência Nacional de Mineração, reporta que 62% das barragens brasileiras tem altura abaixo de 15m e 2,29% não tem sua altura informada. Com relação ao método de construção, 51,4%

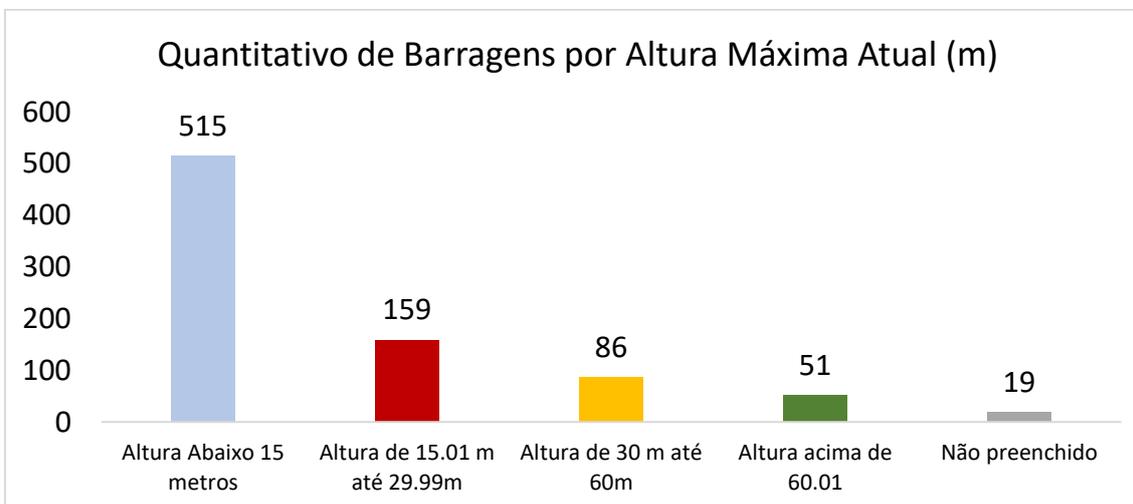
foram construídas em etapa única e 12,05% não reportaram o método construtivo. Esta falta de informação dificulta a interpretação dos dados e a compreensão dos fatos.

Figura 10 - Classificação das barragens por volume da estrutura.



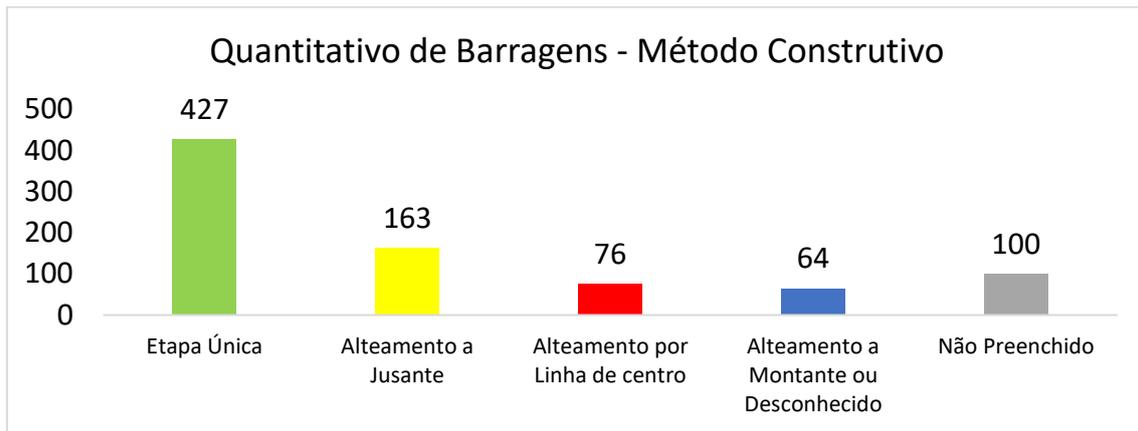
Fonte: ANM (2020).

Figura 11 - Quantitativo de barragem em relação à altura



Fonte: ANM (2020).

Figura 12 - Quantidade de barragens por método construtivo



Fonte: ANM (2020).

2.6 Legislação Brasileira: LEI 12.334 (BRASIL, 2010)

A Lei de número 12.334 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens de forma a buscar garantir a segurança de barragem que são apropriadas para acumular águas.

Os critérios para que uma barragem se enquadre na política são:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros).
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos)
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

No artigo 6 da lei são descritos 7 instrumentos para da política de segurança da barragem. Que são apresentados a seguir.

- I - Sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II - Plano de Segurança de Barragem;
- III - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- IV - Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);

V - Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;

VI - Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;

VII - Relatório de Segurança de Barragens.

A lei detalha três dos setes instrumentos, considerados mais importantes para a redução do número de acidentes e incidentes com barragens de rejeito, são eles:

- Sistema de classificação de barragens por Categoria de Risco e por Dano Potencial Associado; este está associado a possibilidade de ruptura da barragem, o critério classifica como alto, médio ou baixo risco, segundo parâmetros de características técnicas do estado de conservação, dado ao governo e ao empreendedor informações a sobre suas barragens e a probabilidade de ruptura.
- O Plano de segurança da barragem, deve ter no mínimo os seguintes requisitos, identificação do empreendedor, estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais envolvidos, regras operacionais dos dispositivos de descarga, entre outros pontos que são detalhados o artigo 8.

O artigo 13 detalha o Sistema Nacional de Segurança de Barragem (SNISB), que prevê acesso aos dados da barragem para toda a sociedade, assim como descentralização da obtenção e produção de dados e informações. Ficou sobre responsabilidade do Conselho Nacional de Recursos Hídricos a implementação da política de segurança de barragem. A Agência Nacional das Águas ficou responsável pela articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragem, sendo responsável por fazer a convergência de todas as informações.

A Política Nacional de Segurança de Barragem tem por objetivo que seja reduzir a quantidade de acidentes. Para isso, estabeleceu padrões de segurança que devem ser empregados em todas as fases da barragem, os quais se iniciam nos projetos e terminam no plano de desativação das estruturas. Deste modo, pretende criar condições para fiscalização e controle por parte do poder público, para que este possa orientar e propor medidas corretivas de segurança quando necessário.

A norma NBR 13028/2017, requer que os estudos de estabilidade local sejam realizados para cada etapa construtiva, seguido de análise global. Recomenda o cálculo de valores mínimos para o fator de segurança usando análise determinísticas de estabilidade considerando, as tensões efetivas, condições de carregamento drenado e não drenado, tensões totais para cada material envolvido. Deve-se destacar que no caso da avaliação a partir de condições drenadas devem ser usando parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento e poropressões estimadas por meio de redes de percolação. Na Tabela 11 tem-se os valores mínimos dos fatores de segurança para cada situação ou fase da barragem (NBR13028, 2017).

Tabela 11 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança
Final de construção *	Maciço e fundações	Montante 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 de operação, 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

Fonte: NBR13028 (2017).

2.7 Principais mecanismos de ruptura em barragens de mineração

Seja frente às condições normais de operação ou eventos extremos, é necessário analisar o comportamento das barragens de rejeito, de modo a compreender e gerenciar as formas recorrentes de colapso que essas estruturas estão sujeitas. Isto é necessário para operar a barragem e restaurar as condições de operação segura delas. A seguir apresentam-se os principais mecanismos que podem levar o barramento a ruptura.

2.7.1 Instabilidade de Talude

O que determina o início de uma ruptura são alguns eventos de naturezas diversas, mas, em barragens de rejeitos, existem duas situações mais comuns que provocam a instabilização de um talude: elevação da poropressão durante a disposição dos rejeitos e aproximação e elevação da superfície freática do talude de jusante. O colapso acontece quando a tensão cisalhante atuante na superfície supera a resistência ao cisalhamento do material (OLDESCOP; 2006).

2.7.2 Fundação

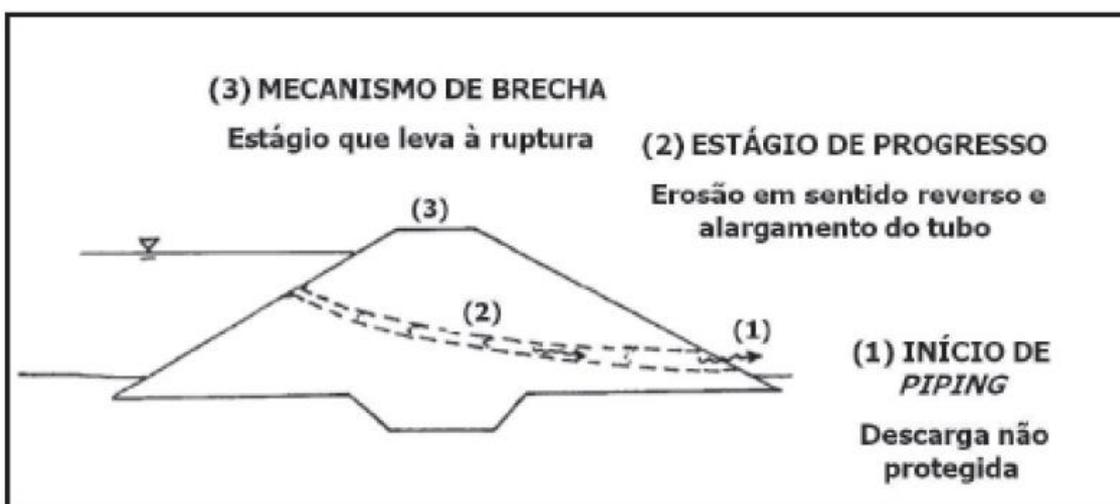
O problema envolvendo a construção de barragens sobre solos com características geotécnicas desfavoráveis é bastante comum, pois os locais de construção, geralmente fundo de vales e baixadas, são aqueles onde se encontram formações geológicas constituídas de solos moles, compressíveis e permeáveis (VALERIUS, 2014). Para um bom projeto de fundação é necessário conhecer o perfil do subsolo, e suas camadas. A fundação deve ser executada na camada mais resistente do subsolo para transmissão das cargas, para que não ocorra recalque da estrutura. Para o controle construtivo alguns cuidados devem ser tomados como, execução de taludes mais abatidos e/ou bermas de equilíbrio, remoção parcial ou total da camada de baixa resistência, utilização de métodos de melhoria do solo de fundação, como a construção de drenos.

Segundo o ICOLD (2001), na maioria dos acidentes em barragens de rejeitos envolve problemas de fundação. Barragens construídas sobre camadas superficiais de argila e aluviões ou rochas de pouca resistência que, combinada com as altas tensões impostas pelo depósito e seus alteamentos e o fluxo de água pela fundação, provocaram acréscimos na poropressão que diminuíram a resistência ao cisalhamento e levaram a camada à ruptura.

2.7.3 Erosão Interna Progressiva (*Pipping*)

Para Lima (2016), o *piping* (ou entubamento) é o processo de erosão interna que avança de jusante para montante na forma de um tubo, iniciado sob condições de gradiente hidráulico elevado, capaz de carrear materiais do aterro formando canais no sentido contrário ao do fluxo de água, como apresentado pela Figura 13.

Figura 13 - Estágio de desenvolvimento de ruptura por *piping*



Fonte: LIMA (2016).

2.7.4 Galgamento

O galgamento ocorre quando o vertedouro não consegue extravasar toda a água armazenada no reservatório. Quando isso acontece, a água começa a passar por cima da estrutura, em locais não projetados para verter água, desencadeando a ruptura do maciço da barragem. Esse problema é particularmente perigoso para barragens compostas de material inconsolidado, como as barragens de terra. Normalmente o galgamento pode ser causado por fortes chuvas, provocando uma cheia extraordinária que o vertedouro não seja capaz de extravasar toda a água (SOARES,2010).

2.7.5 Liquefação

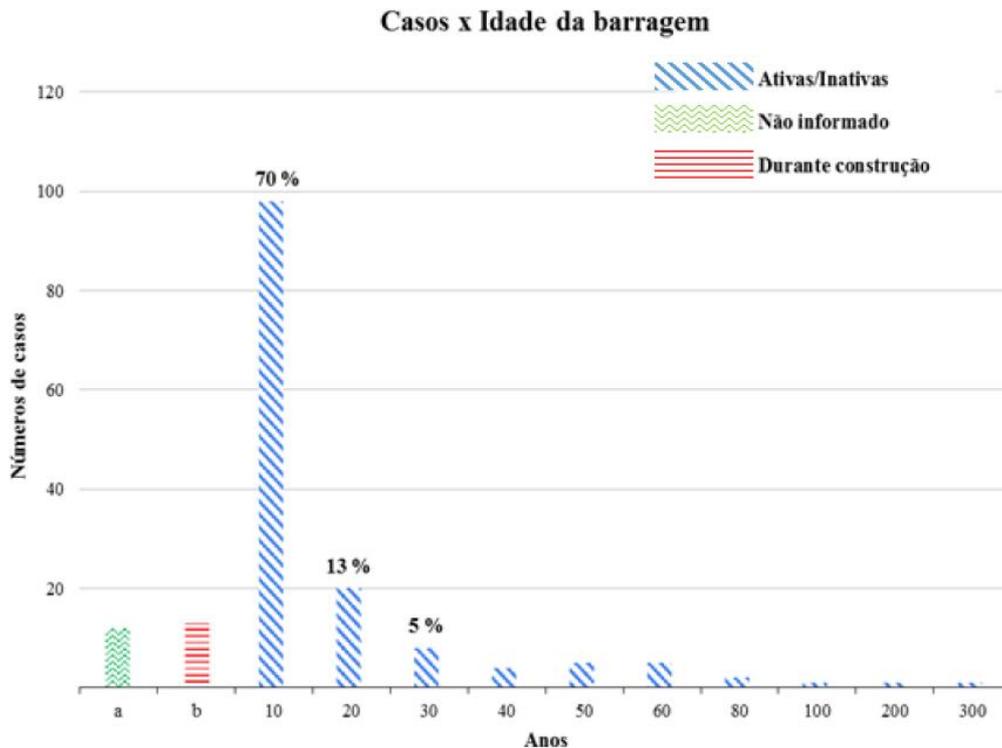
O fenômeno da liquefação do solo é reconhecido há muitos anos. Terzaghi e Peck (1967) se referiram à “liquefação espontânea” para descrever a súbita perda de resistência de solos muito fofos, como areia, que causaram deslizamentos devido a um leve distúrbio.

A liquefação estática foi observada em argilas sensíveis na Noruega e no leste do Canadá, bem como em barragens de rejeitos. Para o rompimento de uma estrutura do solo, como um talude ou uma barragem, um volume suficiente de material deve sofrer perda de resistência. O rompimento resultante pode ser um deslizamento ou fluxo, dependendo das características dos solos e da geometria do terreno. As deformações resultantes do rompimento são devidas a tensões internas induzidas pela gravidade e podem ocorrer após a ocorrência do mecanismo de gatilho (ROBERTSON *et. all.*, 2019).

2.7.6 Idade da barragem

Segundo dados do ICOLD (2001), cerca de 70 % das rupturas podem ocorrer nos primeiros dez anos de operação de uma barragem. Acredita-se que a grande quantidade de rupturas nos primeiros 10 anos de vida útil de uma barragem seja causada por deficiência no projeto ou na execução, já que a estrutura quando corretamente projetada e edificada tende a apresentar alta durabilidade. A Figura 14 apresenta o número de casos de rupturas *versus* a idade da barragem.

Figura 14 - Número de casos de rupturas *versus* a idade da barragem



Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).

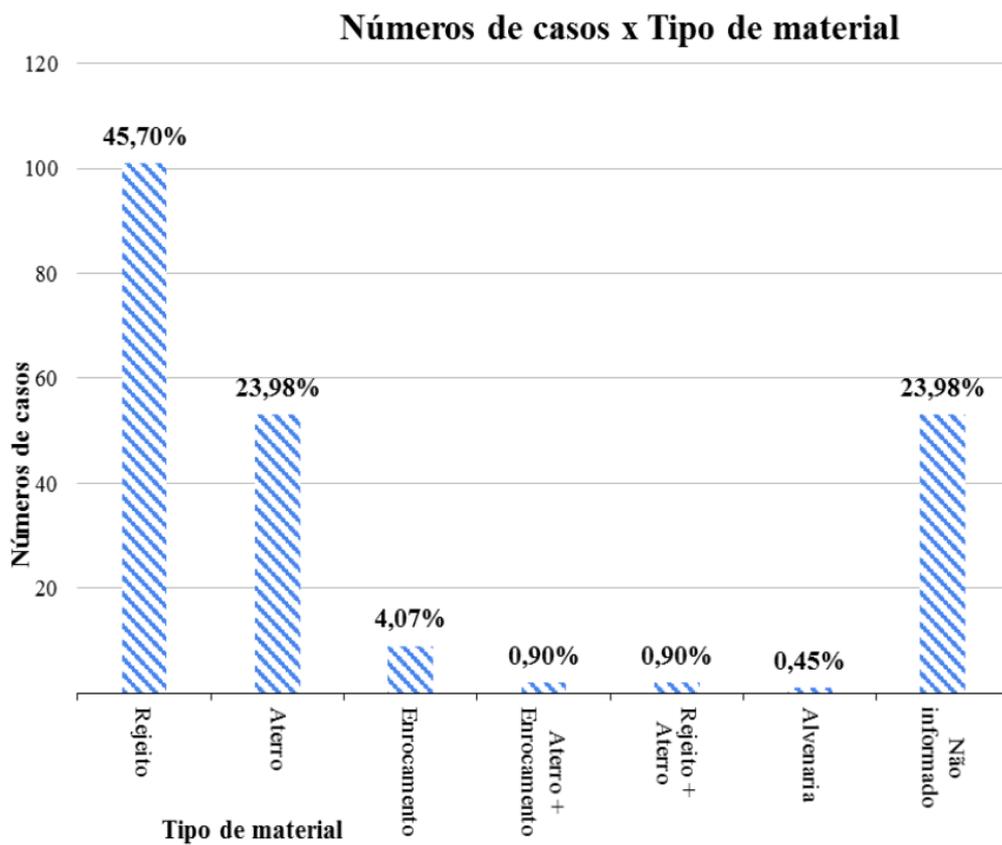
2.7.7 Tipo de material de construção

De acordo com Davies *et al.* (2000) *apud* Duarte (2008), o grande volume de rejeitos gerados, condicionados aos custos da disposição, faz com que a utilização destes materiais seja atrativa, como material de construção das próprias barragens de contenção, desde que sejam obedecidas algumas premissas, tais como: separação da fração grossa e fina (as propriedades geotécnicas são diferentes entre as frações), controle dos processos de separação (granulometria), utilização de sistemas de drenagens eficientes, compactação dos rejeitos (aumento da densidade e da resistência), proteção superficial da barragem, dentre outras.

Para o ICOLD (2001), os materiais mais comuns para a construção das barragens de contenção de rejeito provêm, na maioria dos casos, da própria mina, sendo comuns para a construção dessas estruturas o uso de rejeito

compactado ou solo próximo da mina, com a finalidade de aterro ou ainda utilização de rochas. Na Figura 15, é possível entender como ainda falta informação sobre as barragens construídas no mundo. Destas, 24% das estruturas não têm informação do material utilizado, 46% dos acidentes ocorreram em estruturas que usaram o rejeito para construção do dique.

Figura 15 - Quantidade de acidentes por tipo de material empregado



Fonte: Adaptado de ICOLD (2001) por PEREIRA (2016).

3 HISTÓRICO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL

3.1 Considerações iniciais

O levantamento do histórico de rompimento de barragens no Brasil foi feito de modo a se obter as informações disponíveis sobre as barragens existentes no Brasil que apresentaram problemas, uma vez que pouco se sabe sobre a forma que as barragens foram construídas e quais os principais motivos que a levaram ao rompimento. Para realização desse trabalho foram pesquisados relatórios acadêmicos, artigos, reportagens da época, projetos, estudos de estabilidade apresentados a ANM, dados disponíveis no banco de dados dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento e classificação das barragens e relatório de especialistas que investigaram os rompimentos ocorridos na última década. O intuito é apresentar uma síntese dos principais motivos que levaram a esse fato.

Assim, a metodologia empregada foi a seguinte:

- Pesquisa sobre as barragens de mineração no Brasil que apresentaram rupturas;
- Compilação dos dados;
- Análise e apresentação dos dados;
- Síntese do resultado obtido com ênfase nos aspectos geotécnicos.

3.2 Eventos de rupturas de barragens de mineração no Brasil

No Brasil ocorreram nas últimas décadas rompimentos de barragens de grandes proporções e consequências ambientais, humanas, sociais e econômicas. Considerando os rompimentos de barragens deste tipo iniciados na década de 80 até a os dias de hoje registraram-se nove acidentes.

No Brasil, aspectos técnicos como infiltração, liquefação e estabilidade de fundação passaram a ser compreendidos e controlados pelos projetistas na década de 70, podendo-se citar, como exemplo dessa prática, a barragem Germano, da Samarco Mineração S.A., em Mariana – MG.

A partir da década de 80, as questões ambientais ganharam importância. Passaram a ser considerados o potencial de dano ambiental e os mecanismos de transportes de contaminantes (MELLO; PIASENTIN, 2011)

A LEI 12.334/2010 cria a Política Nacional de Segurança de Barragem com objetivo de reduzir a quantidade de acidentes, criando padrões de segurança que deveriam ser usados em todas as fases da barragem, iniciando nos projetos e finalizado no plano de desativação das estruturas. Deste modo pretende-se criar as condições para fiscalização e controle por parte do poder público, para que este possa orientar e propor medidas corretivas de segurança, quando necessário.

3.3 As barragens de mineração que romperam

3.3.1 Barragem de Fernandinho

A barragem de rejeito de Fernandinho, localizada no município de Itabirito, Minas Gerais, de propriedade da Itaminas Comercio de Minério S/A, rompeu em 1986. A capacidade do reservatório era de 350.000 m³ de rejeito de minério de ferro, dos quais se tem registros que 100.000 m³ vazou com o rompimento da barragem, causando a morte de 7 pessoas.

O rejeito era sempre lançado em pontos afastados do maciço da barragem, fazendo com que a sua fração fina também se decantasse nas adjacências da crista. Os consecutivos alteamentos foram feitos pelo método de montante com espessuras que variavam entre 1 e 2 m, sem nenhum controle de compactação. Diante disso, o maciço apresentava uma estrutura pouco compacta, com densidade relativamente baixa. Como o material mais fino, pelo próprio processo de lançamento, situava-se próximo à estrutura de contenção, este poderia comprometer a drenagem do sistema durante um carregamento rápido, gerando condições não-drenadas. Isso se justifica pelo fato de que as partículas de ferro tendem a compor a fração mais fina do rejeito (PEREIRA, 2005).

O material nessa condição, quando submetido a um esforço cisalhante ou qualquer outra perturbação que pudesse afetar o equilíbrio da estrutura das

partículas depositadas, ter-se-ia uma condição crítica em termos de contração do material. Esta condição, associada às características granulométricas e ao estado de saturação do material, tornaram o maciço da Mina de Fernandinho susceptível à liquefação espontânea (PARRA; LASMAR, 1987, *apud* Pereira, 2005).

Segundo Parra e Lasmar (1987, *apud* Pereira, 2005) a ruptura ocorreu em duas etapas (Figura 16). Na primeira houve uma movimentação lenta próxima à ombreira direita da barragem, envolvendo o lago do reservatório e levando máquinas e operadores que trabalhavam no local. Em seguida, ocorreu o colapso total do maciço, seguido da formação de uma onda de lama fluida em alta velocidade, que desceu vale abaixo, arrasando completamente a vegetação local.

Figura 16 - Etapas da ruptura da Barragem de Fernandinho.



Fonte: Parra e Lasmar (1987) *apud* Pereira (2005).

A barragem de 40 m de altura, ainda em operação, vinha sendo alteada, estando o nível do seu topo cerca de 2 m acima do rejeito, confinado no reservatório. A inclinação e a altura do talude de jusante não eram compatíveis com a resistência ao cisalhamento do material e com as pressões piezométricas presentes no maciço (Parra e Lasmar (1987) *apud* PEREIRA, 2005).

A barragem de Fernandinho foi o primeiro caso de liquefação ocorrido no Brasil. Problemas com drenagem e disposição incorreta do rejeito ajudaram a criar condições para a ocorrência deste fenômeno.

3.3.2 Barragem das Pedras

A barragem localizada em Rio Acima, no estado de Minas Gerais, recebia rejeitos da Mina do Pico São Luis. Na época a barragem tinha 20 m de altura, sendo a altura de projeto igual a 30 m. Ela foi construída pelo método de montante, e rompeu em 2 de outubro de 1986.

Em 1985, a barragem apresentou problemas na ombreira esquerda próximo ao vertedouro que se rompeu. A recuperação foi realizada com reforço da ombreira e pé do talude a jusante por meio de blocos para aumentar a estabilidade, no entanto, se observou que o eixo da barragem se curvou. No ano de 1986 foi observada grande área de saturação e falta de drenagem no pé do talude e indícios de arraste de partículas. Foram observadas também algumas trincas no talude. Com objetivo de fazer um projeto para melhorar as condições da barragem foram realizados 3 sondagem SPT e instalados piezômetros (DINIZ *et al.*, 2006).

Após os resultados das investigações, um projeto foi iniciado para estabilização da barragem e do vertedouro existente e projeção de alteamentos futuros foram consideradas. No entanto, antes de finalizar a obra, a estrutura foi alteada 3 metros. O vertedouro foi elevado em 0,8 m no dia 01/10/1986, e a operação do vertedouro foi liberada. Na madrugada de 02/10/1986 a estrutura rompeu na área do vertedouro (DINIZ *et al.*, 2006).

Segundo Diniz (2006), as causas de rompimento da barragem podem ter sido: erosão superficial próxima ao vertedouro, ocorrência de *pipping*, anomalias que foram observadas um ano antes do acidente. Porém, na época se considerou também a liquefação devido à falta de drenagem do maciço. O acidente deixou muitas pessoas desalojadas e causou 82 km de destruição ao longo do Rio das Velhas.

3.3.3 Barragem de Macacos

A Barragem de Macacos está localizada em São Sebastião das Águas Claras, em MG. Pertencia a Mineração Rio Verde na época do acidente. A cava exaurida tinha as seguintes dimensões: 500 m de comprimento, 120 m de largura e 100 m de profundidade. Era usada para disposição de rejeito que depois de totalmente preenchida foi alteada (DINIZ *et al.*, 2006).

Após a disposição do rejeito ter chegado ao limite da cava, teve início a segunda fase do projeto, com a instalação de dique de contenção ao longo da crista norte e leste da barragem, construído pelo método de montante com altura de 10 m por 15 m de largura. Observou alteamento com largura inferior à de projeto. Os rejeitos de granulometria fina foram lançados no extremo sul da estrutura e sedimentaram ao longo desta. Neste processo a parte fina de rejeito saturado foi direcionada para a região norte de barragem, o que contribuiu para elevação da freática no talude norte. A ruptura ocorreu na borda nordeste deste sistema de contenção, cujo alteamento se encontrava a 20 m acima da cota da crista da cava exaurida. A ruptura apresentou dimensões de mais ou menos 330m de largura ao longo da barragem de rejeito, que liberou imediatamente 530.000 m³ de rejeitos acumulados. Na época o reservatório tinha capacidade de 690.000 m³. Neste momento, o perímetro da estrutura de contenção era de aproximadamente 1130m, com uma seção transversal de 45.300 m² e com taludes com inclinações médias de aproximadamente 1V:1.8H. Vale a pena ressaltar, que a inclinação de talude era muito acentuada para este tipo de estrutura e na época não havia instrumentos de monitoramento (DINIZ *et al.*, 2006).

O rompimento da barragem denominada C1, ocorreu em junho de 2001, causou a morte de 5 pessoas e a devastação de 79 hectares de mata atlântica. Aproximadamente 600 mil metros cúbicos de rejeito atingiu o córrego Taquaras e uma área de proteção ambiental de 30 hectares.

Segundo Diniz *et al.* (2006), pode se considera os alteamentos como uma das principais causas de ruptura da estrutura, seguido da geometria inadequada dos alteamentos; a inexistência de sistema de drenagem e filtração interna, o método

de lançamento dos rejeitos no reservatório. A associação destes fatores levou à situação de talude crítica, com elevação excessiva da superfície freática e consequente ruptura.

3.3.4 Barragem de Contenção de Rejeitos Cataguases

O acidente com a barragem de rejeito industrial da Florestal Cataguases aconteceu na Fazenda Bom Destino, situada cerca de 13 km da área urbana. Ele gerou mortandade de peixes, a interrupção do abastecimento de água em vários municípios dos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro, por cerca de dez dias, e causou prejuízos em pequenas propriedades rurais situadas às margens do Ribeirão do Cágado, em uma extensão de aproximadamente 106 hectares. Essas informações estão de acordo com o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como apresentado por Almeida (2015).

Na época do acidente, em 2003, rejeitos industriais espalharam 900 mil metros cúbicos de um licor negro - material orgânico constituído basicamente de lignina e sódio - na Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul. A causa do rompimento em Cataguases foi a falta de manutenção do barramento. Na Figura 17 é possível identificar atividade de paralização do barramento e descomissionamento da barragem (Almeida, 2015). Durante a pesquisa várias fontes foram consultadas a fim de se procurar mais informações sobre as características técnicas da estrutura, porém sem sucesso, sendo possível apenas obter informações em reportagens sobre o acidente.

Figura 17 - Desativação da Barragem de Contenção de Rejeitos Cataguases



Fonte: Almeida (2015).

3.3.5 Barragem de São Francisco

A barragem de São Francisco iniciou sua operação em 1995, propriedade da Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda. (MRPC), localizada em Mirais, MG. A barragem recebia efluentes do processo de beneficiamento de Bauxita. O rejeito classificado como inerte, dique construído em três faces com alteamento a jusante atingindo a altura de 35 m, comprimento de 90 m, capacidade do reservatório de aproximadamente 3,8 milhões de m³ e largura de crista de 9 m. A barragem enquadra na classe III, devido ao alto potencial de dano ambiental, em razão de seu grande porte em termos de altura e capacidade de armazenamento e área a jusante com ocupação humana e econômica (ROCHA, 2015).

O sistema de drenagem interno da barragem era composto por filtro de areia, dreno vertical, combinado com dreno horizontal. O dique foi construído em aterro de solo argilo-arenoso. O primeiro rompimento aconteceu em março de 2006. O vertedouro em torre inclinada de concreto conectada a uma galeria horizontal, após alteamento, apresentou abertura de uma brecha entre a placa de concreto já submersa e o maciço que foi alteado. Calcula-se, nesse acidente, um vazamento de 135.000 m³ de rejeito, que levou a implantação de algumas medidas corretivas decretadas no termo de ajustamento de conduta, entre o Ministério Público Estadual e a MRPC.

O segundo rompimento ocorreu em janeiro de 2007, o nível do reservatório aumentou rapidamente devido ao grande volume de chuva, atingindo a soleira do vertedouro. A água começou a extravasar por essa estrutura, no mesmo instante em que começou a verter no contato da ombreira direita com o maciço, local do antigo vertedouro. O galgamento iniciou o processo de erosão próximo ombreira direita, culminando na ruptura da barragem.

O vazamento provocou alagamento nas cidades banhadas pelo Rio Muriaé, no estado de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A lama aumentou a turbidez das águas do rio, o que provocou a morte de peixes e interrompeu o abastecimento de água nas cidades de Mirai, Laje e Muriaé. Nesse acidente não houve perda de vidas humanas. Na Figura 18 tem-se a vista da crista e do talude dessa barragem.

Figura 18 - Vista da crista e do talude de jusante da barragem de São Francisco.



Fonte: ROCHA (2015).

3.3.6 Barragem Herculano Mineração

A mineradora Herculano, localizada em Itabirito, MG, armazenava rejeitos do beneficiamento do Minério de Ferro na barragem da Mina do Retiro do Sapecado. A auditoria feita em setembro de 2013 na barragem, informava a existência de algumas rachaduras na estrutura, propondo intervenções para sua correção, no entanto, o laudo não assinalou quantas rachaduras eram nem a dimensão delas. Foi atestado pelo auditor, em seu laudo de estabilidade, que estas rachaduras não comprometeriam a estrutura (LIMA, 2016).

No local operavam quatro barragens denominadas B1, B2, B3 e B4, como se observa na Figura 19. As estruturas B1 e B4 eram utilizadas unicamente para armazenamento de rejeitos, sendo que a barragem B1 foi construída antes de 1996, com alteamento a montante e espigotamento, a partir da crista. As outras duas (B2 e B3) eram destinadas para o acúmulo de água e eventual contenção de finos provenientes da B1. Em 2010, a primeira estrutura B1 chegou ao seu limite. A empresa então construiu a barragem B4. Entretanto, em abril de 2014, a nova estrutura começou a apresentar uma série de problemas técnicos, fazendo com que a empresa chegasse a um impasse, pois tinha intensão de continuar a produzir, mas sem ter onde alocar os rejeitos (EMERICH, 2015).

Figura 19 - Local de ruptura da B1(linha em vermelho) Barragem Herculano.



Fonte: Google Earth (2015).

A empresa, então, voltou a utilizar a barragem B1 sem ter as licenças ambientais ou projetos necessários. Assim, foram criadas quatro valetas com dimensões estimadas de aproximadamente 150 x 10 m cada baia, sobre os rejeitos que sedimentaram no topo da barragem B1, aumentando a área de armazenamento. No momento da ruptura da B1, uma quinta valeta estava sendo construída (EMERICH, 2015).

O rompimento dessa barragem ocorreu de cima para baixo, a barragem B2 logo abaixo também foi totalmente danificada e a B3 parcialmente danificada. Segundo o cadastro nacional de barragem, em 2015, a B1 tinha altura de 64 m, capacidade do reservatório de 4.500.000 m³. Não foi informado o material usado para construção do dique. A B2 tinha 13,5 m, a B3 e B4 com altura de 11 e 30 m, respectivamente. Segundo análise da perícia encomendada pelo Ministério Público de Minas Gerais, a causa do rompimento foi a falta de drenagem na estrutura, o que causou elevação do nível freático no interior da barragem, instabilizando o talude.

O rompimento da barragem B1 causou a morte de dois operários e desaparecimento de um outro. Deixou 300 residências sem fornecimento de água e de energia elétrica, atingiu um riacho e causou graves impactos ambientais em córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, que abastece a região metropolitana de Belo Horizonte.

3.3.7 Barragem do Fundão

O Complexo Industrial de Germano, pertencente à Samarco Mineração S/A, de propriedade da Vale S/A e da Anglo - Australiana BHP Billiton Brasil Ltda., localiza-se no município de Mariana, no Estado de Minas Gerais. O complexo contava com três barragens de rejeitos, denominadas Santarém, Fundão e Germano, conforme pode-se observar na Figura 20.

Figura 20 - Barragens do complexo Samarco Mineração S/A



Fonte: Google Earth (2015).

O complexo fez uso da cava exaurida do Germano para disposição de rejeito arenoso. A barragem Santarém na época era usada para contenção de sedimentos e reservatório de água.

A barragem do Fundão apresentava como características técnicas altura de aproximadamente 100m, comprimento de 761m e um volume armazenado da ordem 92 milhões de metros cúbicos (ANM2019). O método de alteamento a montante foi empregado, com o próprio rejeito arenoso no alteamento. A ruptura liberou volume estimado de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, água e materiais utilizados em sua construção, que correspondem a quase 70% do volume total acumulado em Fundão (PEDROSA, 2017).

A ocorrência foi em 05/10/2015, quando barragem de Fundão rompeu e o material proveniente vazou em direção a barragem de Santarém, localizada a

jusante de Fundão. Por este motivo a estrutura de Santarém sofreu o galgamento, mas não chegou a romper. A água acumulada em Santarém diluiu ainda mais o rejeito, aumentando a velocidade da lama, causando grandes danos. A barragem Santarém, projetada para armazenamento de rejeito e água tinha 33,1 m de altura do maciço e 76milhoes de metros cúbicos, segundo dados do Relatório de Auditoria da estrutura, de 2015. A onda de rejeitos galgou o barramento de Santarém erodiu severamente o talude de jusante, descalçando o pé do talude e comprometendo a saída do dreno interno e a própria estabilidade do maciço.

O distrito de Bento Rodrigues por se encontrar a jusante da barragem, foi praticamente destruído pela lama. Além disto, 41 municípios de Minas Gerais e Espírito Santo, foram afetados, pois a lama percorreu 663,2km. O rompimento da barragem causou a morte de 19 pessoas entre funcionários da empresa e moradores que ocupavam área a jusante da barragem localidade de Bento Rodrigues, distrito de Mariana/MG, Figura 21.

Figura 21 - Avanço da lama sobre o rio até chegar ao mar.



Fonte: PEDROSA (2017).

A barragem do Fundão já apresentava problemas, segundo relatórios de 2013, 2014 e 2015, realizados pela consultoria VOGBR. Nesses relatórios, ela descrevia que a estrutura da barragem do Fundão encontrava-se em condições adequadas de segurança, desde que atendidas às recomendações em relação

à estabilidade física apresentadas no plano de ação. Entre as recomendações sugeridas estavam as seguintes: revegetar as áreas desprotegidas do talude do Dique 1 e ombreira direita; acertar as irregularidades geométricas pontuais do talude de jusante; monitorar vazão do tapete drenante do Dique 1 e implantar projeto executivo para ajustamento e melhoria das saídas dos tubos; acabar a implantação do projeto executivo do sistema de drenagem superficial e reparar trincas de canaletas existentes; ajustar a geometria das bermas garantindo uma declividade transversal com o sentido do fluxo para as canaletas de drenagem; efetivar o monitoramento da vazão das surgências na ombreira direita, dentre outras. A partir da análise dessas recomendações, a barragem exibia problemas de erosão superficial, por carência do sistema de drenagem superficial e falta de proteção de taludes. A barragem poderia estar apresentando problemas de percolação interna de água, devido ocorrência de surgências de água (OLIVEIRA, 2015). Na data do acidente, a mineradora realizava obras para alteamento e unificação das barragens de Germano e de Fundão, visando ampliar a capacidade de armazenamento de rejeitos através do alteamento da crista do barramento de 920m para 940m.

O Ministério Público, desde o início, avaliou o licenciamento com a maior profundidade possível. De acordo com o órgão, a licença prévia para a obra em Mariana foi concedida em 2007, sem que a mineradora apresentasse o projeto executivo, que reúne todas as informações de uma intervenção deste porte (CNPQ, 2016). Um dos responsáveis pelo caso, o promotor Carlos Eduardo Ferreira, afirma com grande exatidão que o licenciamento ambiental foi decisivo para que a tragédia ocorresse, pois ele é uma colcha de retalhos: cheio de inconsistências, omissões e graves equívocos, que revelam uma ausência de política pública voltada à proteção da sociedade. O promotor destaca ainda, a agilidade com que a obra foi autorizada, sendo o licenciamento alcançado em tempo extraordinariamente rápido (MARENGO, 2015).

O Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) concluiu o relatório em que constata que o rompimento da Barragem do Fundão, teve início no chamado “recuo”, na região próxima à “ombreira” esquerda, de forma abrupta. Houve uma elevação próxima a cota 864m, fazendo com que o eixo da barragem fosse recuado a partir da sua região central em direção à ombreira esquerda da

barragem. Como consequência da mudança no eixo e a criação de um “recuo”, a nova seção da barragem, acima da elevação de 864m, passou a ter como base rejeitos que eram menos resistentes e menos permeáveis do que se esperava. A ruptura da barragem do Fundão ocorreu sob condições não drenadas, ocasionada pela ocorrência de uma camada de baixa permeabilidade e baixa resistência proporcionando assim resíduos altamente heterogêneos na sua fundação (CNPQ, 2016).

Para explicar a ruptura rápida e catastrófica, os rejeitos na base da barragem pareciam não somente ter baixa resistência e serem pouco permeáveis, mas, principalmente, serem suscetíveis à liquefação estática, processo que ocorre quando o sedimento sólido apresenta repentina redução na resistência. Este fenômeno ocorreu no local onde foi feito o recuo do eixo. Sete fatores contribuíram para que processo de liquefação ocorresse (MINAS, 2016):

1. Elevada saturação dos rejeitos arenosos sedimentados na barragem do Fundão, tanto sob o recuo do eixo da barragem, cujo nível de água em seu interior atingiu a elevação aproximada de 878m (de acordo com leituras dos piezômetros apontados pelo consultor Pimenta de Ávila), quanto sob os rejeitos arenosos depositados no restante da barragem, em virtude da existência de fluxo subterrâneo de água e de contribuições de nascentes no entorno.
2. Falhas no monitoramento contínuo do nível de água e das poropressões junto aos rejeitos arenosos depositados e dos rejeitos constituintes dos diques de alteamento.
3. Muitos equipamentos de monitoramento estavam com defeito, não sendo concretizadas, inclusive pelo pessoal da VOGBR, as devidas leituras, além da omissão destes fatos no laudo de segurança da barragem.
4. Monitoramento deficiente em decorrência do baixo número de equipamentos instalados na barragem. Havia regiões dos alteamentos realizados, que não tinham piezômetros e medidores de nível de água instalados.
5. Elevada taxa de alteamento anual da barragem, em função do grande volume de lama que era depositado em seu interior (em média, cerca de 20m de altura por ano). É conhecido que o alteamento de qualquer

barragem de rejeitos deve seguir a elevação do nível do lago formado. Nos últimos dois anos, os alteamentos foram feitos a uma taxa anual superior à advertida na literatura técnica, que é de no máximo 10m de altura.

6. Obstrução do dique 02, o que ocasionou infiltração de água de forma generalizada para a área abrangida pelos rejeitos arenosos, no lado direito da bacia de deposição de rejeitos.
7. Falha do sistema de drenagem interno da barragem cujos volumes de água drenados, de acordo com os resultados de monitoramento apresentados pela Samarco para os meses de setembro e outubro de 2015, eram semelhantes e até mesmo inferiores a resultados obtidos em 2014.

O rompimento da barragem do Fundão foi resultado de um somatório de atividades realizadas fora do padrão, que finalizou com o processo de liquefação do maciço, iniciada com o recuo para o alteamento, seguido pela rápida elevação destes, falha no controle de disposição de rejeito e falta de drenagem, aspecto mais importante para a estabilidade de maciço nesta situação. Fica clara a importância da instrumentação para acompanhamento de estabilidade do talude. Destaca-se que a gestão de segurança de uma barragem deve ser realizada de forma regular a fim garantir a segurança da estrutura.

3.3.8 Barragem de Brumadinho

A Barragem de Rejeitos BI na mina de minério de ferro do Córrego do Feijão da Vale S.A., localizada a 9 km a nordeste de Brumadinho, em Minas Gerais, sofreu um rompimento repentino, resultando em um fluxo de lama catastrófico que se deslocou rapidamente a jusante (ROBERTSON *et al.*, 2019). Na Figura 22, observa-se a localização da Barragens I e IV.

O rompimento dessa barragem foi um evento único, pois existem imagens de vídeo do evento, em alta qualidade, que fornecem informações sobre o mecanismo de rompimento. Os vídeos mostram claramente um rompimento do talude da barragem, começando da crista e estendendo-se para uma área logo

acima do primeiro alteamento (a barragem Inicial). A crista da barragem caiu e a área acima da “região do pé” se abaulou para fora antes que a superfície da barragem se rompesse, conforme descreve Robertson *et al*, (2019).

Figura 22 - Localização das Barragens I e IV



Fonte: ROBERTSON *et al*. (2019).

O rompimento se estendeu por grande parte da face da barragem, e o colapso do talude ocorreu em menos de 10 segundos, com 9,7 milhões m³ de material (representando aproximadamente 75 por cento dos rejeitos armazenados) se esvaindo da barragem em menos de 5 minutos. O material depositado na barragem teve uma súbita e significativa perda de resistência e rapidamente se tornou um líquido pesado que escorreu a jusante em alta velocidade.

Os vídeos mostram que a superfície de ruptura inicial foi relativamente rasa e foi seguida por uma série de deslizamentos rápidos e rasos com taludes íngremes que progrediram para trás, até os rejeitos. Com base nestas observações, fica claro que o rompimento foi resultado da liquefação estática dos materiais da barragem. A perda de resistência significativa e repentina indica que os materiais retidos pela barragem apresentavam comportamento frágil (ROBERTSON *et al.*, 2019).

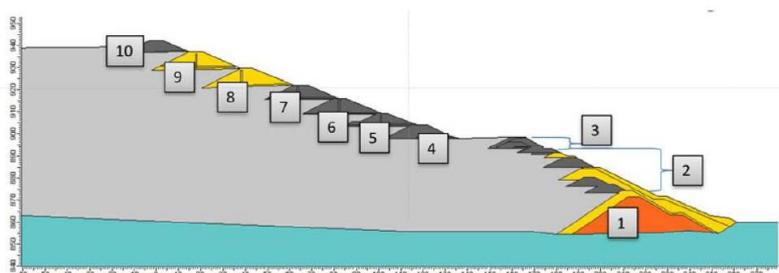
O rompimento também é um evento único sob a perspectiva de que ocorreu sem sinais aparentes de instabilidade antes de sua ocorrência. Vídeos de alta qualidade de um drone sobrevoando a barragem I, apenas sete dias antes do rompimento, também não mostraram sinais de instabilidade. A barragem foi

monitorada extensivamente, usando uma combinação de marcos topográficos ao longo da sua crista; inclinômetros para medir deformações internas; radares de solo para monitorar as deformações de superfície da face da barragem; e piezômetros para medir mudanças nos níveis internos de água, entre outros instrumentos. Nenhum desses métodos detectou deformações ou alterações significativas antes do rompimento.

As análises de imagens de satélite pós-rompimento indicaram pequenas deformações descendentes, lentas e essencialmente contínuas de menos de 36 milímetros por ano, ocorrendo na face da barragem no ano anterior ao rompimento, com alguma aceleração da deformação durante a estação chuvosa. Na parte inferior da barragem, as deformações medidas nos 12 meses antes do rompimento incluíram deformações horizontais variando entre 10 a 30 mm. Tais deformações são compatíveis com recalque lento e de longo prazo da barragem e não seriam, sozinhas, um indicativo de um possível rompimento.

O histórico de construção da barragem fornece informações sobre as possíveis razões para o rompimento. A barragem foi construída usando o método a montante, permaneceu por um período de 37 anos e sofreu 10 alteamentos. Na Figura 23, seção transversal da barragem I tem-se os alteamentos e estágios da construção.

Figura 23 - Alteamento e estágios de construção da barragem I, em perfil.



Fonte: ROBERTSON *et al.* (2019).

A construção a montante resultou em movimento da crista a montante ao longo do tempo. Usando esse método, a barragem foi construída a uma altura total de 86 m (pé até a crista), com cota final da crista de 942 m acima do nível médio do mar e um comprimento de crista de 720 m. A altura de cada alteamento variou

de 5 a 18 m. Os taludes a montante e a jusante das bermas construídas em cada alteamento variaram de 1,5 na horizontal a 1,0 na vertical (1, 5H:1V) a (2,5H:1,0V); no entanto, inclinações de (2H:1V) foram usadas na maioria dos casos. Não foram construídos novos alteamentos após 2013 e o lançamento de rejeitos cessou em julho de 2016 (ROBERTSON et al., 2019).

A barragem inicial continha características que impediam a drenagem através do pé da barragem. Nenhuma drenagem interna significativa foi instalada durante a construção dos alteamentos posteriores, exceto pequenos tapetes drenantes abaixo de alguns dos alteamentos posteriores e drenos verticais em alguns dos alteamentos superiores. Os tapetes drenantes e os drenos verticais nos alteamentos posteriores foram inseridos em resposta à infiltração observada a partir da face da barragem acima do pé durante trabalhos de construção.

O projeto inicial da barragem definiu uma inclinação relativamente íngreme. Após o terceiro alteamento, um recuo foi construído para que o alinhamento da crista da barragem ficasse reto. O recuo reduziu a inclinação geral da barragem e moveu a parte superior da barragem para mais perto do lago de decantação e do futuro nível da água interno. Imagens aéreas e de satélite Pré-rompimento mostram que, em alguns momentos durante a vida útil da barragem, a água estava próxima à crista da barragem, levando a rejeitos fracos próximos à crista, e camadas intercaladas de rejeitos finos e grossos retidos pela barragem. O recuo também moveu a parte superior da barragem para cima de rejeitos mais fracos e de granulometria mais fina (ROBERTSON *et al.* 2019).

A falta de recursos de drenagem significativos, juntamente com a presença de camadas de rejeitos finos menos permeáveis dentro da própria barragem, resultou em um nível de água elevado. Uma percolação na face da barragem, logo acima do pé, era observada periodicamente, desde a época do quarto alteamento.

Apesar da finalização do lançamento de rejeitos em meados de 2016, a análise dos dados dos piezômetros instalados dentro da barragem mostrou que o nível de água não reduziu significativamente após a paralização do lançamento de rejeitos. Os níveis de água na parte superior da barragem estavam caindo lentamente, mas permaneciam altos na região do pé da barragem. Isto ocorreu

principalmente devido à alta precipitação regional na estação chuvosa, combinada à drenagem interna limitada na barragem. Drenos horizontais profundos (DHPs) foram instalados no início de 2018, em um total de 14, principalmente ao longo do pé do recuo. Após um incidente durante a instalação do DHP 15, não se prosseguiu com a instalação de outros DHPs (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Uma descoberta importante foi que os rejeitos retidos pela barragem tinham um teor muito alto de ferro, apresentando índices superiores a 50%, com muito pouco quartzo (inferior a 10%). O alto teor de ferro deu aos rejeitos um alto peso específico total, de aproximadamente 26 kN/m³. Os dados históricos dos ensaios de piezocone (CPTu), em conjunto com pesos específicos e poropressão, indicam que os rejeitos eram predominantemente fofos, saturados e contráteis sob grandes deformações específicas.

Ensaio em laboratório avançados realizados como parte da investigação em amostras reconstituídas representativas dos rejeitos mostraram um comportamento frágil quanto à perda de resistência e indicaram a presença de cimentação. Este comportamento frágil quanto à perda de resistência também foi observado em dados históricos de ensaios de palheta (FVT), piezocone (CPTu) e em alguns dados históricos de ensaios de laboratório. Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) analisadas pelo Painel de Especialistas atribuíram este comportamento frágil à cimentação, provavelmente devido à presença de óxidos do ferro. Os ensaios de laboratório avançados também mostraram que amostras fofas de rejeitos acumulariam deformação específicas, sob carga constante. Este acúmulo de deformação específica sob carga constante é chamado de fluência, ou *creep*. Em resumo, os rejeitos estavam fofos, predominantemente saturados e cimentados. A cimentação tornava os rejeitos rígidos e potencialmente com comportamento frágil. Combinadas, estas características resultaram em um material com potencial de perda de resistência significativa e rápida devido às deformações específicas em andamento. As características de rigidez e comportamento frágil dos rejeitos são compatíveis com a falta de observações de deformações antes do rompimento e as reações rápidas e repentinas durante o rompimento (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Análises do estado de tensão dentro da barragem mostraram que partes significativas da barragem estavam sob carregamentos muito elevados devido à inclinação da barragem, ao alto peso dos rejeitos e ao alto nível de água. A combinação de uma barragem íngreme construída a montante, nível de água elevado, rejeitos finos com baixa resistência dentro da barragem e a natureza frágil dos rejeitos criou as condições para o rompimento (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Simulações computacionais mostraram ainda que tensões de cisalhamento elevadas na barragem resultaram em pequenas deformações específicas internas na barragem ao longo do tempo devido ao *creep*, que são compatíveis com as pequenas deformações superficiais observadas nas imagens de satélite do ano anterior ao rompimento. As simulações confirmaram que este *creep* pode ser suficiente para desencadear a perda de resistência nos rejeitos e o rompimento da barragem, um fenômeno conhecido como “ruptura por *creep*” (ROBERTSON *et al.*, 2019).

As simulações mostraram ainda que o *creep*, quando combinado com a perda de sucção, seria suficiente para desencadear o rompimento global da barragem no dia 25 de janeiro de 2019 (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Em resumo, conforme analisa Robertson *et al.* (2019), o histórico descrito a seguir gerou as condições de instabilidade na barragem I:

- Um projeto que resultou em um talude íngreme construído a montante;
- O controle de água dentro da bacia de rejeitos que às vezes permitia que a água do lago de decantação chegasse perto da crista da barragem, resultando no lançamento de rejeitos de baixa resistência perto da crista;
- Um recuo de projeto que empurrou as partes superiores do talude para cima dos rejeitos finos de menor resistência;
- A falta de drenagem interna significativa que resultou em um nível de água persistentemente alto na barragem, principalmente na região do pé da barragem;
- Alto teor de ferro, resultando em rejeitos pesados com cimentação entre partículas. Esta cimentação gerou rejeitos rígidos que apresentavam

comportamento potencialmente muito frágil se submetidos a um gatilho que ensejasse uma resposta não drenada; e

- Precipitação regional alta e intensa na estação chuvosa, o que pode resultar em perda significativa de sucção, produzindo uma pequena redução de resistência nos materiais não saturados acima do nível da água.

O rompimento e deslizamento de lama foi resultado da liquefação estática dos rejeitos dentro da barragem. O histórico descrito gerou uma barragem composta principalmente por rejeitos fofos, saturados, pesados, e de comportamento frágil, com altas tensões de cisalhamento no talude a jusante, resultando em uma barragem marginalmente estável, próximo ao rompimento em condições não drenadas. Ensaios de laboratório mostraram que a quantidade de deformação específica necessária para desencadear a perda de resistência poderia ser muito pequena, especialmente nos rejeitos mais fracos. Estes foram os principais componentes que possibilitaram a liquefação estática (ROBERTSON *et al.*, 2019).

A barragem de Brumadinho apresentava problemas com drenagem desde o primeiro alteamento. No decorrer dos alteamentos foram criados alguns drenos para tentar melhorar a drenagem, o que não foi muito eficiente. O ângulo de talude do projeto era muito íngreme para o método construtivo adotado. O nível de água dentro do maciço não baixou o suficiente, mesmo após a finalização da operação da barragem. Como em vários momentos ocorreu disposição de rejeito de forma inadequada, estes também influenciaram para a instabilidade da barragem, criando condições para o fenômeno de liquefação. Robertson *et al.* (2019) concluiu que todos estes fatores levaram a ruptura da barragem. Novamente neste caso, a gestão de segurança de barragens e a instrumentação tem grande importância para evitar acontecimentos como estes.

3.3.9 Barragem TB01 – Nossa Senhora do Livramento

A Barragem TB01, pertencente a VM mineração, localizada em Nossa Senhora do Livramento, no Mato Grosso, a 42 km de Cuiabá, rompeu parcialmente na manhã da data 1 de outubro de 2019. O ocorrido não deixou vítimas fatais e dois trabalhadores ficaram feridos e foram levados ao hospital com ferimentos leves. O incidente não afetou nenhuma área de preservação permanente (ANA, 2019).

A estrutura tinha 22 m de altura e foi construída pelo método de jusante. O reservatório continha rejeito aurífero, classificado com inerte. A capacidade do reservatório era de 935.494 m³. A estrutura apresentava Dano Potencial Associado (DPA) e Categoria de Risco (CRI), baixo, porém após o acidente, a classificação de risco a Danos Potenciais Associados foi alterada para alto. Após o rompimento do dique o rejeito vazou, ocupando área de 60 m dentro da empresa. As cidades próximas a mineradora não foram atingidas, pois, o resíduo ficou dentro da empresa.

Os relatórios de inspeções regulares enviados não relataram qualquer ocorrência de anomalias na estrutura da barragem, e ela sempre possuía pontuações zero em todos os itens referentes ao estado de conservação, ou seja, a barragem não apresentava problemas de conservação, desde 21 de setembro de 2019. Neste contexto, menores notas relacionavam-se a melhores resultados (ANA, 2019). As inspeções realizadas regularmente não apontaram riscos de rompimento. O que se sabe é que o dique estava em construção quando ocorreu o acidente.

3.3.10 Síntese das rupturas de barragens de rejeito estudadas

Ocorreram no país, até o mês de maio de 2020, o rompimento de nove barragens, oito encontravam-se no estado de Minas Gerais e uma no estado do Mato Grosso (Figura 24). O método construtivo empregados nessas barragens estão apresentados na Figura 25.

Figura 24 - Localização das barragens que romperam

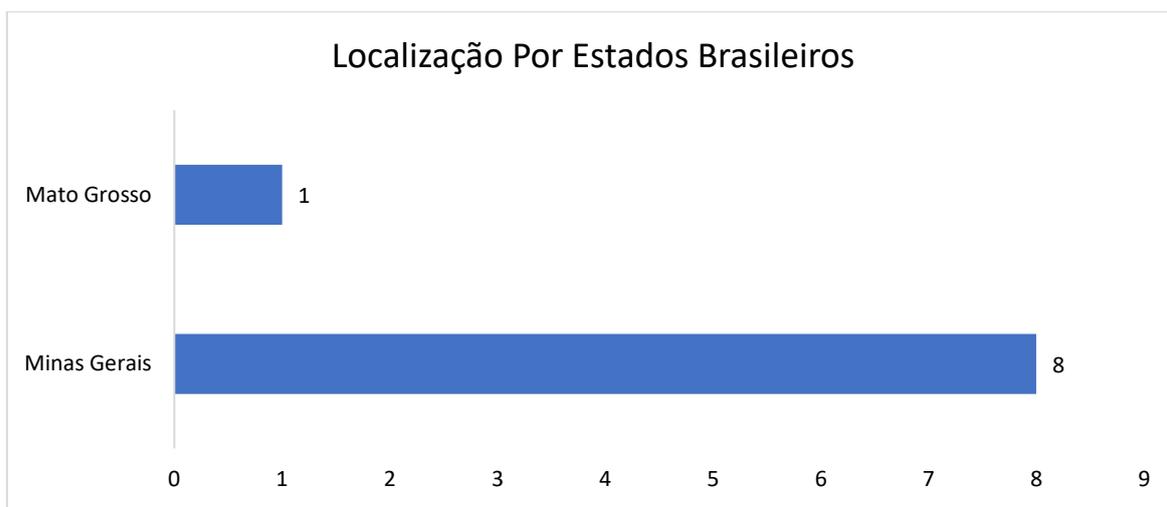
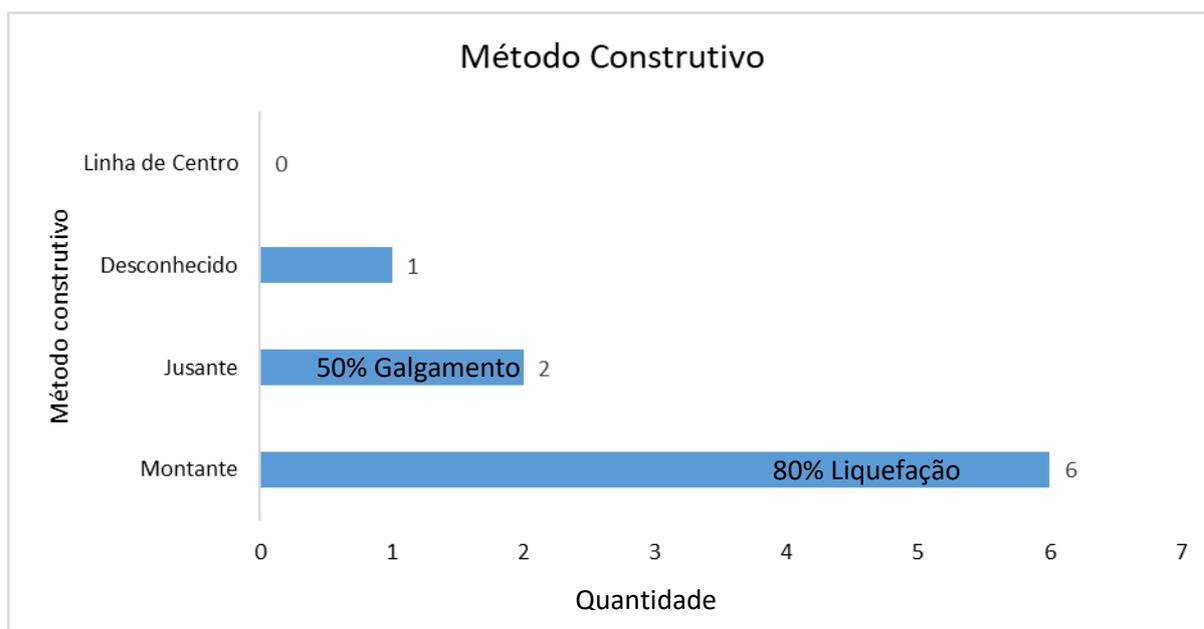


Figura 25- Tipo de ruptura e método construtivos das barragens que romperam



A Tabela 12 foi elaborada com base nas informações do histórico de rompimento de barragem no Brasil, e apresenta uma síntese das informações relevantes para explicar os fenômenos que levaram essas barragens ao colapso. Assim, para cada barragem estudada, existe um tópico na referida tabela que destaca o método construtivo, a data do rompimento, o status da estrutura na época da ruptura, pontua as principais causas do acidente e consequências do desastre.

Na Tabela 13, por sua vez, contém as informações adicionais do CRI e DPA, das nove barragens estudadas e classificadas pelos Critérios de Risco, Dano Potencial Associado e minério extraído. Observa-se, a partir destes dados, que 5 das estruturas que romperam eram classificadas com Critério de Risco CRI baixo e 4 com CRI desconhecido. Com relação ao Dano Potencial Associado DPA, 44% apresentavam dano potência associado alto, 11% médio, 22% baixo e 22% desconhecido. Sobre o tipo de rejeito armazenado, 75% das barragens armazenavam rejeito de ferro, seguida por 11% Bauxita, 11% Ouro.

Observa-se na tabela 13, que as barragens com data de ruptura anterior a 2014, não tem informação sobre a inserção na Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB), Nível de Emergência, CRI e DPA, recebendo a classificação de desconhecido, uma vez que essas informações não estão disponíveis ou registradas na Agência Nacional de Mineração, o que impossibilita a classificação das estruturas quanto a estes itens.

Tabela 12– Síntese das rupturas de barragens no Brasil.

Barragem de Fernandinho, Itabirito, MG, Itaminas				Início da Operação	
Método de Construção	Montante	Altura (m)	40	Data Rompimento	1986
Tipo de Rejeito	Rejeito de ferro	Capacidade da Barragem (m³)	350.000	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	1) Lançamento inadequado do rejeito, 2) Alçamento sem controle de compactação, 3) Finos do rejeito comprometendo a drenagem, 4) Liquefação, 5) Altura do maciço talude não compatível com a resistência do material.				
Consequência do Desastre	Morte de 7 pessoas e impacto ambiental próximo ao local do acidente.				
Barragem Rio das Pedras, Rio Acima, MG, Mineração Pico São Luiz				Início da Operação	1962
Método de Construção	Montante	Altura (m)	20	Data Rompimento	1986
Tipo de Rejeito	Rejeito de ferro	Cap. Da Barragem (m³)	-	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	1) Pequeno rompimento na ombreira esquerda, 2) Curvamento do eixo da barragem, 3) Falta de drenagem no pé do talude, 4) Piping, 5) Trincas no talude, 6) Alçamento do maciço e vertedouro, 7) Liquefação.				
Consequência do Desastre	Destruição ao longo do Rio das Velhas e pessoas desalojadas.				

Barragem Macacos, São Sebastião das águas Claras, MG, Mineração Rio verde				Início da Operação	1990
Método de Construção	Montante	Altura (m)	20	Data Rompimento	2011
Tipo de Rejeito	Rejeito de ferro	Cap. Da Barragem (m³)	690.000	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	1) Talude com inclinação acentuada, 2) Inexistência de drenagem, 3) Método de lançamento do rejeito, 4) Elevação da freática que levou a ruptura.				
Consequência do Desastre	Morte de 5 pessoas e 79 hectares de mata atlântica devastados.				
Barragem de Contenção de Rejeito Cataguases, Cataguases, MG, Indústria Cataguases de Papel				Início da Operação	
Método de Construção	Desconhecido	Altura (m)	-	Data Rompimento	2003
Tipo de Rejeito	licor negro - material orgânico constituído basicamente de lignina e sódio	Cap. Da Barragem (m³)	1.400.000	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	Desconhecido				
Consequência do Desastre	Interrupção do abastecimento de água em vários municípios dos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro por cerca de dez dias e causou prejuízos em pequenas propriedades rurais situadas às margens do Ribeirão do Cágado.				

Barragem de São Francisco, Mirai, MG, Mineração Rio Pomba				Início da Operação	1995
Método de Construção	Jusante	Altura (m)	35	Data Rompimento	2007
Tipo de Rejeito	Rejeito de Bauxita	Cap. Da Barragem (m³)	3.800.000	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	1) Galgamento, 2) Ruptura do vertedouro.				
Consequência do Desastre	Mancha de lama causou a morte de muitos peixes e inutilizou áreas agrícolas e pastagens. Não houve perda de vidas humanas.				
Barragem Herculano Mineração, Itabirito, MG, Mineração Herculano				Início da Operação	1996
Método de Construção	Montante	Altura (m)	64	Data Rompimento	2014
Tipo de Rejeito	Rejeito de ferro	Cap. Da Barragem (m³)	4.500.000	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	1) Rachaduras no talude, 2) Disposição de rejeito B1 sem licença, 3) Falta de drenagem que aumentou o nível freático dentro da barragem.				
Consequência do Desastre	O rompimento da barragem "B1" atingiu um riacho e deixou 300 residências sem fornecimento de água e de energia elétrica. Além disso, causou graves impactos ambientais em córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, que abastece a região metropolitana de Belo Horizonte e mortes de 3 pessoas.				

Barragem Fundão, Mariana, MG, Vale				Início da Operação	2008
Método de Construção	Montante	Altura (m)	130	Data Rompimento	2015
Tipo de Rejeito	Rejeito de Ferro	Cap. Da Barragem (m³)	91.866.000	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	1) Recuo do eixo da barragem, 2) Elevada taxa de alteamento, 3) Obstrução do dique, 4) Falha no sistema de drenagem, 5) Falha no controle de disposição de rejeitos, 6) Liquefação.				
Consequência do Desastre	O rompimento da barragem Fundão causou a morte de 19 pessoas. O Distrito de Bento Rodrigues foi totalmente destruído pela lama que percorreu a extensão de 663 Km chegando ao Espírito Santo.				
Barragem Brumadinho, Brumadinho, MG, Vale				Início da Operação	1982
Método de Construção	Montante	Altura (m)	86	Data Rompimento	2019
Tipo de Rejeito	Rejeito de ferro	Cap. Da Barragem (m³)	10.000.000	Status à época da ruptura	Inativa
Causa do Acidente	1) Erro de Projeto (talude íngreme, drenagem etc.), 2) Recuo do projeto, deslocamento do eixo, 3) Falta de drenagem, 4) Liquefação, 5) Nível freático dentro do maciço elevado, 6) Disposição errada do rejeito				
Consequência do Desastre	Causou a morte de 259 pessoas e o desaparecimento de outras 11 e impactos ambientais.				

Barragem TB1, Nossa Senhora do Livramento, MT, VM mineração				Início da Operação	-
Método de Construção	Jusante	Altura (m)	22,35	Data Rompimento	2019
Tipo de Rejeito	Rejeito de Ouro	Cap. Da Barragem (m³)	935.494	Status à época da ruptura	Ativa
Causa do Acidente	Desconhecido				
Consequência do Desastre	Espalhamento de parte do rejeito armazenado na bacia de contenção da barragem cerca de 60 m adentro da área da mineração, onde não havia habitação bem como a existência de animais. Não houve necessidade de isolamento de nenhuma comunidade pois não houve risco de serem atingidos, duas pessoas feridas				

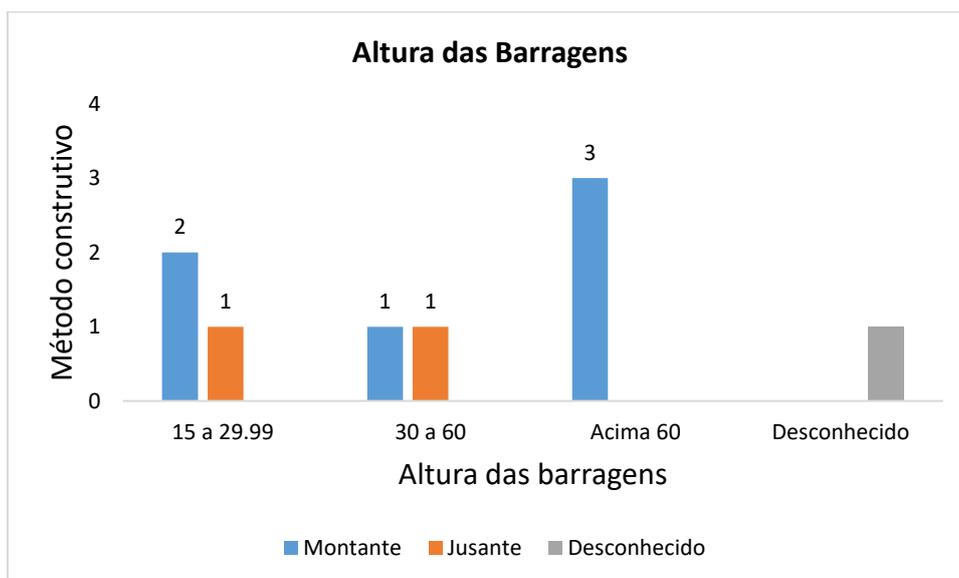
Tabela 13 – Informações adicionais e classificação ao CRI, DPA das barragens.

Barragem	CRI	DPA	Inserida na PNSB	Nível de Emergência	Minério extraído
Barragem de Fernandinho, Itabirito, MG, Itaminas	Baixo	Baixo	Sim	Não	Ferro
Barragem Rio das Pedras, Rio Acima, MG, Mineração Pico São Luiz	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Ferro
Barragem Macacos, São Sebastião das águas Claras, MG, Mineração Rio verde	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Ferro
Barragem de Contenção de Rejeito Cataguases, Cataguases, MG, Indústria Cataguases de Papel	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Desconhecido	Não se aplica
Barragem São Francisco, Mirai, MG, Mineração Rio Pomba	Desconhecido	Alto	Desconhecido	Desconhecido	Bauxita
Barragem Herculano Mineração, Itabirito, MG, Mineração Herculano	Baixo	Médio	sim	Não	Ferro
Barragem Fundão, Mariana, MG, Vale	Baixo	Alto	Sim	Desconhecido	Ferro
Barragem Brumadinho, Brumadinho, MG, Vale	Baixo	Alto	Sim	Desconhecido	Ferro
Barragem TB1, Nossa senhora do Livramento, MT, VM mineração	Baixo	Baixo	Sim	Não	Ouro

A partir da síntese dos dados que estão nas Tabelas 12 e 13, pode-se destacar o seguinte:

- Das nove barragens que romperam, seis foram construídas pelo método de montante, ou seja, 67%, sendo que 11% foram construídas por método desconhecido. Das barragens construídas pelo método de montante, 80% têm como causa principal da ruptura o fenômeno de liquefação, que ocorreu devido a outros problemas como: deficiência no projeto de drenagem, disposição incorreta do rejeito. Chama atenção o fato que a primeira ruptura de barragem, que ocorreu em 1986, e as últimas duas grandes rupturas, 2015 e 2019, tem como um dos motivos de rompimento a liquefação. Outros motivos de ruptura identificados e recorrentes foram instabilidade de talude devido à falha no sistema de drenagem e disposição incorreta do rejeito.
- As barragens construídas pelo método de jusante correspondem a 22% das barragens estudadas que se romperam. Destas, 50% dos acidentes têm como causa principal falha na estrutura do vertedouro. Destaca-se que o outro acidente apresentado a causa da ruptura não é ainda conhecida.
- A instrumentação das estruturas é importante para que seja possível fazer um bom gerenciamento das condições internas do maciço.
- Oito das nove estruturas estudadas que se romperam no país estão localizadas no estado de Minas Gerais. Destas oito, seis foram construídas pelo método de montante, por ser o método construtivo de menor custo e fácil de executar. A outra ruptura de barragem ocorreu no Mato Grosso, quando a estrutura estava em construção.
- Das barragens que se romperam, oito estavam em operação, e destas, seis foram construídas pelo método a montante, duas a jusante e uma o método empregado não foi identificado no documento consultado. A barragem inativa que rompeu também foi construída por método a montante e, também nesse caso, a razão do rompimento foi a liquefação.
- Considerando a altura da estrutura e os métodos construtivos observa-se, na Figura 26, que 50% das barragens construídas pelo método de montante eram mais altas que 60 m.

Figura 26- Altura das barragens estudadas que romperam



Com relação aos mecanismos de ruptura identificados, têm-se várias ocorrências até o colapso, conforme mostrado na Figura 27. Da análise dessa figura, observa-se que a deficiência de drenagem interna tem grande incidência e relevância na instabilidade da estrutura, seguida do lançamento de rejeito, onde a forma de operar a disposição dos rejeitos influencia diretamente na estabilidade da estrutura, principalmente se o método construtivo for a montante, seguida da liquefação. Observa-se, a partir desse gráfico, a importância de um sistema de drenagem bem projetado e funcionando adequadamente para garantir a estabilidade do maciço. A soma dos três primeiros mecanismos de ruptura que são controlados pela geotecnia é responsável por 45% das anomalias apresentadas nas barragens estudadas. Se adicionar o Nível freático tem-se 51% dos mecanismos de ruptura sobre questões controladas na geotecnia. Detalhando estes mecanismos sobre a visão geotécnica temos:

A altura, a inclinação e o comprimento são definidos no projeto geotécnico, que também verifica o posicionamento ideal para vertedouro, pontos de disposição de resíduos e estruturas de captação de água.

Os sistemas de drenagem superficial geralmente contemplam canaletas, escadas e descida d'água, direcionando todo o fluxo para áreas fora da influência da barragem. Objetivando evitar erosões e outros agentes que possam causar instabilidade na estrutura.

Segundo Fernandes 2020, O sistema de drenagem interna é indispensável a estabilidade das barragens de rejeito, pois visa aliviar a subpressão, disciplinar o fluxo que é percolado pela estrutura da barragem a um destino seguro, além de evitar o carreamento de materiais finos que podem ocasionar problemas de erosão interna. Os projetos convencionais consideram, geralmente, a construção de um filtro vertical e do tapete horizontal na fundação, com a utilização de materiais como brita e areia. Geralmente para barragens de rejeito, os tapetes drenantes suspensos sofrem recalques diferenciais no centro do vale, em relação às ombreiras. Esse fator é bem relevante se considerado que o fluxo no tapete tende a se concentrar na zona central, devendo ser considerado como um critério de projeto para tapetes assentados sobre materiais propensos a recalques.

Ainda, em relação aos critérios para dimensionamento de drenagem interna, Fernandes 2020, destaca a análise das curvas granulométricas de filtros e dos princípios de colmatação. As curvas granulométricas de um determinado material não são homogêneas e sofrem variação considerável, mesmo para materiais teoricamente bem definidos. A prática de realizar ensaios em três amostras de um material macroscopicamente “muito semelhante,” resulta em valores de condutividade hidráulica com diferenças de até cinco vezes, entre as amostras. Dessa forma, considerar essa variação é um diferencial na execução de projetos. Ainda, há que se considerar a colmatação física e química dos materiais, que conduzem a uma perda local da capacidade de escoamento nos drenos ao longo do tempo. Desta forma, adotam-se fatores de redução nos critérios de desempenho utilizados para o dimensionamento de filtros e drenos, considerando esse fenômeno na situação de estabilidade de uma estrutura.

Lançamento do Rejeito: No caso das barragens construídas com o material da usina de tratamento do minério, é indispensável que a água seja devidamente removida, o que pode acontecer por um processo de ciclonagem onde somente as partículas mais grossas são utilizadas para o barramento. O fato de o material granular ter maior permeabilidade faz com que a drenagem seja adequada e, os finos, que ainda possuem água aprisionada nos poros e são geotecnicaamente mais instáveis, estejam em pontos mais distantes do maciço.

No caso das estruturas construídas e alteadas pelo método por montante, utilizando o rejeito como material construtivo, as partículas mais grossas devem estar próximas da crista, com a redução do tamanho das partículas ocorrendo na medida em que há o avanço da praia, levemente inclinada, para porções mais extremas do reservatório. Essa é também a condição ideal a ser observada no lançamento de rejeitos no interior do reservatório. Em ambos os casos, a ideia é que a água seja visível somente na lagoa, distante do barramento, para que a superfície freática seja a menor possível no maciço, (Fernandes,2020).

As variações de tamanho de partículas de rejeito durante o adensamento fazem com que o reservatório apresente comportamento anisotrópico em relação à permeabilidade. Ou seja, as linhas equipotenciais não serão totalmente verticalizadas, o que pode resultar em estimativas imprecisas da posição da freática medida por meio de piezômetros. O valor da permeabilidade varia consideravelmente com o adensamento, grau de saturação e, particularmente, com as tensões efetivas. Além disso, camadas de baixa permeabilidade podem produzir superfícies de fluxo bem diferentes do convencionalmente avaliado, sendo essencial para a estabilidade da barragem que a superfície freática seja o mais afastado possível do barramento, (Fernandes,2020).

Liquefação: A possibilidade de ocorrência da liquefação nas barragens de rejeitos granulares, quando saturados, é uma preocupação relevante que deve ser considerada na avaliação da segurança de barragens de rejeitos, principalmente quando associada às rupturas de barragens alteadas para montante ou construídas com a técnica de aterro hidráulico.

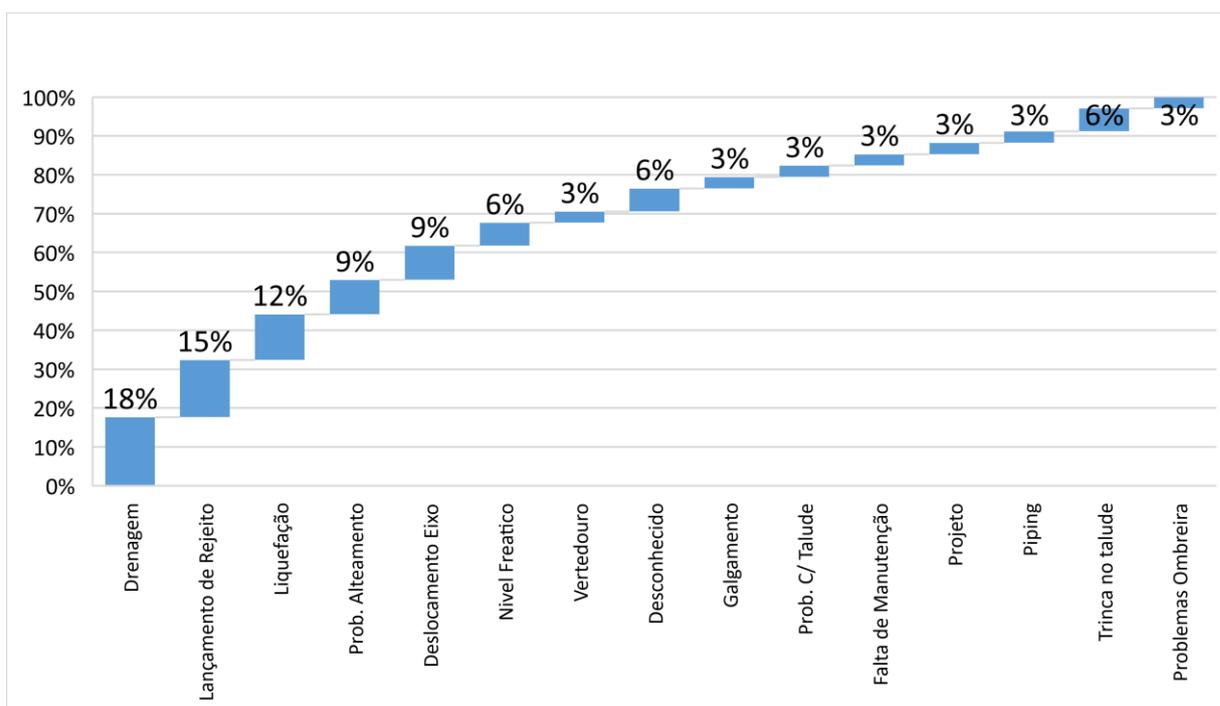
A liquefação é um fenômeno que ocorre em solos granulares saturados quando submetidos a carregamentos suficientemente rápidos para produzir um grande acréscimo das poropressões com a conseqüente redução das tensões efetivas e da resistência ao cisalhamento, pode ser ativada tanto por carregamentos dinâmicos, tais como aqueles provocados por terremotos, quanto por carregamentos estáticos, por exemplo, a construção de um dique de alteamento parcialmente apoiado no reservatório de uma barragem de rejeitos. As análises a serem efetuadas considerando esse fenômeno devem abordar a suscetibilidade à liquefação, o gatilho da liquefação e a estabilidade relativa à ruptura em fluxo por liquefação. Uma boa prática desses estudos de liquefação

compreende a metodologia que utiliza correlações entre valores de resistência à penetração de SPT e/ou CPT corrigidos e razões de resistência ao cisalhamento, obtidas pela retro análise de casos históricos de ruptura por liquefação, e analisadas conjuntamente a resultados de ensaios triaxiais não drenados, (Fernandes,2020).

Nas barragens de rejeito de mineração os aspectos de segurança de barragens requerem uma fundação bem consolidada, é indispensável que seja garantida a resistência dessa camada antes da aplicação de sobrecargas. Um programa investigativo robusto e, principalmente o acompanhamento das etapas de ocupação do reservatório ao longo dos anos, é indispensável para o correta operação e gestão da barragem. Aspectos como largura mínima de praia, borda livre mínima, sequenciamento de disposição de resíduos, detalhes de operação da estrutura extravasora, locais de descarga e controle de clarificação são itens primordiais que precisam ser avaliados e acompanhados periodicamente.

A necessidade de uma operação especializada e treinada para identificar possíveis anomalias, é indispensável, visto que antes da barragem romper, vários sinais de problemas podem ser identificados e corrigidos visando a estabilidade da estrutura.

Figura 27 – Mecanismo que levaram a ruptura das barragens estudadas



O que se pode observar, a partir do estudo do histórico do rompimento das barragens realizado, é que existem projetos onde os taludes são muito íngremes, o que, somado aos mecanismos de ruptura identificados, aumentam as possibilidades de rompimento das barragens. Os alteamentos realizados com velocidade diferente da informada no projeto e sem controle de compactação contribui significativamente para instabilidade da estrutura. Assim como o Deslocamento de Eixo que geralmente ocorre devido problemas com projeto, taludes muito íngremes e fundação sem condições para alteamentos projetados.

O controle do nível freático realizado através de instrumentos como piezômetros, medidor de nível de água e indispensável para entender e controlar o fluxo de água dentro do maciço. Destaca-se que das barragens estudadas algumas apresentaram sinais de alto nível freático antes da ruptura.

Analisando a figura 28 tem-se uma síntese das informações relevantes para explicar os fenômenos que levaram as barragens de rejeito ao colapso. Destaca-se mais uma vez, que antes de uma barragem romper, várias anomalias podem ser identificadas, o que ressalta a necessidade do monitoramento dessas estruturas a partir de sua observação, instrumentação, operação e gestão. Assim, a avaliação de um único parâmetro geotécnico não é suficiente e eficiente, sendo necessário o acompanhamento temporal das variáveis mais importantes que podem contribuir para a instabilidade de uma estrutura desse tipo.

Estes aspectos justificam a necessidade de se elaborar uma proposta sistematizada para avaliação da operação. Para isso, o ideal é empregar um instrumento simples de acompanhamento, que possibilite a avaliação temporal destas estruturas e a rápida tomada de decisão. Neste trabalho, esta proposta será apresenta e testada para dois casos específicos.

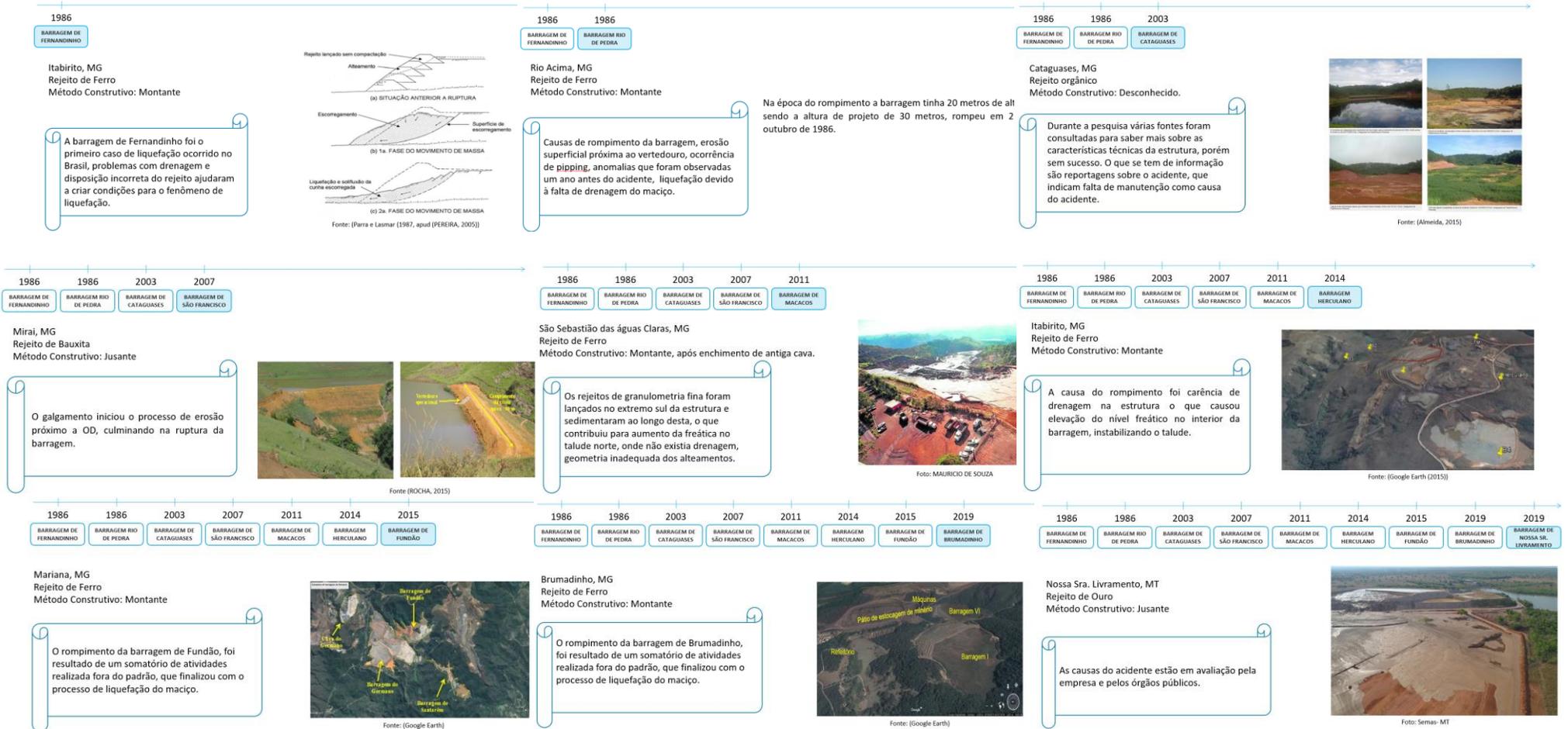


Figura 28-Sínteses do levantamento histórico de ruptura de barragens brasileiras

4 RECOMENDAÇÕES OPERACIONAIS PARA BARRAGENS DE REJEITO

A operação adequada é indispensável para manter a segurança das barragens de rejeitos, como afirma Oliveira (2010). Ele destaca que a manutenção e operação inadequada podem resultar em situações críticas, que levam a falhas graves, podendo causar a ruptura. Sendo assim, a análise e a avaliação da operação das barragens, considerando as particularidades de cada estrutura, deve ser elaborada e entregue a operação antes da estrutura entrar em operação.

As diretrizes da proposta sugerida para a avaliação da operação são diferentes daquelas que contam em uma ficha de inspeção, pois tem por objetivo informar a melhor maneira de operar a barragem, enquanto na etapa de inspeção faz-se a avaliação da estrutura das barragens. O histórico de ruptura de barragem no Brasil evidencia várias falhas operacionais, e alguns problemas de projetos foram observados. Essas deficiências de projeto podem atrapalhar a operação, assim como levar a uma falha na construção da estrutura.

A proposta sugerida para avaliação da operação, elaborada a partir do que estabelece o manual de operações de Oliveira (2010), possibilita organizar tais atividades na forma de uma Ficha de Avaliação. A tabela 14 separa por tópicos, os principais pontos de falhas que podem influenciar na ruptura das barragens, trazendo recomendações e destacando a importância de realizá-la corretamente.

Uma ficha simplificada de operação foi elaborada a fim de tornar as recomendações operacionais mais próximas de quem opera a estrutura para avaliação da barragem como um todo. Nela, apenas os itens considerados mais relevantes, e com maior recorrência, foram selecionados com base nos problemas identificados a partir do histórico de rompimento de barragens.

Na ficha simplificada de operação tabela 15 tem-se as recomendações de operação a fim de verificar o impacto da operação na estabilidade da estrutura, a partir dos fundamentos da geotecnia aplicada a barragem de rejeito. Segundo Fernandes (2020), no caso de barragens, os riscos devem ser entendidos como a medida da probabilidade da ocorrência de uma condição adversa e a gravidade

das consequências de tal condição. Sendo assim, apresenta-se a métrica de avaliação ajustada a partir de Fernandes (2020) para avaliar se a operação das barragens está de acordo com a planilha de recomendação de operação, adaptada de Oliveira (2010) e simplificada para avaliação em campo.

Na ficha simplificada de operação existe uma coluna denominada nível de perigo, onde as divergências operacionais serão pontuadas de 0 a 3, conforme Tabela 16, classificando o grau de comprometimento, as recomendações operacionais (RO) e consequência desta divergência na continuidade da operação. Desta forma, ao final da aplicação desta ficha, será possível identificar e corrigir falhas operacionais que possam causar problemas futuros na segurança da barragem, por tópicos. Quando qualquer tópico apresentar pontuação diferente de zero, recomenda-se monitoramento, intervenção rápida ou até mesmo imediata. A intervenção deverá ser realizada com participação do geotécnico responsável pela barragem, cujo objetivo é analisar as não conformidades identificadas e corrigir, para mitigar problemas futuros.

Deve-se destacar que essa ficha simplificada de operação não tem a pretensão de ser a própria análise de risco. Seu objetivo é facilitar a avaliação, de um modo sistematizado, simples e rápido, através da quantificação de aspectos relevantes da estrutura, indicando assim o momento em que é necessária a intervenção da equipe de geotecnia envolvida na operação, se for o caso, também da equipe de projetistas, para participarem da avaliação da operação e tomar as decisões a fim de minimizar riscos de possíveis problemas de instabilidade e segurança futuros. Assim, entende-se que fica mais fácil avaliar se a operação da estrutura está em conformidade com as boas práticas de operação.

Tabela 14 - Recomendações Operacionais

DESCRIÇÃO DO PROJETO

Os operadores precisam saber de todos os componentes da barragem afim de garantir sua boa operação, eficiência e controle.

Tópico	Item	Recomendação
Histórico Construtivo/ Dados Projeto	Localização	Condições físicas da área da barragem e seu entorno.
	Topografia da área	Planta de localização.
	Caracterização Geotecnia	Característica geral, permeabilidade, resistência, compressibilidade.
	Hidrogeologia	Posição do NA regional, aquíferos, direção do fluxo.
	Hidrologia	Precipitação mensais e máxima já registrada.
	Histórico da construção	Deve haver relatório simples com informações sobre o projeto e construção da barragem, registro fotográfico, pontos de atenção.
	Síntese do projeto geotécnico	Ângulo de talude considerado no projeto, drenagem interna e externa, fator de segurança limite, variação da freática.
	Segurança e Monitoramento	Instrumentação a ser instalada e forma de monitoramento.

OPERAÇÃO:

A operação diária da barragem precisa ser realizada com base em procedimentos, que garantam sua segurança. Estes procedimentos devem existir no Manual de operação de barragens.

Tópico	Item	Recomendação	
Operação das águas	Capacidade total do reservatório	Operação devem saber qual a capacidade máxima do reservatório - Função de um NA Max. (borda livre) e a periodicidade das leituras.	
	Capacidade atual do reservatório	Deve -se realizar batimetria no mínimo semestralmente para avaliar a taxa de enchimento do reservatório. Recomendasse a elaboração de gráfico com valor esperado para o período e o realizado.	
	Borda Livre	Operação precisar ter consciência da borda livre especificada em projeto para o fim da operação. Recomendasse monitorar nível e posição do lago.	
		Borda Livre Operacional: Diferença de cota entre a soleira do extravasor e a crista da barragem durante operação. Deve ser respeitada durante toda vida útil do reservatório	
		Borda Livre Mínima: diferença de cotas entre o nível máximo durante a cheia de projeto. Deve ser respeitada durante toda vida útil do reservatório	
	Stop Logs, garantir que a lâmina mínima de água seja mantida.		
	Vertedouro	Inspeção visual periódica da estrutura, a fim de identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento.	
Controle das águas no reservatório	Controlar a concentração, fluxo e vazões de água no interior do reservatório, objetivando resguardar a estrutura do dique.		

Tópico	Item	Recomendação
Operação do rejeito	Transporte e disposição dos rejeitos	Buscar a estabilização do rejeito o mais rápido possível, drenagem. A água do processo deve ser separada do rejeito, para que este possa adensar. Recomendasse que a drenagem do rejeito seja um parâmetro operacional.
	Linhas de tubulações	Toda tubulação que conduza rejeito e demais águas do processo para a barragem devem ser superficial, de fácil visualização.
	Pontos de descarga do rejeito	Buscar dispor próximo ao dique para que a segregação ocorra, a praia de rejeito se forme, e a bacia de decantação fique afastada do dique, evitando material fino e argilo próximo aos filtros de drenagem.
	Requisitos para formação de praia de rejeitos	Controlar a disposição do rejeito para garantir alcançar a geometria de praia. Manter a menor lâmina de água possível e descarga em conformidade com o projeto.

Operação Alçamento	Alçamento da Barragem	Informar a operação data inicial e final de operação de cada alçamento. Controlar poropressão de fundação e do maciço durante o alçamento. Manter a drenagem conforme especificação de projeto.
		As características de fundação de cada alçamento devem ser de conhecimento da operação e está em conformidade com o projeto, para não sofrer desvio no comportamento geotécnico.
		Manter parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista, dimensões mínimas da praia quando a montante e linha de centro, níveis de operação do lago).
	Preparo da fundação	Deve – se atender os requisitos de projeto para liberação da área de fundação e tratamento desta superfície.
	Implantação dos alçamentos	O material usado para o alçamento deve atender as condições de projeto (rejeito ou solo), a compactação deve ser realizada e ensaio para confirmar o grau de compactação devem ser realizados.
Execução da drenagem	Deve - se realizar projeto contemplando drenagem superficial, filtros verticais, drenos ou tapete.	

Tópico	Item	Recomendação
Monitoramento Operacional	Inspeção Visual	Identificar sinais ou trincas, surgência de água no talude, carreamento de solo, abatimento, erosão. Solicitar apoio para correção necessária.
	Piezômetros	Executar leitura na periodicidade estabelecida no manual de operações. A comparação entre o esperado e o realizado deve ser analisada. Caso ocorra divergência acima do aceitável, comunicar atenção ao risco e solicitar apoio. Avaliar periodicamente funcionamento dos equipamentos.
	Medidor de Nível Água	Executar leitura na periodicidade estabelecida no manual de operações. A comparação entre o esperado e o realizado deve ser analisada, em caso de divergência acima do aceitável, comunicar atenção ao risco e solicitar apoio. Avaliar periodicamente funcionamento dos equipamentos.
	Marcos Superficiais	Realizar levantamento topográfico de acordo com a periodicidade do manual de operação, comparar levantamento realizado com o levantamento base. Em caso de variação diferente do aceitável, solicitar apoio e intervenção.
	Manutenção Preventiva	Fazer manutenção das bermas, cristas, taludes periodicamente, visando corrigir pequenas erosões e garantir que não existe presença de formigueiros, cupins nessas estruturas.
		Limpar periodicamente canaletas de drenagem, verificar situação da saída do tapete drenante periodicamente. Manter vegetação rasteira na estrutura.
Manutenção Corretiva	Sempre que for necessário fazer alguma intervenção para corrigir anomalia, realizar em conformidade com o MO ou solicitação do geotécnico responsável, este deve acompanhar a atividade no campo durante sua realização.	

Fonte: Adaptado de Oliveira (2010).

Tabela 15 - Ficha de Operação Simplificada.

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Histórico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.				Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidrologia.			
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simples com informações sobre a construção da barragem, registro fotográfico, pontos de atenção.				Histórico de acompanhamento do fator de segurança.			
Dados Projeto	Maçço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.				Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.			
	Forma de controle de percolação	Surgência de água em local não projetado, alteração na cor da vegetação.				Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotécnicas de fundação.			
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais dos equipamentos, forma de disposição.				Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.			
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgência de água, vegetação				Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.			

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.				Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.			
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.				Controle do enchimento do reservatório, régua.			
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.				Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.			
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.				Diâmetro, vazão, pressão no tubo.			
	Praia de rejeito	A praia está sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.				Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.			
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto				Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.			

		de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.							
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.				Comportamento geotécnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.			
	Seqüenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.				Cálculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.			
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral (existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.				Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.			
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instalados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.				Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.			

Fonte: Adaptado de Oliveira (2010).

Tabela 16 - Proposta para pontuação na ficha de operação simplificada.

Pontuação	Classificação	Descrição	Consequência / Intervenção	Principais Exemplos
0	Normal	Operação não compromete a segurança da barragem.	Operação ocorre em conformidade com as recomendações operacionais, existe baixa divergência, sem impacto a estabilidade e segurança da barragem. Não precisa de intervenção especialista.	Segue conforme RO.
1	Atenção	Operação não compromete de imediato a segurança da barragem.	Operação apresenta pequena não conformidade as RO, caso continue a operar desta forma, poderá comprometer a Segurança. Devendo ser monitorada, controlada ou reparada. Necessário intervenção de especialista.	A) Falta de bombeamento, B) Altura da borda livre, C) Anomalia no extravasor.
2	Alerta	Operação compromete a segurança da barragem.	Operação apresenta considerável não conformidade as RO, devendo ser tomadas providencias rápidas para sua correção. Necessário intervenção de especialista.	A) Rejeito depositado de forma incorreta, B) Praia sendo formada sem a correta segregação, C) Drenagem Obstruída.
3	Emergência	Operação compromete significativamente a segurança da barragem.	Operação apresenta não conformidade crítica as RO, devendo ser tomadas providencias imediatas para sua correção. Necessário intervenção de especialista.	A) Falta de leitura da instrumentação, B) Instrumentação aponta freática alta, C) Surgência de água na estrutura.

Fonte: Adaptado de Fernandes (2020).

A fim de avaliar a aplicabilidade dessa proposta, onde se valoriza o uso de uma ficha simplificada de operação, serão estudados os casos de duas barragens, a partir de informações que constam na literatura. Espera-se, com a aplicação dessa proposta, sistematizada na referida ficha, que seja possível identificar problemas durante as fases de construção e operação delas, antes que os problemas possam ocorrer.

Ao final da aplicação desta proposta, a hipótese é que seja possível identificar e corrigir possíveis falhas operacionais responsáveis por problemas que comprometeram a segurança destas obras, por tópicos, com a descrição de qual etapa está sendo avaliada, por exemplo: dados do projeto, operação das águas etc. Segundo essa abordagem, quando qualquer tópico apresentar pontuação diferente de zero, recomenda-se o monitoramento, intervenção rápida ou até mesmo imediata. Recomenda-se, neste caso, que sempre que tal intervenção tiver que acontecer, ela seja feita com participação de geotécnico responsável.

Sugere-se que sempre que a proposta de avaliação através de ficha simplificada tenha resultado diferente de zero, seja realizada avaliação com equipe multidisciplinar responsável pela gestão e operação da barragem para tomada de decisão sobre como corrigir as anomalias que tiveram pontuação diferente de zero. A tomada de decisão sobre a correção da anomalia deve ser realizada o mais rápido possível, pois é a resolução da anomalia evidenciada na avaliação da operação que irá garantir a estabilidade e correta operação da estrutura.

A princípio a proposta de avaliação da operação deve ser realizada semanalmente, caso a pontuação se mantenha igual a zero, o período de avaliação pode ser alterado para 15 dias, nunca excedendo o período de um mês, pois a avaliação contínua é que garante a correta operação da estrutura.

5 ESTUDO DE CASOS

5.1 Considerações iniciais

Com base nos dados levantados e nos estudos realizados, foram elaboradas as seguintes hipóteses que podem justificar a falha de barragens:

1ª Hipótese – Deficiências de projeto

- Galgamento, geralmente causado por mau dimensionamento, desconsiderando volumes de chuvas decamilenar;
- Ângulo de talude muito íngreme;
- Problemas de drenagem das águas superficiais e profundas;
- Problemas na fundação.

2ª Hipótese – Anomalias identificadas visualmente

A inspeção visual periódica de campo pode auxiliar a identificar possíveis riscos à estabilidade da barragem. Antes de uma barragem romper várias anomalias, como trincas, surgimento de águas, carreamento de solo, mudança na coloração da vegetação pode ser, visualmente, observadas.

3ª Hipótese – Monitoramento

Anomalias no interior do maciço da barragem, como variação do nível de água e elevação da poropressão, podem ser identificadas pela instrumentação. Neste caso, o gerenciamento destas informações e a intervenção no momento oportuno podem garantir a segurança do empreendimento.

4ª Hipótese – Drenagem

A literatura indica que a instabilidade de talude é responsável por 24% do rompimento de barragens no mundo, como citado por ICOLD (2021). As principais hipóteses levantadas são deficiência de drenagem interna, como filtros e tapetes drenantes, algumas vezes mal dimensionados ou outras inexistentes, ou também por mal funcionamento. Falhas operacionais como uso incorreto de material de filtro, execução da drenagem em desacordo com o projeto.

5ª Hipótese - Método construtivo

Dos métodos construtivos existentes, o alteamento a montante, representa 64% das barragens que romperam no Brasil. O conjunto de várias falhas operacionais e de projeto são as principais causa que levam ao fenômeno de liquefação.

6ª Hipótese – Falhas causadas pela forma de operação

Dentre as falhas causadas pela operação inadequada, que influenciam diretamente na estabilidade da barragem estão: disposição de rejeito realizada de forma incorreta, grande quantidade de água dentro do reservatório causada pela falta de bomba ou recirculação e má formação de praia. Para a elaboração das recomendações de operação, visando a segurança do empreendimento, fez-se uma síntese das rupturas de barragens estudadas. Ele foi sistematizado em uma ficha simplificada, cujo objetivo é facilitar a identificação do impacto da operação na instabilidade da barragem, baseado sempre nas recomendações de operação e no monitoramento das estruturas do empreendimento. Nesta ficha foi adotado um sistema de pontuação que varia de zero a três. Quanto maior a pontuação significa que a operação do empreendimento não está seguindo as recomendações de operação, sendo necessária intervenção de especialista. Quando a pontuação for igual a zero, a operação ocorre de acordo com o previsto.

Dois estudos de caso serão realizados a fim de avaliar a proposta apresentada, que valoriza o uso da ficha simplificada de operação de barragens de rejeito a orientar as ações necessárias para evitar que os problemas ocorram.

5.2 Barragem I de Brumadinho

5.2.1 Considerações iniciais

Baseado no Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da barragem I do Córrego do Feijão elaborado por Robertson *et al.* (2019), sua construção foi realizada em 15 estágios, com 10 alteamentos, conforme descrito na Tabela 17. O último alteamento ocorreu em 2013, e a disposição de estéril foi finalizada em 2016, com a ruptura em 2019.

Para melhor avaliar o desempenho e representar o que ocorreu nesse empreendimento por meio da proposta apresentada, que valoriza o acompanhamento das atividades de operação através do emprego de uma ficha simplificada, dividiu-se a sequência construtiva em 6 etapas, ou seja:

- Barragem inicial (Etapa 01)
- Segundo alteamento (Etapa 02)
- Terceiro alteamento (Etapa 03)
- Quarto alteamento (Etapa 04)
- Alteamentos 5, 6 e 7 (Etapa 05)
- Alteamentos de 8, 9 e 10 (Etapa 6)

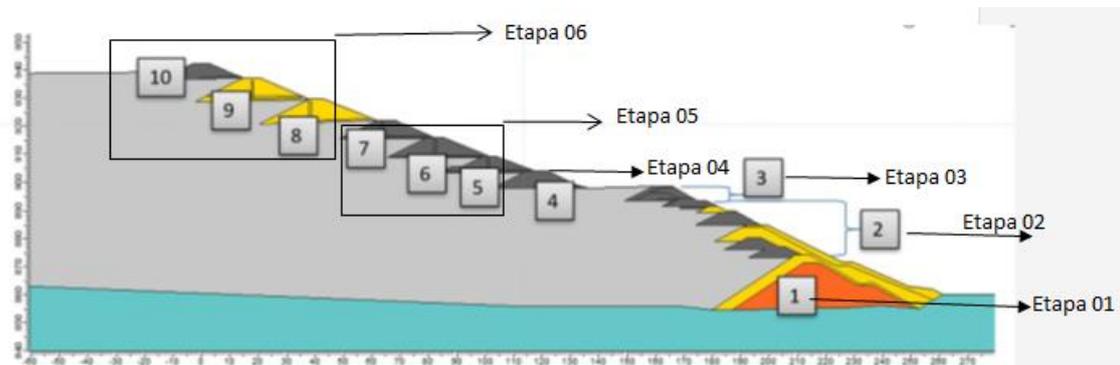
Na Figura 29 tem-se a representação esquemática com as diferentes etapas construtivas para aplicação da proposta para avaliação de desempenho da Barragem I de Brumadinho.

Tabela 17 - Sequência construtiva da Barragem I de Brumadinho.

Estágio	Ano	ID do Alteamento	Cota da crista (m nmm)	Altura máxima (m)	Empresa do projeto	Empresa de construção
1	1976	Barragem Inicial (Primeiro)	874	18	Christoph Erb	Emtel
2	1982	Segundo	877	21	Tecnosan	Tercam
3	1983		879	23		Desconhecido
4	1984		884	28		Construtora Sul Minas
5	1986		889	33		Desconhecido
6	1990		891,5	35,5		Unienge Com. e Constr. Ltda.
7	1991	Terceiro	895	39	Chammas Engenharia	Construtora Sul Minas
8	1993		899	43		Desconhecido
9	1995	Quarto	905	49	Tecnosolo	CMS Constr. SA
10	1998	Quinto	910	54		U & M
11	2000	Sexto	916,5	60,5		Constr. Dragagem Paraopeba
12	2003	Sétimo	922,5	66,5		Construtora Impar Ltda.
13	2004	Oitavo	929,5	73,5		Integral
14	2008	Nono	937	81	Geoconsultoria	Integral
15	2013	Décimo	942	86	Geoconsultoria	Salum Enga

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

Figura 29-Definição das etapas para avaliação por meio da abordagem sugerida



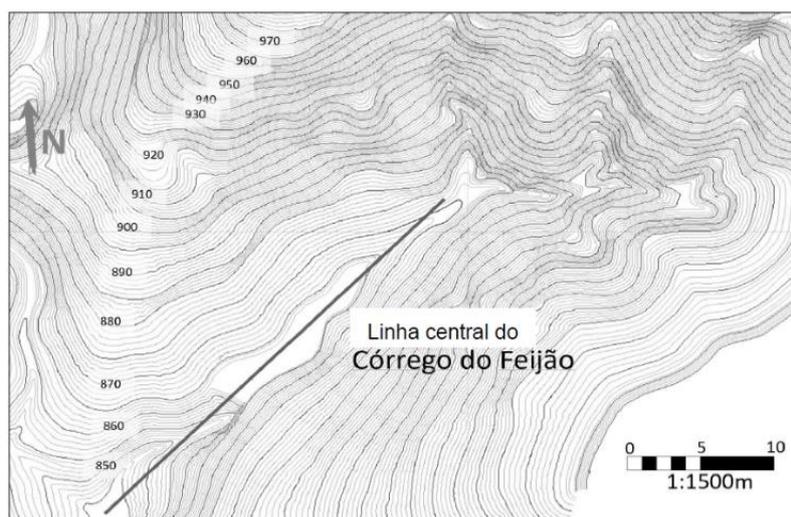
Fonte: Adaptado de Robertson *et al.* (2019).

5.2.2 Avaliação de desempenho - Etapa 01

a) Contextualização da Etapa 01

A Barragem I teve sua construção iniciada em 1976, em local não explorado, de topografia montanhosa com características de clima tropical, como se observa na Figura 30. A topografia inicial do local, destacando a linha central do córrego do Feijão estão representadas nesta figura, apresentada por Robertson *et al.* (2019).

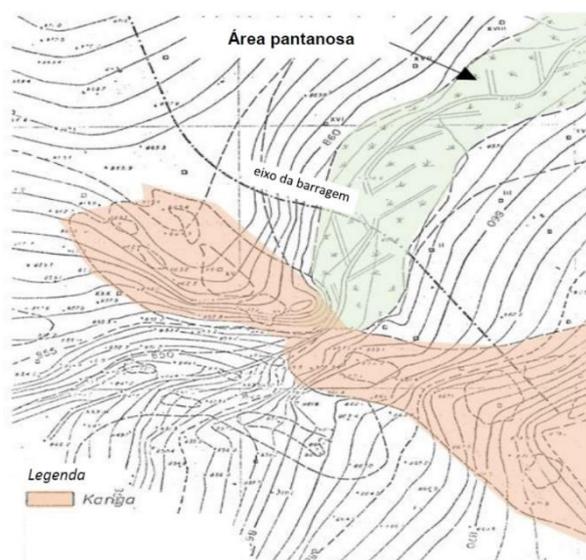
Figura 30 - Topografia local da Barragem 1



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

Os documentos da época indicam a existência de um riacho no fundo do vale: áreas pantanosas, devido a inclinação relativamente plana do riacho. Formada por solo denso de “*terra vermelha*” de laterita com elevada presença de silte. O local foi classificado como adequado para instalação da estrutura por ter um solo coesivo com espessura mínima de 0,5 m e baixa permeabilidade. No local escolhido para instalação da barragem, ocorre afloramento de rochas duras, identificadas por “*Kanga Ridge*” localizadas no eixo da barragem. Tal termo, que significa afloramento de rochas duras, com formação descrita como moderada a pouco fragmentada e permeável, expõe a situação em que se trabalhou como uma estrutura de apoio natural para o barramento por cortar o riacho Córrego do Feijão (Figura 31).

Figura 31 - Local antes da implantação da Barragem 1 de Brumadinho.



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

b) Síntese das Investigações, Projeto, Construção, Geometria, Operação e Instrumentação para a Etapa 01.

Com base nas informações disponíveis no estudo de Robertson *et al.* (2019), os ensaios de laboratório e sondagem foram realizados para investigação geotécnica. Seu objetivo era caracterizar as condições do local onde o dique de partida foi construído. Um estudo sobre as características e comportamento dos

materiais selecionados para construção do dique de partida foi realizada. Como resultado, considera-se que a estrutura foi construída com minério ultrafinos e coberta por uma camada de laterita. A Tabela 18 apresenta uma síntese com os resultados dos ensaios.

Tabela 18 - Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios para o dique.

Material	Peso Específico (KN/m ³)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (Kpa)	Permeabilidade (m/s)
Minério Ultrafino	25	35	0	1,2x10 ⁻⁶
Laterita	20	29	30	1,2x10 ⁻⁹

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

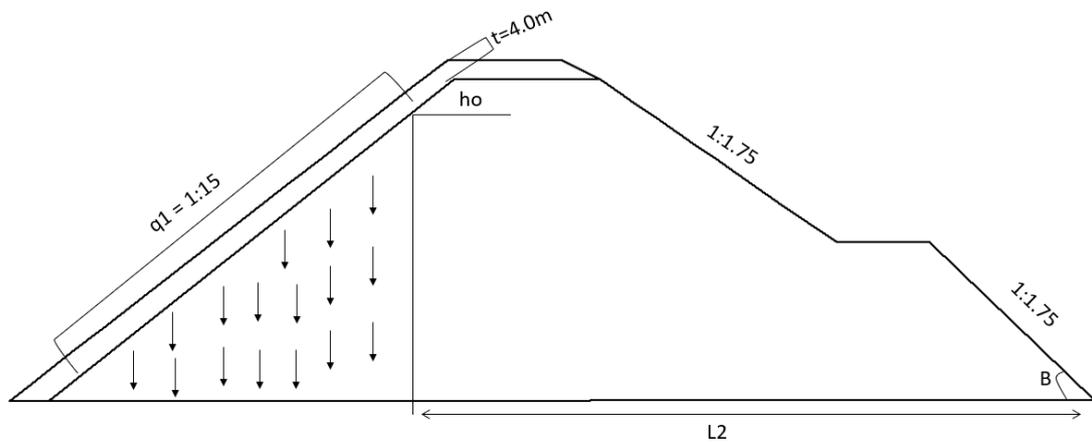
O projeto considerou os seguintes aspectos: estabilidade, sistema de gerenciamento das águas superficiais, especificação para construção e drenagem. O projetista entendeu que o baixo coeficiente de permeabilidade da laterita, quando comparado com a permeabilidade dos rejeitos, limitaria a percolação de água no corpo da estrutura. Concluiu-se que a percolação que fluísse pela camada de laterita com espessura de 4 m, construída no talude de montante, iria percolar através dos rejeitos pelo corpo da barragem, mantendo a linha freática baixa, ou seja, sem acúmulo de água, como representado na Figura 32. Destaca-se que no projeto não existe nenhuma estrutura no pé do talude de jusante a fim de evitar erosões, como a interna retrogressiva, também denominada “*piping*”.

A barragem Inicial não possuía recursos de drenagem interna para direcionar a percolação das águas da bacia para a face da barragem, o que poderia ter reduzido a pressão da água, agindo contra a barragem e aumentando sua estabilidade. O projeto previa a construção de uma camada de solo laterítico nas faces a montante e a jusante da barragem Inicial. Não foi encontrado nenhum registro de projeto ou construção de recursos de drenagem para a transferência de percolação interna ou externa para o dique inicial, através das camadas de laterita (ROBERTSON *et al.*, 2019).

No projeto estava previsto a descarga das águas superficiais e captação da proveniente dos rejeitos, para o riacho Córrego do Feijão, através de um canal

construído na ombreira direita da estrutura. Além disso, um vertedouro foi construído.

Figura 32 - Projeto conceitual do dique de partida da Barragem I.



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

Para construção dessa obra foi especificado, grau de compactação de 100% da densidade seca máxima do Proctor Normal para o rejeito e laterita, exceto a jusante do talude. A remoção de toda vegetação foi especificada, bem como a camada de solo mole e com material orgânico. A rocha existente no eixo da barragem deve ser limpa e as fraturas preenchidas com areia. Solos superficiais fracos devem ser drenados e secos antes da limpeza. O dique inicial foi selado no talude de montante com laterita.

O dique de partida foi projetado com crista de 5 m de largura na cota 874, para uma altura máxima de 18m. A inclinação do talude de jusante é 1,75 na horizontal e 1,00 na vertical, inclinação do talude de montante 1,5 na horizontal e 1,0 na vertical. Aproximadamente 4 m de espessura de laterita foi projetado para o talude a montante do dique. Uma camada de aproximadamente 1,2 m com solos coesivos foi projetada para o pé objetivando formar uma barreira contra percolação.

Segundo Pirete (2010), a Mina de Córrego do Feijão, depositava o rejeito na forma de polpa. A operação era realizada por bombeamento da usina, e transportado por tubulação até a crista da barragem. Durante os anos de 1976

até 2005, a barragem foi operada sem diretriz para a disposição de estéril e neste período foram executados oito alteamentos.

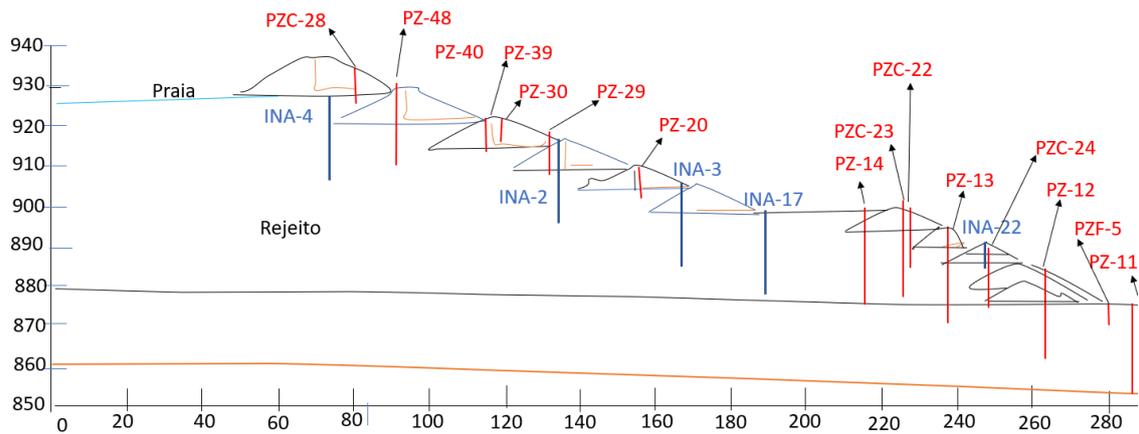
Durante o período que a disposição dos rejeitos não foi controlada, segundo a Geoconsultoria (2006), houve situações de disposição submersa por problemas no bombeamento de água de recirculação. Outro aspecto importante eram as grandes distâncias entre os pontos de espigotamento. Os espigotes eram, em média, espaçados de 100m ao longo da crista da barragem. Nesta condição, a praia formada não era uniforme e nem homogênea, com camadas de rejeitos com boa compressibilidade e drenabilidade próximos aos pontos de lançamento, o que não acontecia nas zonas situadas entre eles. Esta operação ao longo dos alteamentos da primeira fase resultou na formação de um depósito de rejeito não uniforme, com perfis caracterizados por elevados gradientes de resistências e pela presença de camadas de diferentes compacidades no maciço (variando entre camadas fofas a mediamente compactas), conforme foi observado a partir dos resultados dos ensaios SPT e CPT realizados na barragem (GEOCONSULTORIA, 2006).

As informações do “*As-Built*” não estão disponíveis para o dique inicial. Os registros do projeto para o Segundo Alteamento, porém, apresentam um resumo da barragem Inicial e não indica os desvios do projeto.

Segundo Robertson *et al.* (2019), em abril de 1996, foram instalados 23 piezômetros nos três primeiros alteamentos, entre as cotas 853,0 e 898,6 m. O comprimento variava de 6,8 m a 37,8 m. Cinco piezômetros foram instalados no solo da fundação; dois foram instalados na ombreira direita da barragem; sete nos rejeitos; dois no aterro do alteamento e sete foram instalados no Aterro Inicial.

Pirete (2010) apresenta os resultados da instrumentação instalada na Barragem I (Figura 33) usando uma seção de referência, onde INA são aos indicadores de nível água, PZ são piezômetros e PZC são piezômetros de Casagrande.

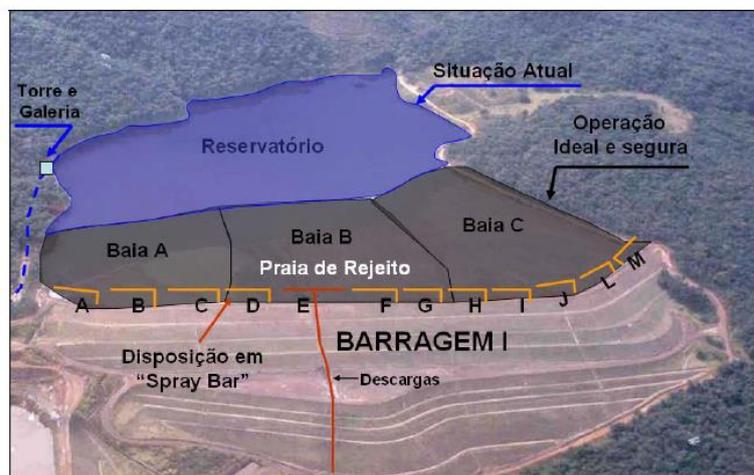
Figura 33 - Representação da instrumentação instalada na Barragem I.



Fonte: Adaptado de Pirete (2010).

Segundo Pirete (2010), no ano de 2006 quando se inicia a segunda fase, a importância da operação de disposição do rejeito foi reconhecida e ocorreram mudanças no método de disposição. Nesta etapa, os rejeitos continuam sendo dispostos a montante, mas o sistema de espigotamento foi substituído por conjuntos de barras aspersoras (*spray bars*), constituídos por tubulações com 30 m de comprimento e dispostos entre os pontos de lançamento, espaçados a cada 60 m ao longo da tubulação principal. Estas barras aspersoras operam alternadamente ao longo da crista em trechos na praia, de forma a se estabelecer a formação de camada de rejeitos o mais uniforme e homogênea possível ao longo da barragem, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Alteração na forma de disposição de rejeito na Barragem I.



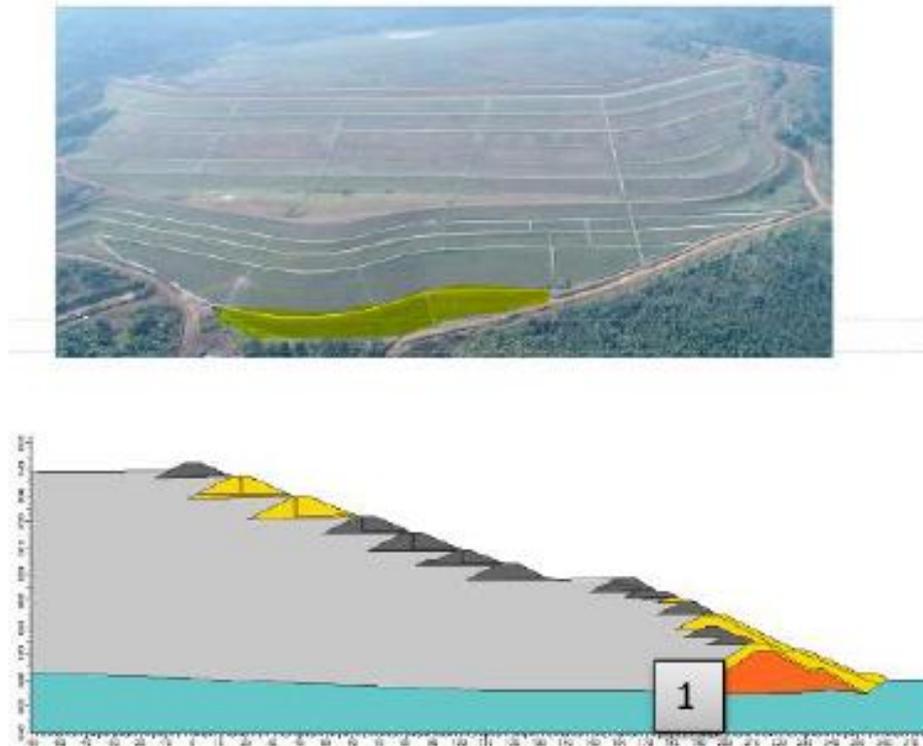
Fonte: Pirete (2010).

A estrutura foi dividida em três trechos operando alternadamente, onde cada trecho conta com quatro sistemas de barras aspersoras (*spray bars*), com objetivo de ter uma segregação hidráulica adequada, evitar a formação de desníveis significativos entre as partes adjacentes da praia de rejeitos. A operação alternada favorece o adensamento e, conseqüentemente, resulta em ganhos de resistência aos rejeitos sedimentados.

c) Etapa 01: Avaliação da operação com base na proposta apresentada.

Com base nas informações históricas sobre a Etapa 01 representada na Figura 35, fornecidas por Robertson *et al.* (2019), Pirete (2010) e Geoconsultoria (2006), aplicou-se a proposta para avaliação da operação do empreendimento por meio da Ficha Simplificada de Operação.

Figura 35 - Foto Ilustrativa da barragem com destaque para a Etapa 1.



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

Considerando as informações que contam em Pirete (2010), que menciona “a barragem foi operada sem diretriz referente a disposição de estéril, no período de 1976 até 2005. Sabe-se, que para que uma estrutura projetada, e

considerando vários alteamentos a montante, a segregação do rejeito e correta formação da praia são fatores primordiais para a estabilidade e segurança da barragem

Destaca-se assim, na Tabela 19, a avaliação realizada segundo essa proposta a partir das premissas conhecidas para disposição de rejeito, tem-se o indicativo de possível falha segregação material lançado.

Analisando a Tabela 19, outro ponto que chama a atenção é a falta de drenagem interna no projeto. Segundo os documentos consultados, a premissa de projeto é que o uso de laterita, a montante do talude, seria suficiente para manter a freática da barragem de modo a garantir uma operação segura. Faz-se necessária, porém, a avaliação do funcionamento dessa drenagem a partir da posição da freática com uso de instrumentação e avaliação contínua dela. A vazão também deveria ser monitorada pois, identificou-se que não foi realizado qualquer tipo de intervenção para evitar erosões durante a operação.

Com relação a avaliação realizada empregando essa proposta conclui-se para a Etapa 1, que a operação deveria classificá-la como uma situação de Alerta, o que destaca a importância da operação adequada desde o início da operação da barragem.

Logo, a avaliação da operação durante a Etapa 1, conforme se observa, de forma simples e rápida, indicaria que já seriam necessárias que fossem tomadas providencias para ajudar a operação a corrigir a disposição de rejeito, em especial com uma reavaliação geotécnica do projeto proposto, com destaque para a deficiência da drenagem interna a fim de procurar formas e mecanismos de se evitar problemas futuros.

Tabela 19 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação, Etapa 1.

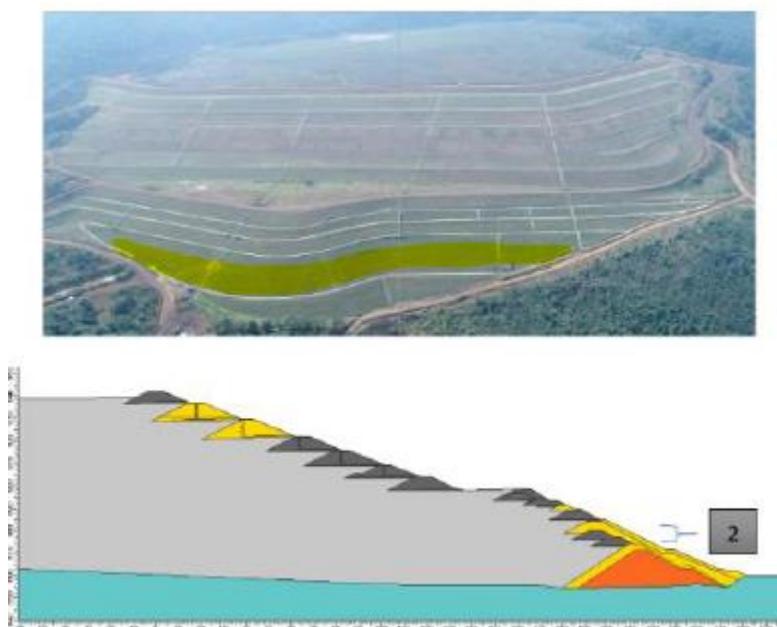
	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Historico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, instrumentação, detalhes	0	Normal	Não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, hidrogeologia.	0	Normal	Não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	Não	Cálculo do fator de segurança	0	Normal	Não
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento. Possibilidade de galgamento.	0	Normal	Não	Controle do fluxo de água dentro do reservatório	0	Normal	Não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago. Stop Log funciona conforme programado	0	Normal	Não	Controle do enchimento do reservatório	0	Normal	Não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	2	Alerta	sim	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	0	Normal	Não
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	2	Alerta	sim	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	Não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	2	Alerta	sim	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.			
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	2	Alerta	sim	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	2	Alerta	sim
Op. Alçamento	Alçamento	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	Normal	Não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.	2	Alerta	sim
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral (existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	0	Normal	Não	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	0	Normal	Não
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instalados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	2	Alerta	sim	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	0	Normal	Não

5.2.3 Avaliação de desempenho - Etapa 02

a) Contextualização da Etapa 02

Entre 1982 e 1990, foi construído o segundo alteamento. O projeto inicial previa alteamento de 15 m, da cota 874 a 889. Porém, com objetivo de aumentar o alteamento para 29 m, o projeto foi alterado, conforme representado na Figura 36. Para este estudo vai-se trabalhar com o projeto revisado.

Figura 36 - Foto Ilustrativa da barragem com destaque para a Etapa 2.



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

O projeto revisado teve 5 estágios, iniciando em 2 e finalizando em 6. Segundo Robertson *et al.* (2019), não foi encontrado nos relatórios sobre a Barragem I, documentação com registros específicos sobre os motivos que levaram a revisão do projeto. Porém, alguns fatos podem ser citados:

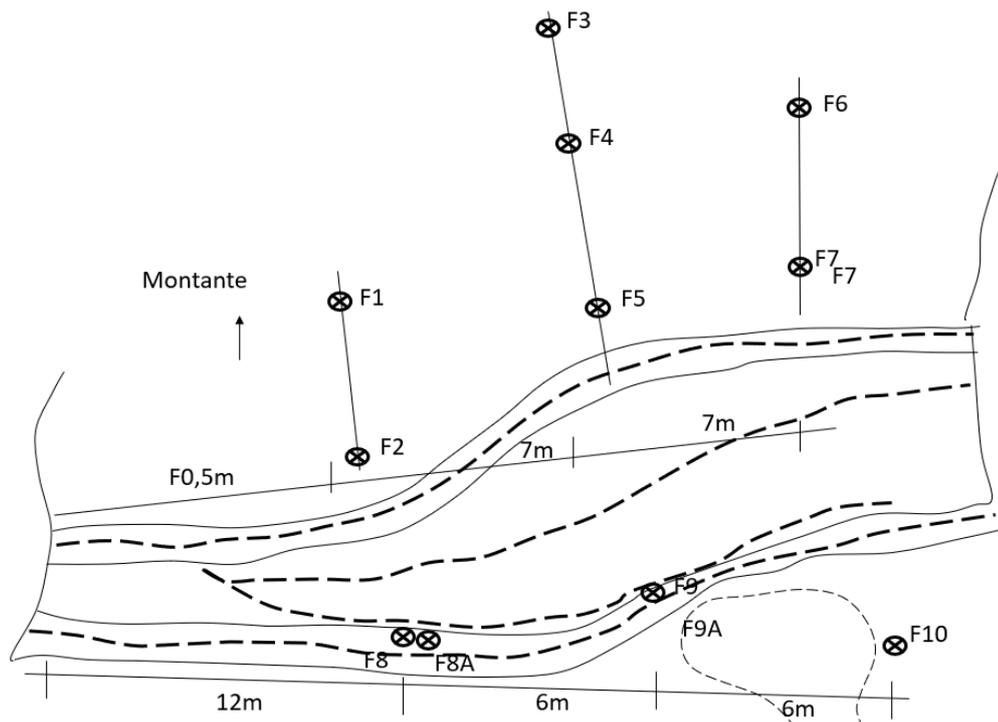
- Existência de percolação na base do estágio 2 após a construção do estágio 3, que foi relatado como concluído em 1983.
- A estabilidade da barragem foi considerada como um ponto de atenção antes de iniciar a construção do estágio 4. Existem documentos que indicam a necessidade de se “Verificar a Estabilidade”.

- Não existia documentos mencionando problemas de percolação no período entre 1980 até 1983.

b) Síntese das Investigações, Projeto, Construção, Geometria, Operação e Instrumentação para a Etapa 02

Robertson *et. al* (2019), no apêndice A, que é um material que completa o relatório, apresenta a investigação geotécnica. Ela foi realizada com 13 sondagens de simples reconhecimento com SPT e as amostradas coletadas foram enviadas para ensaios de laboratório. Na Figura 37 tem-se a localização dos ensaios realizados, onde pode-se observar que as sondagens F-1 a F-7 foram realizadas no rejeito.

Figura 37 - Investigação geotécnica por meio de ensaios SPT



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

O rejeito amostrado foi ensaiado em laboratório, por meio de amostras deformadas coletadas pelos SPTs, para identificar distribuição granulométrica, teor de umidade.

O projeto previa elevação do estágio para a cota 884 pelo método de linha de centro. Os demais estágios teriam altura de 5 m usando o método construtivo de montante e tapete drenante na base de cada estágio. A importância da praia foi discutida no projeto inicial, porém não no projeto revisado.

A geometria do estágio alteado por linha de centro estende a jusante de todos os estágios inferiores com cota de crista de 884. Os alteamentos seguintes foram realizados pelo método construtivo de montante, projetados com 5 m de altura, chegando à cota 909. A inclinação programada para o talude foi de 2H:1V. Um canal foi planejado entre as bermas para gerenciamento das águas superficiais.

O projeto revisado do segundo alteamento, prevê a instalação de um tapete drenante na base destes, incluindo um tubo longitudinal com objetivo de direcionar para as ombreiras as águas acumuladas no reservatório. Está explícito no relatório o objetivo de "...reduzir as pressões atuantes nos diques, elevando assim o fator de segurança contra a ruptura do mesmo...". Além disso, no projeto havia a construção de um vertedouro de concreto.

Análise da estabilidade geotécnica foi realizada e o fator de segurança encontrado foi de 1,44, valor que foi considerado adequado pelo projetista. Constatou-se que a operação do rejeito continuava sem diretriz para disposição, conforme citado anteriormente.

c) Avaliação com base na proposta apresentada

Após análise dos dados históricos apresentados, aplicou-se a ficha simplificada de operação para a Etapa 2, que se encontra na Tabela 20. Concluiu-se que a falta de diretriz para disposição do rejeito, influenciou diretamente na formação da praia. Como os alteamentos do estágio 3, Etapa 2, em diante foram construídos pelo método de montante, a correta disposição do rejeito para segregação e formações de praia são indispensáveis para a próxima fase. Assim, a estabilidade e segurança da estrutura podem ser fortemente impactadas pela falha na operação de disposição dos rejeitos. As informações que estão nessa planilha indicam uma classificação de alerta para a operação dos rejeitos e necessidade de intervenção.

Com relação ao projeto para a segunda etapa foi solicitado a construção de tapetes drenantes devido surgência de água existente entre os estágios 2 e 3, Etapa 2. A estabilidade do talude é uma preocupação, embora o projeto tenha chegado a um valor de fator de segurança igual 1,4, para esta etapa, como mostra a Tabela 20.

Tabela 20 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação, Etapa 2.

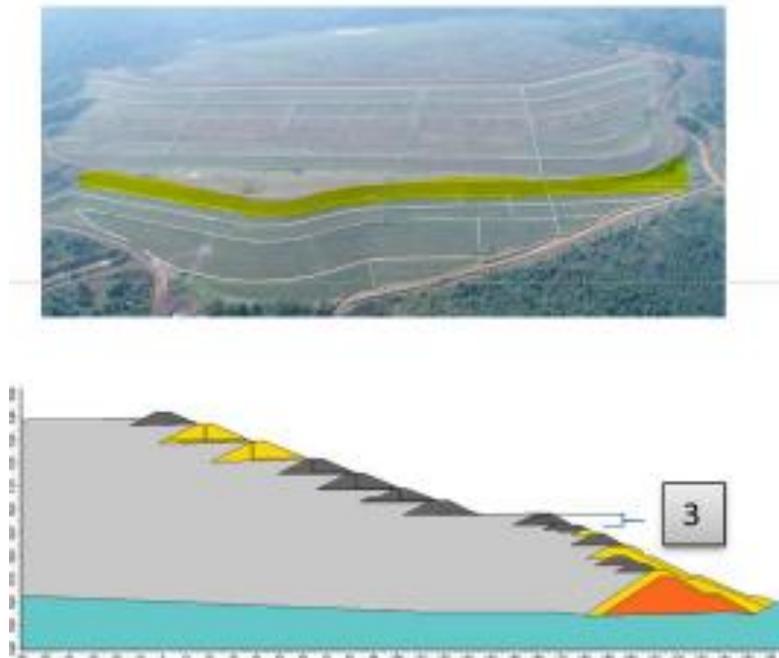
	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Historico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	Não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidrologia.	0	Normal	Não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	Não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança.	0	Normal	Não
Dados Projeto	Maciço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.	0	Normal	Não	Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.	0	Normal	Não
	Forma de controle de percolação	Drenagem Interna, controle da freatica.	0	Normal	Não	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotécnicas de fundação.	0	Normal	Não
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais do equipamentos, forma de disposição.	1	Atenção	Sim	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	Não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgencia de água, vegetação	2	Alerta	Sim	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	2	Alerta	Sim
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	0	Normal	Não	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	Não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	0	Normal	Não	Controle do enchimento do reservatório, regua.	0	Normal	Não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	2	Alerta	Sim	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	0	Normal	Não
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	Não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	Não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	2	Alerta	Não	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	0	Normal	Não
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	2	Alerta	Não	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	2	Alerta	Não
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	Normal	Não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.	0	Normal	Não
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	0	Normal	Não	Calculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	0	Normal	Não
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral (existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	2	Alerta	Sim	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	0	Normal	Não
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	0	Normal	Não	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	0	Normal	Não

5.2.4 Avaliação de desempenho - Etapa 03

a) Contextualização da Etapa 03

O terceiro alteamento, composto pelo estágio 7 e 8, elevou em 7,5 m a altura da barragem (Figura 38), onde a cota de piso era 891,5 e a cota de crista 889. O método construtivo foi o de alteamento a montante, e foi construído entre 1991 e 1993.

Figura 38 - Foto ilustrativa da barragem com destaque para a Etapa 3



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

b) Síntese das Investigações, Projeto, Construção, Geometria, Operação e Instrumentação para a Etapa 03

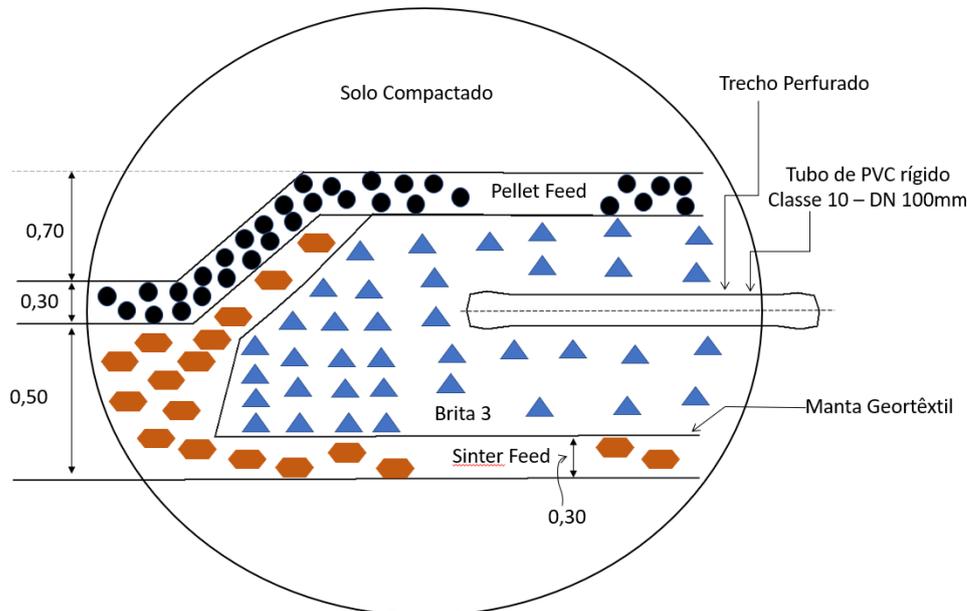
Segundo Robertson *et al.* (2019), a documentação para o terceiro alteamento indica execução de investigação por meio do SPT, cujo valores apontam resistência à penetração variável com profundidade, o que pode indicar presença de tipos de materiais diferentes ou níveis diferentes de compactação. Nas ombreiras esquerda e direita (por exemplo, ensaios SP-05 e SP-03), apenas rejeitos foram encontrados acima da profundidade do solo pré-construção. A

sondagem SP-04, que avançou pela crista da berma do sexto estágio, Etapa 2, (ou seja, a quinta berma do segundo alteamento) perto do centro da barragem, supostamente encontrou camadas de rejeitos e material de “aterro” utilizado para construir os estágios da berma subjacente. O relatório também indica que a sondagem encontrou camadas de material do tapete drenante (isto é, o “filtro de areia” e “filtro de minério fino”) e que a perda de água ocorreu na profundidade do tapete drenante durante a perfuração, sugerindo que os tapetes drenantes mostrados nos desenhos do projeto do segundo alteamento, Etapa 2, foram instalados. Nenhuma informação adicional está disponível sobre o material encontrado nas sondagens.”

Os desenhos do projeto, segundo Robertson *et al.* (2019), mostram que o estágio 7, Etapa 3, foi programado para sair da cota de piso 891,5 para a cota 895. No estágio 8, Etapa 3, ficou definido que se elevaria a crista da barragem para a cota 899 e melhoraria o projeto de desempenho do extravasor existente. Os taludes de jusante e montante foram projetados para inclinação de 2 H:1V. A parte externa foi projetada para ser construída com argila laterita.

Para o terceiro alteamento, Etapa 3, foi projetado uma drenagem interna que incluía camada drenante de 1,5 m de espessura na base dos estágios construídos usando uma camada de transição de "*pellet feed*" com base formada por um dreno de pé contínuo de cascalho de "*sinter feed*" envolto em um geotêxtil (“Bidim OP-20”) que descarregava a água diretamente no canal de drenagem no talude a jusante da barragem. O sistema de drenagem da camada drenante deveria ser direcionada do dreno de pé para o canal de descarga usando tubos rígidos de PVC de 100 mm de diâmetro, instalados a cada 50 m ao longo da praia (Figura 39). Os tubos de PVC foram projetados para serem perfurados ao longo da seção embutida na camada drenante (Robertson *et al.* 2019).

Figura 39 - Representação do sistema de drenagem para terceiro alteamento.



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

A análise de estabilidade foi realizada apenas no quarto alteamento, sendo que o valor do fator de segurança calculado foi de 1,33 para o estágio 7, Etapa 3. Esse fator de segurança passou a ser 1,23 para o estágio 8, Etapa 3. Ao final do terceiro alteamento, Etapa 3, a seguinte instrumentação foi instalada: marcos topográficos (MS-1 a MS-22); piezômetros nos solos de fundação, e drenos sub-horizontais.

O sistema de instrumentação foi projetado para monitorar as poropressões excessivas, o movimento da barragem e a eficiência da drenagem interna. A documentação do projeto menciona, em particular, que o objetivo dos piezômetros é "...acompanhar o desenvolvimento das pressões intersticiais e definir a superfície freática atual e sua evolução em função dos alteamentos futuros..." e que as drenagens sub-horizontais, "...em associação com os dados dos piezômetros adjacentes possibilitaria avaliar efetivamente o comportamento e o desempenho do sistema de drenagem interna da barragem (Robertson *et al.* 2019).

c) Avaliação com base na proposta apresentada

Após análise dos dados históricos apresentados, fez-se a aplicação da ficha simplificada de operação para a Etapa 3. Ao preenchê-la tem-se a pontuação igual a 1 para Operação das águas, pois uma melhoraria no vertedouro foi proposta e seguiu-se com pontuação igual a 2 para Operação do rejeito, que continuava sem diretriz para disposição.

Na Etapa 3 fica clara a preocupação com a instrumentação para monitorar o nível d'água freático. Pela rápida análise do resultado obtido pela aplicação dessa ficha, instrumento da proposta de avaliação da operação, seria necessário indicar uma intervenção na operação para corrigir a disposição dos rejeitos.

No tópico “dados dos projetos” identifica-se uma pontuação diferente de zero, evidenciando a preocupação com a drenagem para manter a linha freática satisfatória, como mostra a Tabela 21.

Tabela 21 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação, - Etapa 3

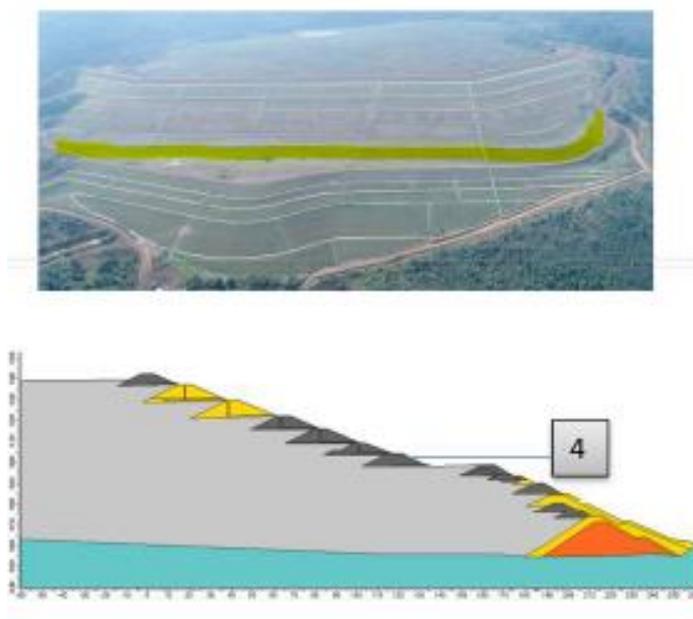
	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Histórico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	Não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidrologia.	0	Normal	Não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	Não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança.	0	Normal	Não
Dados Projeto	Maciço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.	0	Normal	Não	Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.	0	Normal	Não
	Forma de controle de percolação	Drenagem Interna, controle da freatica.	1	Atenção	Sim	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotécnicas de fundação.	0	Normal	Não
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais do equipamentos, forma de disposição.	1	Atenção	Sim	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	Não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgencia de água, vegetação	0	Normal	Não	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	1	Atenção	Sim
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trinças, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	1	Atenção	sim	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	Não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	0	Normal	Não	Controle do enchimento do reservatório, regua.	0	Normal	Não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	2	Alerta	Sim	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	1	Atenção	Sim
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	Não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	Não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	2	Alerta	sim	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	0	Normal	Não
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	2	Alerta	sim	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	2	Alerta	sim
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	Normal	Não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.	0	Normal	Não
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	0	Normal	Não	Calculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	0	Normal	Não
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral(existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	0	Normal	Não	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	0	Normal	Não
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	0	Normal	Não	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	1	Atenção	Sim

5.2.5 Avaliação de desempenho Etapa 04

a) Contextualização da Etapa 04

O quarto alteamento foi construído em 1995, sobre o terceiro alteamento, Etapa 3, conforme projeto original, e método construtivo utilizado foi de montante, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40 - Foto ilustrativa da barragem destaca quarto alteamento – Etapa 4.



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

b) Síntese das Investigações, Projeto, Construção, Geometria, Operação e Instrumentação para a Etapa 04.

O quarto alteamento, Etapa 4, foi construído em um único estágio, em 1995. Esse alteamento sofreu um desvio do projeto original, ao ser realizado um recuo de 4 m a montante da barragem, após o terceiro alteamento.

O sistema de drenagem interna previa um filtro horizontal e tubo de PVC de 150mm de diâmetro, envolto em hematita no pé a jusante, responsável por desviar a água para um canal periférico.

O relatório que descreve o projeto do quarto alteamento indica leitura de nível d'água e piezômetro realizados entre 20 junho 1994 e 6 junho 1995. A seguir

tem-se alguns comentários sobre os resultados obtidos no relatório, feitos por Robertson *et al.* (2019).

- As leituras de nível d'água nos piezômetros mostram condições bastante desfavoráveis, que não são recomendáveis para a segurança da barragem;
- Observa-se a ocorrência de percolação (surgência) d'água em alguns pontos do maciço da barragem.

O relatório sugeriu que o projeto fosse revisado para solucionar essas questões e que dessem continuidade ao monitoramento piezométrico para avaliar as condições da água na barragem. Sobre isto, Robertson *et al.* (2019) destacaram que:

“Os fatores apontados quanto a segurança, sugerem providências urgentes objetivando identificar as causas e definir soluções adequadas para sanar os problemas.”

“Recomenda-se continuar o monitoramento do caminho preferencial (percolação) da água através do maciço da barragem, com auxílio dos piezômetros existentes e dos programados para serem instalados.”

O cálculo do fator de segurança para avaliar a estabilidade do terceiro alteamento foi realizado usando o método de Bishop-modificado e Fellenius, resultando em um valor de fator de segurança $FS=1,1$. O documento que apresenta o projeto do quarto alteamento levou Robertson *et al.* (2019) a concluir que os fatores de segurança estão abaixo dos valores que poderiam ser considerados como ideais, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultado da verificação da estabilidade para o quarto alteamento.

Cota Crista da Barragem (m)	Cota de Rejeito (m)	Nível d'Água no reservatório (m)	FS-Bishop Modificado	FS-Fellenius	Condições	Data dos Estudos
899	898	898	1,13	1,07	Após a construção da segunda Fase -Terceiro alteamento e Lance de Rejeitos	jun./95
905 Cota média (eixo deslocado)	903	903	1.13	1.10	Após a construção do quarto alteamento e lance de rejeitos.	jun./95
945 cotas média (eixo deslocado)	943	943	1.33	1.22	Barragem Construída	jun./95

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

c) Avaliação com base na proposta apresentada

Com base nas informações históricas disponíveis aplicou-se a proposta respondendo os quesitos da ficha simplificada de operação para Etapa 4, conforme apresentado na Tabela 23. Analisando os resultados para a Etapa 4, observa-se na Tabela 22, que pela primeira vez tem-se a valores de fator de segurança abaixo do aceitável. Este fato é um indicativo de problemas devido a disposição de rejeito das etapas anteriores e que refletiu na etapa atual, já indicados por meio de aplicação da ficha de avaliação em outras Etapa e confirmado na Etapa 4, Tabela 23, pois chegou-se a um valor de fator de segurança igual a 1,1 para o terceiro alteamento.

Pode-se considerar que a aplicação dessa proposta possibilitaria sinalizar já nas etapas anteriores os problemas que caso fossem corrigidos na época, poderiam levar a uma condição de análise de estabilidade mais favorável para a estrutura.

A surgência de água nos pontos baixo da Barragem I, pode indicar problemas com a construção dos filtros, ou erro no dimensionamento deles. Essa proposta de avaliação da operação permite que o pessoal responsável, possa informar os problemas observados aos responsáveis pela estrutura para intervenção e melhor controle da estabilidade tão logo eles ocorram.

Tabela 23 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação – Etapa 4

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Histórico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	Não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidologia.	0	Normal	Não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	Não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança.	0	Normal	Não
Dados Projeto	Maciço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.	2	Atenção	Sim	Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.	2	Alerta	Sim
	Forma de controle de percolação	Drenagem Interna, controle da freatica.	2	Alerta	Sim	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotécnicas de fundação.	0	Normal	Não
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais do equipamentos, forma de disposição.	1	Atenção	Sim	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	Não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgencia de água, vegetação	2	Alerta	Sim	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	3	Emergencia	Sim
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	0	Normal	Não	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	Não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	0	Normal	Não	Controle do enchimento do reservatório, regua.	0	Normal	Não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	2	Alerta	Sim	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	1	Atenção	Sim
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	Não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	Não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	2	Alerta	sim	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	2	Alerta	Sim
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	2	Alerta	sim	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	2	Alerta	sim
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	2	Alerta	Sim	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.	2	Alerta	Sim
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	1	Atenção	Sim	Calculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	3	Emergencia	Sim
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral(existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	2	Alerta	Sim	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	2	Alerta	Sim
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	2	Alerta	sim	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	2	Alerta	Sim

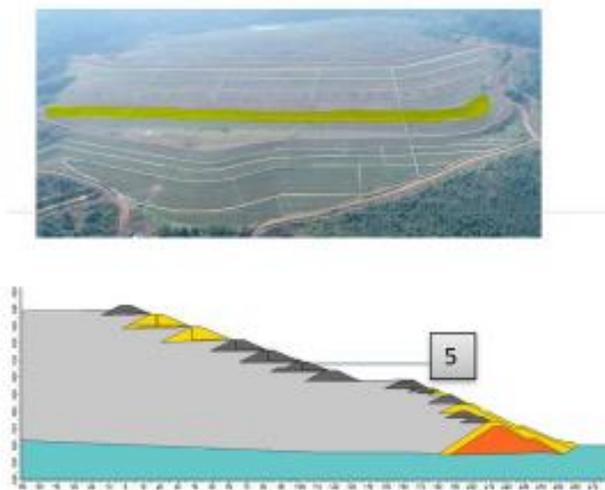
A necessidade do recuo do talude indica uma possível falha no projeto com relação ao ângulo de talude usado no mesmo. O recuo realizado no sentido da praia levou o maciço a ser apoiado no rejeito depositado, que não era homogêneo, conforme destacou Robertson *et.al* (2019).

5.2.6 Avaliação de desempenho Etapa 05

a) Contextualização da Etapa 05

Conforme anteriormente informado, na Etapa 05, vai-se estudar em conjunto os alteamentos 5, 6 e 7, seguindo a divisão proposta neste trabalho. Estes alteamentos ocorreram entre 1998 e 2003, quando ainda não se tinha uma diretriz para disposição de rejeito (Figura 41).

Figura 41 - Foto ilustrativa da barragem destaca quinto alteamento—Etapa 5.



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

b) Síntese das Investigações, Projeto, Construção, Geometria, Operação e Instrumentação para a Etapa 05.

O quinto alteamento também empregou o método construtivo de montante para elevar em 5 m a altura da Barragem I. Documentos históricos apresentados por Robertson *et al.* (2019) indicam que as investigações geotécnicas foram realizadas entre 1995 e 1997. O relatório descreve as variações na fundação,

com condições de baixa resistência próximo a ombreira direita e condições melhores próximo da ombreira esquerda. Nele está descrito que:

“No trecho entre a ombreira direita, o maciço está apoiado sobre resíduo fofo, saturado ou com elevado grau de saturação. Neste trecho está prevista a implantação de aterro inicial atingindo 2,0 m de altura executado de forma lenta e cuidadosa, com a utilização de equipamentos leves de transporte e espalhamento, sem vibração excessiva”.

O relatório também indica que no restante da fundação do quinto alteamento o seguinte:

“...a praia de rejeitos existente apresenta-se em condições mais favoráveis, podendo o aterro compactado ser implantado a partir da camada de regularização.”

Isto sugere que a superfície dos rejeitos perto da ombreira direita não apresentava uma praia adequadamente formada.

O quinto alteamento foi projetado para ir até a cota 911 próximo a ombreira esquerda, e cota 909 na ombreira direita. Os taludes de jusante e montante foram projetados para serem construídos com 2H:1V e 2,5H:1,0V, respectivamente. Pela primeira vez tem-se o desenho do projeto com drenagem interna em L, considerando a construção de filtro vertical e horizontal.

Com relação a estabilidade, pela primeira vez foi indicado que havia a possibilidade de ocorrência de liquefação. Dados piezométricos indicavam níveis elevados de água dentro da barragem, e a linha piezométrica foi descrita como desfavorável.

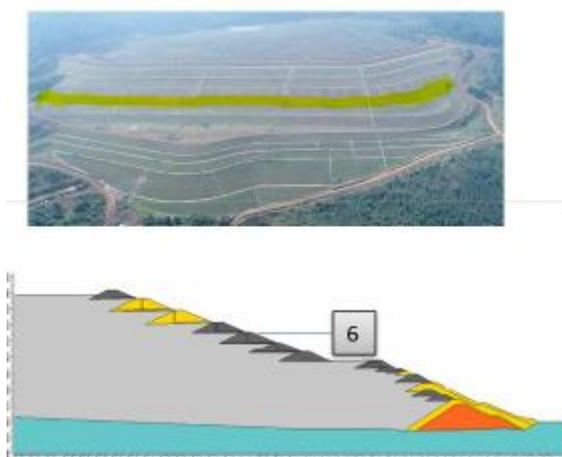
Segundo relatórios históricos, que embasaram o trabalho de Robertson *et al.* (2019), o projeto do quinto alteamento identificou níveis piezométricos específicos que correspondiam a um FS calculado do talude de 1,30 (denominados como níveis de “atenção”) e níveis piezométricos mais altos que correspondiam a um FS = 1,15 para esse mesmo talude (denominados como níveis de “alerta”). O plano também menciona que novos piezômetros seriam adicionados e descreve a importância de manter e monitorá-los para verificar a estabilidade da barragem e compreender o movimento da água em toda ela.

Fica claro que as complicações e os desvios que ocorreram até aquele momento, resultaram em uma área de aproximadamente 210 m da ombreira direita construída de forma lenta, devido as condições do rejeito saturado, fofo e com baixa compactação.

Quando se observa a avaliação da operação por meio da ficha simplificada empregada para as etapas anteriores ao quinto alteamento, Etapa 5, identifica-se claramente que este tipo de problema foi previsto durante essa atividade, tendo sido comentado e indicado a necessidade de intervenção na forma de operar a disposição de rejeito na barragem.

Passa-se agora para uma breve discussão sobre o sexto alteamento que ocorreu na etapa 5, conforme divisão deste trabalho, alteamento realizado em 2000, o qual é ilustrado na Figura 42.

Figura 42 - Foto ilustrativa da barragem destaca sexto alteamento – Etapa 5



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

O sexto alteamento, Etapa 5, foi projetado para atingir a conta 916,5, ou seja, elevar em 6,5 m a altura da Barragem I. O projeto de drenagem interna e inclinação dos taludes seguiram as mesmas especificações definidas para o quinto alteamento, Etapa 5.

Investigação geotécnica e ensaios de laboratório foram realizados, segundo o que se observa nos relatórios históricos consultados. As análises de estabilidade para o sexto alteamento, Etapa 5, incluíram cálculos do fator de segurança para o quinto alteamento, Etapa 5, e resultaram em valores de fatores de segurança (FS) iguais a 1,46 e 1,26 para superfícies piezométricas normais e elevadas,

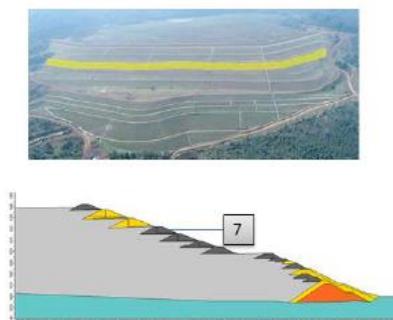
respectivamente. Os fatores de segurança para o quinto alteamento, Etapa 5, assumindo que o sexto alteamento, Etapa 5, fora construído e estava concluído, foram calculados como sendo 1,38 e 1,27 para superfícies piezométricas normais e elevadas, respectivamente. Os fatores de segurança (FS) do sexto alteamento, Etapa 5, foram calculados como 1,46 e 1,39 para superfícies piezométricas normais e elevadas, respectivamente. A estabilidade da barragem para a sua altura (cota 945) também foi estimada para as diversas condições, com um FS calculado de 1,46 para condições favoráveis do lençol freático e 1,39 para condições desfavoráveis do lençol freático.

Condições piezométricas elevadas foram identificadas nas análises de estabilidade que usaram hipóteses dos níveis piezométricos, resistências ao cisalhamento não drenado dos materiais de rejeitos e bermas e natureza e extensão da praia. O documento apresentado por Robertson *et al.* (2019) reconhece o valor de FS inferior ao necessário ($FS \geq 1,5$) e informa a possibilidade se ter atingido um FS superior através condições piezométricas mais baixas.

A instalação de dez piezômetros foi solicitada para prosseguir com o sexto alteamento, Etapa 5, assim como o monitoramento dos equipamentos e poços existentes.

Finaliza-se então a quinta etapa com o sétimo alteamento. Ele foi realizado entre 2022 e 2023, com elevação de cota programada para 921,5 para a ombreira direita e cota 923.5 para ombreira esquerda. O projeto previa elevar em 6 m a altura da barragem (Figura 43).

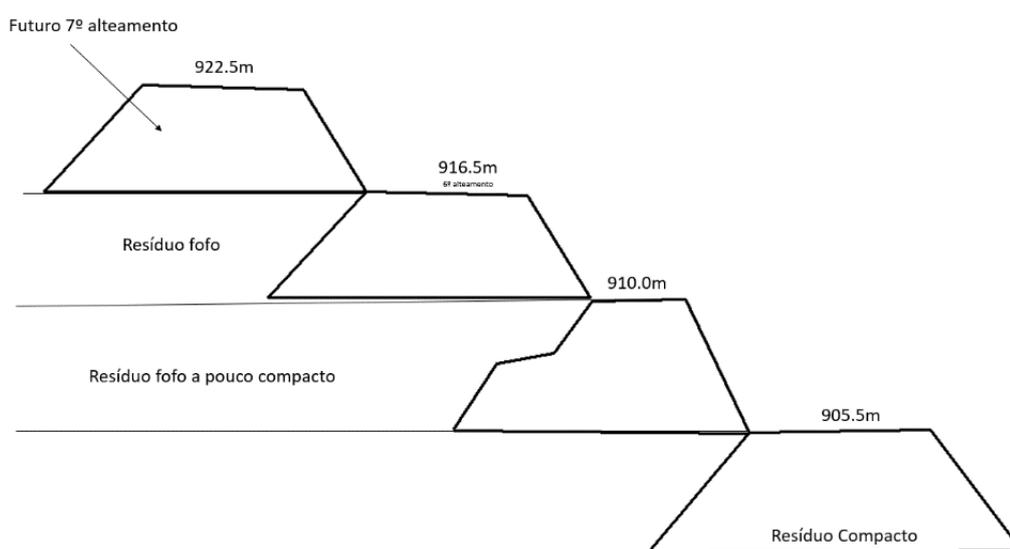
Figura 43 - Foto ilustrativa da barragem destaca sétimo alteamento – Etapa 5



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

Segundo Robertson *et al.* (2019), a análise de estabilidade para o sétimo alteamento, Etapa 5, indica condições mais críticas quanto a estabilidade na ombreira direita, causada pela saturação dos rejeitos e baixa compactação (Figura 44). Nos documentos históricos consultados por esses autores os rejeitos perto da ombreira esquerda foram caracterizados com potencial para liquefação, devido ao estado fofo e saturado, para solicitação dinâmica. A drenagem interna projetada era igual à do sexto e quinto alteamento, Etapa 5.

Figura 44 - Representação da seção transversal típica do sétimo alteamento.



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

Conforme descrito por Robertson *et al.* (2019), o fator de segurança foi calculado pelo Método de Spencer por meio do software UTEXAS3, chegando a um valor de $FS=1,57$ para condições normais piezométricas, e de $FS=1,18$ para condições piezométricas menos favoráveis.

Logo, foi elaborado um plano de monitoramento piezométrico para o projeto do sétimo alteamento, a fim de estabelecer níveis de água que acionariam um plano de ação, para valores de FS entre 1,3 e 1,15 quanto a estabilidade do talude. Assim, a construção do sétimo alteamento, Etapa 5, deveria ser realizada de maneira lenta e cuidadosa para evitar aumento de poropressão.

c) Avaliação com base na proposta apresentada

Com base no estudo histórico realizado por Robertson et al. (2019) e Pirete (2010), aplicou-se a proposta de avaliação de operação por meio da ficha simplificada para a quinta etapa, Tabela 24.

Os resultados obtidos para essa etapa apontam desvios que podem comprometer a estrutura da barragem nos tópicos “Dados do Projeto” e “Operação do Rejeito”, “Operação de Alçamento” e “Monitoramento Operacional”. Os pontos identificados comprometem a estabilidade e segurança da Barragem I, com relação aos alçamentos futuros previstos e são resultados de problemas operacionais, de projeto e gerenciamento.

A aplicação dessa proposta de avaliação mostrou a necessidade de intervenção geotécnica no tópico “Operação dos Rejeitos” desde o início do preenchimento da estrutura. Agora, na quinta etapa, com valores de FS tão baixos e a necessidade de monitoramento constante do nível de água, conclui-se que as indicações presentes na ficha de avaliação estavam corretas e poderiam ter minimizado ou até evitado os problemas existentes, se fosse aplicada e atendida.

Nos dados históricos a preocupação com a liquefação nesta etapa estava presente, sendo comentada em alguns relatórios da época. Destaca-se que a instrumentação se torna cada vez mais importante para a operação e segurança da estrutura.

Com relação ao projeto, apenas na quinta etapa a drenagem interna da barragem é projetada em L, ou seja, só agora se considerou a instalação de drenos vertical e horizontal. O projeto e implantação da drenagem interna tem por objetivo baixar a linha freática do maciço que se manteve alta durante toda a operação.

Tabela 24 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação – Etapa 5.

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Historico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	Não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidologia.	0	Normal	Não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	Não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança.	0	Normal	Não
Dados Projeto	Maciço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.	0	Normal	Não	Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.	0	Normal	Não
	Forma de controle de percolação	Drenagem Interna, controle da freatica.	0	Normal	Não	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotecnicas de fundação.	2	Alerta	Sim
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais do equipamentos, forma de disposição.	2	Atenção	Sim	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	Não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgencia de água, vegetação	0	Normal	Não	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	3	Emergencia	Sim
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	0	Normal	Não	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	Não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	0	Normal	Não	Controle do enchimento do reservatório, regua.	0	Normal	Não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	2	Alerta	Sim	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	2	Atenção	Sim
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	Não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.		Normal	Não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	2	Alerta	Sim	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	2	Alerta	Sim
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	2	Alerta	Sim	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	2	Alerta	Sim
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotecnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	Normal	não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.	2	Alerta	Sim
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	0	Normal	Não	Cálculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	3	Emergencia	Sim
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral (existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	0	Normal	Não	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	2	Alerta	Sim
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	0	Normal	Não	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	2	Alerta	Sim

5.2.7 Avaliação de desempenho Etapa 06

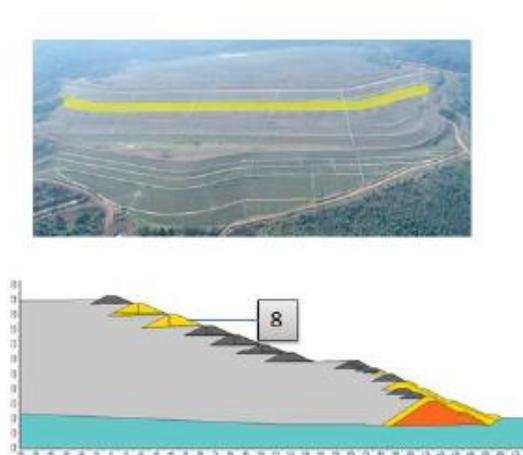
a) Contextualização da Etapa 06

A sexta etapa é a última e composta pelos alteamentos 8, 9 e 10 realizados entre 2004 e 2013. Todas as informações apresentadas a seguir foram obtidas de Pirete (2010) e de Robertson *et al.* (2019).

b) Síntese das Investigações, Projeto, Construção, Geometria, Operação e Instrumentação para a Etapa 06.

Inicia-se a sexta etapa com as informações disponíveis sobre o oitavo alteamento, que teve início em 2004, com objetivo de elevar a Barragem I para a cota 929,5, ou seja, aumenta a altura da estrutura em 7 m, com a localização indicada na Figura 45.

Figura 45–Foto ilustrativa da barragem com destaca oitavo alteamento – Etapa 6



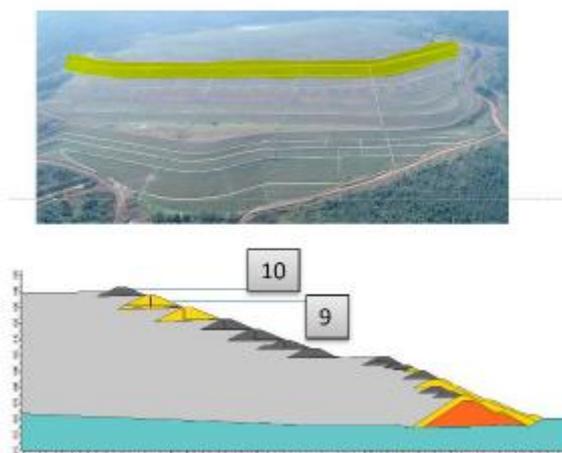
Fonte: Robertson *et al.* (2019).

Foram consideradas as investigações geotécnicas anteriores bem como realizadas investigações adicionais. Com as informações das investigações adicionais realizadas na praia, foi possível definir a estratigrafia de subsuperfície com a seguinte composição.

- Rejeitos lançados, classificados como areia siltosa e siltes arenosos geralmente presentes em camadas alternadas de baixa e alta resistência, provavelmente resultantes dos procedimentos de depósito dos rejeitos. Observou-se que a resistência dos rejeitos, avaliada a partir dos resultados as sondagens de simples reconhecimento com SPT, geralmente não aumentava com a profundidade.
- Solos compactados de alteamentos anteriores.
- Solos de fundação, geralmente descritos como depósitos fluviais ou residuais de argila siltosa, silte argiloso, silte arenoso e areia siltosa.
- No projeto a drenagem interna e declividade dos taludes, seguiram o mesmo padrão da quinta etapa. O resultado das análises de estabilidade para o oitavo alteamento, Etapa 6, não foi encontrado na literatura.

A construção e operação da Barragem I é finalizada na Etapa 6 com o nono e décimo alteamento que ocorreram entre 2008 e 2013 (Figura 46). As cotas finais de cada alteamento foram 937 e 942, aumentando a altura da estrutura em 7 m e 5 m. O nono e o décimo alteamentos serão avaliados em conjunto, devido à sua semelhança e momento do avanço das investigações, análises e documentos desse projeto.

Figura 46 - Foto ilustrativa destaca nono e décimo alteamento – Etapa 6



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

Entre os anos de 2005 a 2006 aconteceu a investigação geotécnica para o nono e décimo alteamentos. Esta investigação foi composta por:

- Ensaios de densidade in situ dos rejeitos;
- Ensaios de piezocone com dissipação da poropressão (CPTu) e ensaios de palheta;
- Sondagens SPT na praia e na crista da barragem, incluindo a coleta de amostras indeformadas com tubos Shelby e Osterberg;
- Sondagens a trado na Barragem I e áreas de empréstimo;
- Coleta de amostras por meio de blocos indeformados e intactos na área da praia de rejeitos;
- Instalação de dois inclinômetros;
- Instalação de medidor de nível de água e piezômetros na praia da Barragem I.

Os resultados da investigação de campo estão disponíveis no Apêndice B do relatório de Robertson *et al.* (2019). Os ensaios realizados durante a investigação incluíram distribuição granulométrica, limites de Atterberg, permeabilidade, Proctor Normal, compressão triaxial, teor de umidade natural, densidade, densidade relativa e adensamento.

Os ensaios forneceram informações importantes sobre a natureza e a variabilidade dos rejeitos que foram depositados antes do projeto do nono alteamento. As informações são sintetizadas a seguir:

- Os ensaios de piezocone (CPTu) indicaram a presença de camadas onde o comportamento não drenado provavelmente controla a resistência ao cisalhamento. O relatório de Robertson *et al.* (2019) concluiu que essas camadas eram poucas e de extensão limitada, ou seja, abaixo do quarto alteamento e alguns metros abaixo do nível de rejeitos no momento do projeto, que teria sido aproximadamente na cota 928.
- Em alguns locais, foram identificadas condições de alta carga piezométrica em profundidades superiores a 25 m abaixo da superfície, por meio de resultados de ensaios CPTu. A causa dessas condições era desconhecida, mas foi interpretada pelo projetista como sendo devido a

uma camada de material mais grosso subjacente a rejeitos finos, o que resulta em uma condição de confinamento no fundo do vale.

- Os rejeitos foram lançados hidráulicamente na praia ou submersos no represamento, resultando em camadas de diferentes densidades e resistências.
- Os alteamentos foram construídos usando rejeitos compactados, com os três primeiros alteamentos cobertos com argila, conforme apresentado anteriormente.
- O processo de sedimentação que se esperava na área da praia, (isto é, produzir segregação dos materiais com materiais mais grossos perto da barragem e materiais mais finos mais longe da barragem) não estava ocorrendo, particularmente na ombreira direita da barragem.
- A densidade geralmente diminui e o conteúdo de finos aumenta à medida que a distância da praia aumenta.
- O projeto do nono e décimo alteamentos foi feito pelo método construtivo a montante com uso do rejeito. Na época havia incerteza quanto aos materiais usados nos primeiros alteamentos e preocupação com relação a estabilidade devido os níveis d'água observados em alguns piezômetros, que foram interpretados como artesianos. A inclinação do talude e drenagem interna são semelhantes à da quinta etapa.

Foram observadas percolações e condições de superfície freática elevada nos documentos do projeto na Etapa 6, para o nono e décimos alteamentos. Os documentos indicam que era sabido que os níveis d'água na Barragem I flutuavam e que estudos anteriores subestimaram as condições freáticas dessa barragem. O documento que contém o projeto também indica que foram observadas percolações ao longo do talude a jusante, próximo do pé do quarto alteamento, aproximadamente na época em que este projeto estava sendo desenvolvido, e que os níveis d'água medidos na barragem e o tamanho da praia de rejeitos sugerem que a água só deveria ser visível nas estruturas de drenagem do quarto alteamento (Robertson *et al.* 2019).

c) Avaliação com base na proposta apresentada

Com base nas informações históricas apresentadas fez-se a aplicação da proposta a fim de avaliar a operação aplicando-se a ficha simplificada de operação (Tabela 25).

Quando se aplica a proposta de avaliação da operação por meio da ficha simplificada para a sexta etapa, observa-se a correção na forma de dispor o rejeito, conforme mencionado por Pirete (2010). Porém, como nas etapas anteriores houve problemas com a segregação do rejeito causada pela forma de disposição, ainda se tem nessa etapa pontuação diferente de zero no tópico, “Operação do Rejeito”, pois a avaliação das amostras do rejeito tem como resultado a formação da praia com um rejeito fofo e saturado.

O tópico “Operação do Alçamento” também apresenta pontuação diferente de zero, para os dados qualitativos, quanto ao comportamento geotécnico, grau de compactação e drenagem interna.

A “Operação de Monitoramento” apresentou uma pontuação de “Atenção”, pois foi constatada surgência de água em alguns pontos do talude em etapas anteriores durante a construção dos alçamentos da Etapa 6. A linha freática foi um ponto de atenção durante esta etapa.

Tabela 25 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação – Etapa 6.

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Histórico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	Não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidrologia.	0	Normal	Não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	Não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança.	0	Normal	Não
Dados Projeto	Maçio da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.		Normal	Não	Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.		Normal	Não
	Forma de controle de percolação	Drenagem Interna, controle da freatica.	0	Normal	Não	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotecnicas de fundação.	0	Normal	Não
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais do equipamentos, forma de disposição.	0	Normal	Não	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	Não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgencia de água, vegetação	2	Alerta	Sim	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	0	Normal	Não
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	0	Normal	Não	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	Não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	0	Normal	Não	Controle do enchimento do reservatório, regua.	0	Normal	Não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	0	Normal	Não	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	0	Normal	Não
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	Não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	Não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	0	Normal	Não	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	2	Alerta	Sim
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	0	Normal	Não	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	0	Normal	Não
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotecnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	Normal	não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.	2	Alerta	Sim
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	0	Normal	Não	Calculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	0	Normal	Não
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral (existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	2	Alerta	Sim	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	2	Alerta	Sim
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instalados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	0	Normal	Não	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	2	Alerta	Sim

5.2.8 Considerações sobre o fenômeno de liquefação para a Barragem I

De maneira geral, a liquefação pode ser entendida como sendo o fenômeno da perda da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões, sob solicitações não drenadas (Fernandes,2020). A liquefação pode ocorrer em solos finos, saturados, com baixa coesão, com disposição para contração sob solicitação de cisalhamento.

Robertson *et al.* (2019), constatam que o colapso da Barragem I, ocorreu devido ao histórico de eventos e anomalias como seguem:

- Talude íngreme construído a montante, resultado do projeto.
- Falta de controle na disposição do rejeito, que permitiu que a água depositada no reservatório chegasse próximo a crista, resultando na disposição de rejeitos de baixa resistência na crista.
- No quarto alteamento, o recuo de projeto, resultou na construção de parte do talude superior construído sobre rejeitos de baixa resistência e finos.
- Inexistência de drenagem interna relevante, que resultou em um nível da linha freática elevado no interior da barragem, principalmente no pé da estrutura.
- Rejeitos com teor de ferro elevado, resultando cimentação entre as partículas e excesso de peso. A cimentação originou rejeitos rígidos de comportamento potencialmente frágil quando submetidos a um gatilho que levasse a uma resposta não drenada.
- Precipitação regional alta e intensa na estação chuvosa, o que pode ter levado a uma pequena perda de resistência nos materiais não saturados, acima do nível da água.

Segundo Robertson et al. (2019):

“O histórico descrito acima gerou uma barragem composta principalmente por rejeitos fofos, saturados, pesados, e de comportamento frágil, com altas tensões de cisalhamento no talude a jusante, resultando em uma barragem marginalmente estável (próximo ao rompimento em condições não drenadas). Ensaios de laboratório mostraram que a quantidade de deformação específica necessária para desencadear a perda de resistência poderia ser muito pequena, especialmente nos rejeitos

mais fracos. Estes foram os principais componentes que tornaram possível ocorrer a liquefação estática.”

Pirete (2010), realizou uma análise da susceptibilidade ou potencial do solo à liquefação, para a Barragem I. A primeira etapa consistiu na verificação do comportamento dilatante ou contrátil dos rejeitos sob cisalhamento, mediante a correlação entre tensões verticais efetivas in situ e resistências à penetração normalizadas, com base na aplicação das envoltórias propostas por Fear e Robertson (1995). Constatou-se que os materiais ensaiados por meio de ensaios SPT e CPT tendem a exibir comportamento contrátil durante cisalhamento e, conseqüentemente, susceptibilidade ou potencial ao fluxo por liquefação destes materiais.

5.2.9 Considerações finais sobre avaliação da Barragem I de Brumadinho

Deve-se destacar que a proposta sugerida e aplicada não tem a pretensão de substituir uma análise de risco completa. O objetivo é avaliar de forma simples e rápida, através de uma escala de pontuação, seguindo uma abordagem racional de operação, se é necessário a intervenção de geotécnico e do projetista durante essa operação, para evitar problemas de estabilidade e segurança futuros, bem como avaliar se a operação da estrutura está ocorrendo em conformidade com as boas práticas de operação.

Quando se aplicou a proposta, para a primeira e segunda etapa da barragem que emprega uma ficha de avaliação simplificada, já foi possível identificar problemas operacionais, causados pela falta de diretrizes para a operação de disposição de rejeito. Esta falta de diretriz levou a problemas nas próximas etapas de construção da barragem. Assim, se alguma ação de correção tivesse ocorrido tão logo ela fosse identificada poder-se-ia reduzir ou até mesmo evitar a catástrofe. Ficou claro em Pirete (2010), que a falta de diretriz para disposição do rejeito foi mantida até o oitavo alteamento.

Quando se aplicou esta proposta, para a Etapa 3, verificou-se a preocupação com a linha freática elevada pela falta de drenagem existente no projeto.

Evidenciando a necessidade de intervenção neste tópico, logo após preenchimento da ficha e sua interpretação.

Analisando o resultado da aplicação dessa proposta para a Etapa 4, conforme se observa na Tabela 23, que pela primeira vez identificam-se problemas, com relação a estabilidade a partir dos valores do fator de segurança, devido aos problemas causados pela disposição de rejeito nas etapas anteriores e presentes também na Etapa 4. Isto resultou num valor de fator de segurança igual a 1,1 para o terceiro alteamento. Conclui-se então que essa abordagem de avaliação sinalizou nas etapas anteriores problemas que se tivessem sido corrigidos na época, poderiam evitar um resultado desfavorável quanto a estabilidade dessa estrutura.

Ainda na Etapa 4, a surgência de água nos pontos baixo da Barragem I, podem indicar problemas com a construção dos filtros, erro do projeto quando do dimensionamento deles. Assim, a proposta sugerida permite que o pessoal da operação possa informar as não conformidades observadas aos responsáveis pela estrutura para intervenção e melhor controle da estabilidade.

A proposta empregada mostrou a necessidade de intervenção geotécnica no tópico “Operação dos Rejeitos” desde o início da avaliação da operação da estrutura. Quando aplicada na quinta etapa, a possibilidade de liquefação é destacada com os valores de FS tão baixo e a necessidade de monitoramento constante do nível de água. Conclui-se que as indicações da proposta sugerida são corretas e poderiam ter minimizado ou até evitado estes problemas.

Quando se aplica esta proposta para avaliação da Etapa 6, observa-se a necessidade de correção na forma de dispor o rejeito, conforme destacado por Pirete (2010). Porém, como nas etapas anteriores, houve problemas com a segregação do rejeito causada pela forma de disposição. Tem-se ainda a pontuação diferente de zero no tópico “Operação do Rejeito”, pois as análises das amostras do rejeito indicam que a praia de rejeito é composta por um material fofo e saturado.

Assim, a proposta apresentada e testada nesse estudo de caso para avaliar o desempenho da Barragem I, sinalizou desde seu início, problemas de operação, projeto e gestão, que poderiam ter sido reduzidos ou até mesmo evitados se uma

intervenção adequada tivesse sido feita naquela época. Logo, considera-se que essa proposta atingiu os objetivos previamente definidos, uma vez que além de identificar os problemas com a operação da barragem, foi capaz de indicar anomalias no projeto, na construção, na instrumentação e na gestão. Vale lembrar que, nessa proposta, sempre que a pontuação obtida por meio do uso da ficha simplificada for diferente de zero, é necessário a intervenção de equipe técnica para análise da anomalia, o que possibilita que se procure e implante ações com vistas a correção da estrutura, a fim de minimizar possíveis problemas futuros e manter a equipe operacional informada e treinada na operação dessa estrutura.

5.3 Barragem de São Francisco

5.3.1 Considerações iniciais

Avila *et al.* (2007) apresenta detalhes do projeto, construção e operação de algumas barragens brasileiras, dentre elas a de São Francisco. Rocha (2015) realizou um trabalho de retroanálise para esta barragem (Figura 47) fazendo o uso destes dados históricos. Todas estas informações serão utilizadas com o objetivo de aplicar a proposta para avaliação da operação de barragens.

Figura 47 – Vista da Barragem de São Francisco, destaca a barragem principal



Fonte: Rocha (2015).

5.3.2 Avaliação de Desempenho

a) Contextualização da Barragem de São Francisco

A Barragem de São Francisco, localizada no município de Mirai, MG, é de propriedade da CBA - Companhia Brasileira de Alumínio/Votorantim Metais, projetada pela PCE Engenharia Ltda., no ano de 2004. Teve sua construção iniciada em 2005 e entrou em operação no segundo semestre de 2008. A estrutura foi construída pelo método a jusante, para armazenamento de rejeito e recirculação de água para o processo (Figura 48).

Figura 48 - Vista aérea da Barragem de São Francisco



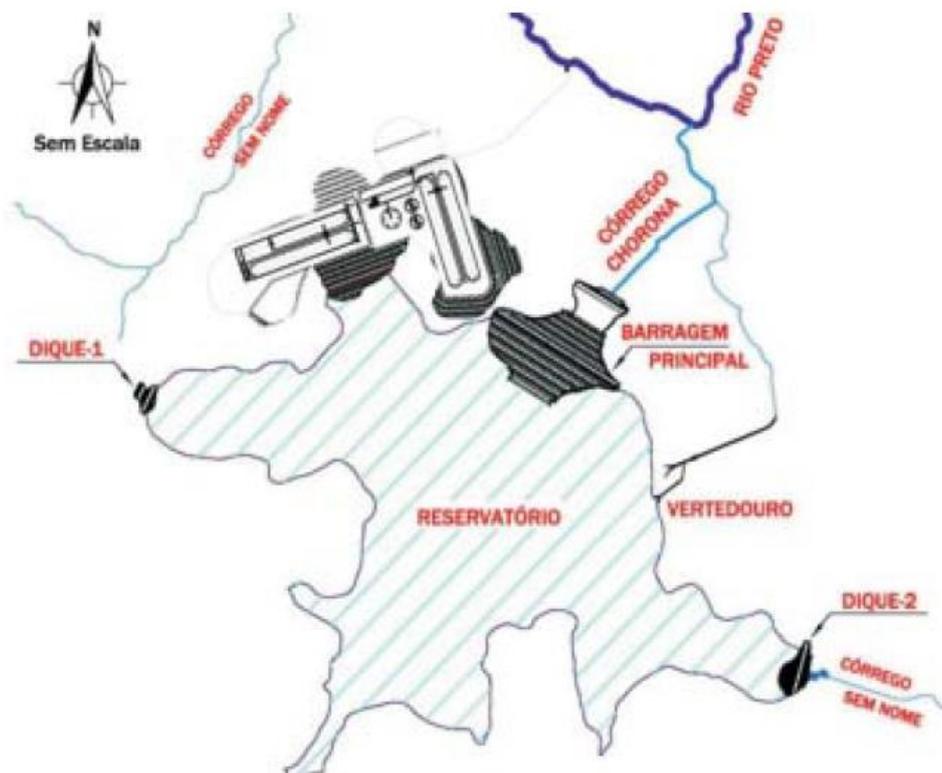
Fonte: Avila *et al.* (2007).

b) Síntese das Investigações Geotécnica, Abordagem do Projeto, Especificação de Construção, Geometria, Operação, Instrumentação

Segundo Avila *et al.* (2007), a barragem de São Francisco é composta por um corpo principal e dois diques (1 e 2) de terra (Figura 49), projetados para aumentar a capacidade de armazenamento do rejeito. Os diques 1 e 2 têm alturas de 10 e 15 m, respectivamente, a altura do corpo principal é de 52 m,

onde a crista tem 428 m de comprimento, e o reservatório tem volume de 37 milhões de m³.

Figura 49 - Representação do layout da Barragem de São Francisco.



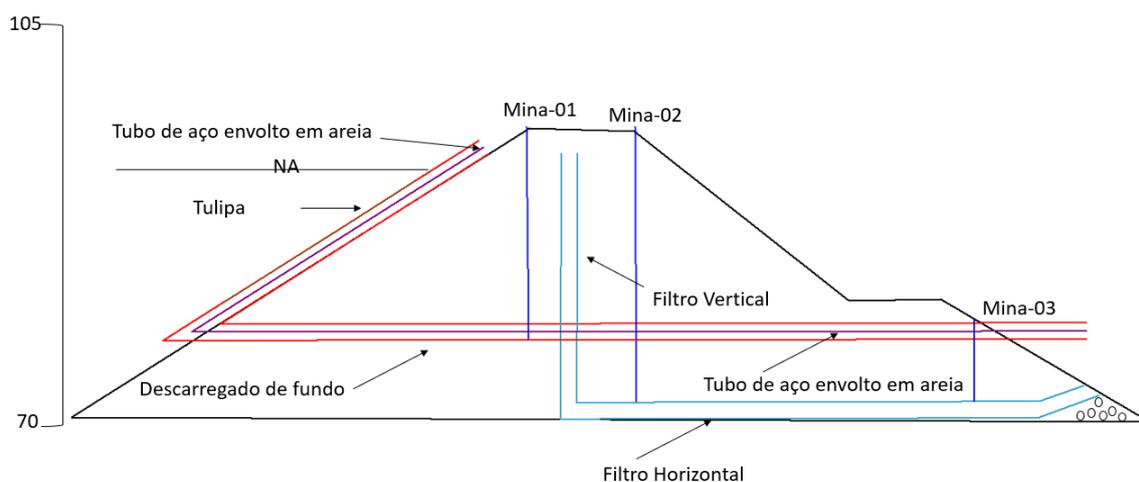
Fonte: Ávila *et al.* (2007).

A barragem principal tem um sistema de drenagem interna, composto por filtro vertical e tapete horizontal, construídos com areia. Ela possui drenagem de pé formada por enrocamento a jusante e trincheira instalada em cada uma das ombreiras. O sistema de drenagem interna também está implantado nos diques da barragem (Figura 50). A drenagem superficial é composta por canaletas de concreto ao longo das bermas, escadas no talude de montante e jusante, que direcionam a água pluvial para um bueiro localizado no pé do talude de jusante.

O maciço da barragem principal foi construído utilizando solo de características silto-argiloso, conforme previsto em projeto. Além disso, também foram utilizados materiais de características diferentes, tanto a montante, como a jusante do eixo, como explica Ávila *et al.* (2007).

A barragem principal foi construída em duas etapas. Na primeira o maciço foi projetado para 52 m de altura, com crista na cota 690 e na segunda etapa a barragem chega à cota 707,5. O talude de montante do maciço executado, tem inclinação de 1,0V:2,5H com bermas de 3,0 m de largura a cada 10,0 m de desnível. O talude de jusante apresenta inclinação de 1,0V:2,0H com bermas também de 3,0 m de largura e com desnível de 10,0 m, conforme descrito por Rocha (2015).

Figura 50- Drenagem interna implantado na Barragem de São Francisco



Fonte: Adaptado de Ávila *et al.* (2007).

Segundo Avila *et al.* (2007):

“A barragem é dotada de um sistema de drenagem interna que é constituído por um filtro de areia tipo “chaminé”, posicionado a jusante do seu eixo, com continuidade através de tapete horizontal, também de areia, dotado de dreno de pé em enrocamento na extremidade de jusante e de duas trincheiras drenantes implantadas respectivamente em cada ombreira. O sistema de drenagem superficial é dotado de canaletas de concreto posicionadas ao longo das bermas. Existem também valetas de proteção de aterro e corte, localizadas a meia encosta das ombreiras da barragem, além de descidas d’água em degraus localizadas nos taludes de montante e jusante. A condução de toda a água de origem pluvial captada pelas estruturas descritas acima converge para um bueiro à jusante do dreno de pé.

O Dique 1 é formado por um aterro de solo executado para preenchimento de uma sela topográfica existente na área do reservatório com aproximadamente 10m de profundidade abaixo da cota da crista do barramento principal. O dique é constituído de sistema de drenagem interna composto por filtro vertical de areia e de um tapete drenante horizontal.

O Dique 2 é formado por um aterro em solo executado para preenchimento de uma sela topográfica existente na área do reservatório

com aproximadamente 15m de profundidade abaixo da cota da crista do barramento principal. O dique é constituído de sistema de drenagem interna composto por filtro vertical de areia, de um tapete drenante horizontal e de um dreno de pé.”

Segundo Avila *et al.* (2007), o maciço rochoso de fundação, investigado por sondagens SPT, indica que a fundação da barragem está instalada em solo residual granulítico muito desenvolvido, chegando a 46 m de espessura, localizado na ombreira esquerda. O perfil desse solo expõe uma camada de espessura média de 4 m de solo colúvio/residual, de granulometria de argila e silte, com pequena fração de areia, de coloração amarelo avermelhada e com consistência média (SPT variando de 4 a 7). Esta camada é praticamente impermeável e tem características texturais e de resistência suficientes para proteger a superfície do terreno contra a erosão.

O resultado das sondagens SPT identificou que os primeiros 7 m têm consistência e/ou compactidade de rija e/ou medianamente compacta (SPT de 8 a 15) e a partir dessa profundidade, de muito rija a dura e/ou medianamente a muito compacta (SPT>15). A permeabilidade é considerada baixa, em comparação com solos de mesmas características (AVILA *et al.* 2007).

No Dique 1 foi encontrado solo residual, de textura silto-argilo arenosa a silte com pouca argila e areia, apresentando espessura variável, entre 0,70 m a 15,81 m, com consistência variando de média a rija (Avila *et al.* 2007).

No Dique 2 foi detectada uma camada superficial de espessura variando de 4 a 6 m de solo argilo-siltoso, com frações variáveis de areia e pedregulhos (Tabatinga), de plasticidade média a alta e coloração cinza e amarelo esbranquiçada e de consistência muito mole a média (SPT de 1 a 5). Abaixo desta camada ocorre o solo residual de granulito, de granulometria predominantemente siltosa com baixos percentuais de argila e areia, apresentando valores de SPT crescentes com a profundidade. Avila *et al.* (2007). O monitoramento geotécnico do maciço da barragem e suas estruturas (Dique 1 e Dique 2) é realizado com os instrumentos indicados na Tabela 26.

Tabela 26 - Instrumentos e quantidade deles empregados na Barragem.

Instrumentação	Quantidade			Periodicidade
	Barragem	Dique 1	Dique 2	
Piezômetros	9	1	1	Semanal
Indicadores de nível d'água	17	3	3	Semanal
Marcos Superficiais	12	2	2	Trimestral
Régua do N.A do reservatório*		1		Diário
Pluviômetro*		1		Diário

Fonte: Avila *et al.* (2019).

Dados pluviométricos eram obtidos a partir de uma estação meteorológica localizada na unidade da CBA/Votorantim. Segundo informação da literatura consultada, estava prevista a instalação de um evaporímetro que forneceria leitura diárias. As Inspeções de rotina eram realizadas semanalmente por terceiros.

Segundo Avila *et al.* (2007):

“O vertedouro é constituído por uma galeria em concreto armado para abrigar uma tubulação de aço. No início da galeria há uma pequena bacia de aproximação e uma caixa para captação da água. Após percorrer a tubulação, a água é lançada numa estrutura em degraus de concreto armado, passando a bacia de dissipação. Finalmente, há um canal de restituição trapezoidal, revestido em Colchão Reno que repõe a água em seu curso natural. O trecho em canal fechado é constituído por uma tubulação de aço Ø1000 mm, com 151,0 m de extensão e declividade de 0,03 m/m, envolvida nos seus 85,0 m iniciais por uma galeria de concreto armado. O fluxo extravasor se inicia numa bacia de aproximação de forma trapezoidal (em planta), com fundo em gabião tipo colchão Reno, com 30,0 cm de espessura, na cota 687,50 m, e taludes sem revestimento. Na face menor deste trapézio, a jusante da bacia, existe uma estrutura de concreto armado moldado no local, denominada Caixa de Transição 1, composta de uma caixa retangular, destinada a fazer a captação de água e seu encaminhamento à tubulação de Ø1000 mm, e de duas alas laterais, para arremate do aterro. A jusante da parede da caixa de transição 1 se inicia uma galeria de concreto armado, de dimensões internas de 2,0 x 2,0 m, destinada a proteger a tubulação do vertedouro no trecho em que esta se encontra sob a ombreira da barragem, além de permitir visitas de inspeção a este trecho da tubulação. Ao final da tubulação, logo após outra deflexão horizontal, foi executada a caixa de transição 2. Esta caixa se destina a recolher o fluxo da tubulação e lançá-lo no trecho do vertedouro em degraus. O trecho do vertedouro em degraus, nesta etapa, possui 228,0 m de extensão e foi executado em concreto armado moldado no local, com seção retangular de 4,0 m de largura e 2,0 m de altura. Posteriormente será complementado para montante, até a cota de implantação da soleira da

barragem na 2ª Etapa na cota 705,00 m. Este vertedouro está projetado em 8 trechos, com aproximadamente 30,0 m de extensão cada um, e com juntas de dilatação entre eles. No trecho inicial desta estrutura, aproximadamente até 50,0 m a jusante da caixa de transição 2, o terreno apresenta uma declividade acentuada, diminuindo para jusante até a bacia de dissipação. A bacia de dissipação está na cota 643,60 m e terá 20,0 m de laje nivelada, terminando em uma parede de 1,0 m de altura, de maneira a criar um colchão de água para o amortecimento final da energia do fluxo. Após a bacia de dissipação existe um canal de restituição de 20,0 m de extensão, de seção trapezoidal, com fundo de 4,0 m de largura, com 2,0 m de altura e taludes com declividade 1V:1.5H, revestidos, fundo e taludes, com colchão Reno de 30,0 cm de espessura. Ao final deste canal há um enrocamento de pedras de mão para proteção dos taludes do canal e do terreno no entorno, incluindo a calha do córrego existente.”

A operação da barragem era realizada por dois sistemas de captação de água na planta. O Sistema Água Nova, responsável pela captação e condução de água do rio (adução do rio Preto), manancial que banha a área de implantação do empreendimento, estava localizado a aproximadamente 740 m a jusante da planta de beneficiamento (ÁVILA *et al.*, 2007). O outro que constitui o Sistema de Bombeamento, foi projetado para atuar com cinco bombas (sendo uma de reserva) implantadas em uma estrutura de concreto executada na margem direita deste rio. Deve-se observar que parte desta água é proveniente do aproveitamento do processo de lavagem do minério, recuperada por intermédio de espessadores. O sistema projetado é composto por uma captação flutuante, executada em estrutura metálica. Ele tem capacidade para aduzir uma vazão de 800 m³/h. O sistema adutor é dotado de uma linha de recalque com tubulação de polietileno de alta densidade (PEAD), com diâmetro em 450 mm com aproximadamente 762 m de extensão e uma altura manométrica de 79 m (ÁVILA *et al.*, 2007).

5.3.3 Incidente ocorrido em 2006

Rocha (2015) explica que o vertedouro de torre em concreto, existente na barragem em 2006, possibilitava a manutenção da lâmina d'água, para decantação dos sólidos e posterior clarificação da água. A cota da soleira era aumentada gradualmente, ao longo da vida útil da barragem, por meio da instalação de placas de concreto, com encaixes existentes na estrutura principal.

Após alteamento da barragem, em 1 de março de 2006, na base do vertedouro, houve abertura de uma brecha entre as placas de concreto submersa e o maciço, o que causou o vazamento de rejeito. Ele foi resolvido, quando a empresa conseguiu obstruir a fenda (Rocha, 2015).

Calcula-se que houve um vazamento de 135.000 m³ de rejeito, composto por 65.000 m³ de lama e 70.000 m³ de água limpa, retirados para baixar o nível do reservatório e diminuir a pressão na fenda. O rejeito liberado atingiu o curso de água da zona da mata e norte fluminense. Segundo o Ministério Público Estadual de Minas Gerais, esse incidente causou a destruição do ecossistema ribeirinho, inundação de áreas, turbidez da água do Rio Fubá e Muriaé, provocando a morte de peixes e comprometendo a qualidade da água.

5.3.4 Acidente ocorrido em 2007

Após o incidente que ocorreu em 2006 e a realização das medidas corretivas impostas pelo Ministério Público, durante a madrugada de 10 de janeiro de 2007 o maciço da barragem de São Francisco rompeu. Destaca-se que não foi possível encontrar os documentos que descrevam quais foram as correções realizadas naquela época.

Segundo Avila *et al.* (2007), o nível do reservatório aumentou rapidamente em função do grande volume de chuva, atingindo a soleira do vertedouro, que é a parte superior da parede onde existe contato com a lâmina de água vertente. A água começou a verter pela estrutura, no mesmo momento em que começou a verter no contato da ombreira direita com o maciço, local do vertedouro e da

estrada de acesso. O galgamento iniciou o processo de erosão próximo a ombreira direita, resultando na ruptura da barragem.

A vazão de água na estrada de acesso pode ter sido causada devido colapso da parede lateral do vertedouro ou em função do rebaixamento da crista para passagem de veículos. A parede do vertedouro que rompeu era formada por solo, com parede espessa no ponto de junção com a estrada de acesso. O rebaixo da crista pode ter colaborado para a ruptura devido á comunicação direta entre o reservatório e a estrada de acesso (Avila *et al.* 2007).

c) Avaliação com base na proposta apresentada

A proposta de avaliação da operação que utiliza a ficha simplificada será aplicada primeiro para o incidente ocorrido em 2006 e depois para o acidente que ocorreu em 2007.

C.1 Avaliação do incidente de 2006

A Tabela 27 apresenta o resultado da avaliação do incidente ocorrido em 2006 por meio desta proposta. Nela observa-se uma pontuação diferente de zero no tópico “Operação das Águas”, uma vez que a brecha existente poderia ter sido identificada durante a operação, e medidas corretivas visando o fechamento desta poderiam ter sido tomadas antes do vazamento. A efetividade da operação do *stop log*, também será testada durante a aplicação desta proposta, o que poderia auxiliar para se encontrar a anomalia que causou a brecha entre as placas de concreto que culminou nesse incidente.

Tabela 27 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação incidente 2006.

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Histórico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidrologia.	0	Normal	não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança, instrumentação.	0	Normal	não
Dados Projeto	Maciço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.	0	Normal	não	Cotas e largura de crista e bermas, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.	0	Normal	sim
	Forma de controle de percolação	Drenagem interna, controle da freática, surgência de água no talude.	0	Normal	não	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotécnicas de fundação.	0	Normal	não
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais dos equipamentos, forma de disposição.	0	Normal	não	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgência de água, vegetação	0	Normal	não	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	0	Normal	não
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	3	emergencia	sim	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	3	emergência	sim	Controle do enchimento do reservatório, régua.	0	Normal	não
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	0	normal	não	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	0	normal	não
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	0	Normal	não	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	0	Normal	não
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	0	Normal	não	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	0	Normal	não
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	normal	não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.			
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	0	Normal	não	Cálculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	0	Normal	não
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral (existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	0	normal	não	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N.A. Poropressão.	0	normal	não
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instalados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	0	Normal	não	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	0	Normal	não

C.2) Avaliação do acidente de 2007

Analisando o resultado desta proposta, cujos resultados estão sistematizados na Tabela 28, tem-se uma pontuação diferente de zero no tópico “Dados do Projeto” para o item cota e largura de crista e berma etc., devido a hipótese apresentada por Avila *et al.* (2007), em que o rebaixo da crista pode ter colaborado para a ruptura devido á comunicação direta entre o reservatório e a estrada de acesso. Neste caso, ao se aplicar a proposta de avaliação apresentada possibilitaria identificar o rebaixo da crista, e uma intervenção técnica seria solicitada para avaliação do problema na época, a fim de identificar possível risco de galgamento ou erosões que poderiam causar problemas a operação e estabilidade da estrutura.

Observa-se novamente uma pontuação diferente de zero no tópico “Operação das Águas”, por motivos distintos daqueles apontados no incidente de 2006. Neste caso estudado atribuiu-se pontos para os seguintes itens:

- “Possibilidade de galgamento”, que deveria ter sido analisada a fim de verificar se o vertedouro estava dimensionado para receber todo o volume de chuva da época.
- ” Controle do Enchimento do Reservatório, Régua”. Este tem o objetivo de avaliar se a borda livre de operação está de acordo com o projetado para evitar galgamento, que pode causar erosões e levar a estrutura ao colapso.

Logo, pode-se considerar que se a aplicação dessa proposta estivesse sendo feita naquele momento, ela poderia indicar a necessidade de intervenção técnica no sentido de se evitar o acidente de 2007, a partir de recomendações que possibilitassem o melhor direcionamento para a operação das águas que a barragem recebia na época, considerando o volume de chuvas decamilenar.

Tabela 28 - Avaliação por meio da ficha simplificada de operação acidente 2007.

	Dados Qualitativos					Dados Quantitativos			
	Itens	Visuais (qualitativos)	Nível de perigo			Dados da Instrumentação (quantitativos)	Nível de perigo		
			Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção		Pontuação	Classificação	Necessário Intervenção
Histórico da Estrutura	Localização	Mapas de localização, vegetação, fotos do local.	0	Normal	não	Topografia da área, geotecnia dos solos locais, Geologia e geoquímica local, hidrogeologia, hidrologia.	0	Normal	não
	Histórico da Construção	Deve haver relatório simple com informações sobre a construção da barragem, registro fotografico, pontos de atenção.	0	Normal	não	Histórico de acompanhamento do fator de segurança, instrumentação.	0	Normal	não
Dados Projeto	Maciço da Barragem	Inclinação, proteção do talude, erosão.	0	Normal	não	Cotas e largura de crista e berma, material e compactação do material, ângulo de talude, cota final, cronologia dos alteamentos.	2	Alerta	sim
	Forma de controle de percolação	Drenagem interna, controle da freatica, surgencia de água no talude.	0	Normal	não	Aspectos sobre liquefação e sismicidade, condições geológicas e geotécnicas de fundação.	0	Normal	não
	Sistema de transporte do rejeito	Posicionamento e condições estruturais dos equipamentos, forma de disposição.	0	Normal	não	Tubulações, dispositivo para transporte, vazão.	0	Normal	não
	Estabilidade dos taludes	Erosões, surgencia de água, vegetação	0	Normal	não	Fator de segurança do talude para as diferentes etapas.	0	Normal	não
Op. Das Águas	Vertedouro	Identificar trincas, falhas, vazão, erosão, entubamento, possibilidade de galgamento.	3	emergencia	sim	Controle do fluxo de água dentro do reservatório, direcionamento da água para o vertedouro.	0	Normal	não
	Borda Livre/ Capacidade do reservatório	Monitorar nível e posição do lago, Stop Log funciona conforme programado.	3	emergência	sim	Controle do enchimento do reservatório, régua.	3	emergência	sim
Op. Do Rejeito	Pontos de descarga do rejeito	A disposição do rejeito ocorre conforme projeto. Segregação uniforme.	0	normal	não	Vazão da polpa, densidade, volumes lançados, permeabilidade, resistência ao cisalhamento.	0	normal	não
	Tubulações (rejeito)	Tubulação superficial, posição, aspectos gerais.	0	Normal	não	Diâmetro, vazão, pressão no tubo.	0	Normal	não
	Praia de rejeito	A praia esta sendo formada em conformidade com a geometria de projeto.	0	Normal	não	Amostragem do rejeito, análises de laboratório estão de acordo com o esperado. Largura, inclinação, posição.	0	Normal	não
	Recirculação/Captação de água	Lâmina de água mínima está sendo mantida, direcionamento da água para o ponto de captação está correto, recirculação da água ocorre conforme manual de Operação.	0	Normal	não	Bombas e tubulação estão em conformidade. Cota do N.A. Volume útil para amortecimento das cheias. Vazão.	0	Normal	não
Op. Alteamento	Construção	Parâmetros geotécnicos de projeto (largura da Berma, inclinação de talude, cota da crista), fundação, drenagem superficial em conformidade com o projeto.	0	normal	não	Comportamento geotecnico, grau de compactação, ensaios. Drenagem interna (filtro verticais, tapetes, drenos), instalados, monitorados. Sismicidade.			
	Sequenciamento	A construção de novos taludes segue ordem de projeto.	0	Normal	não	Cálculo do fator de segurança para cada alteamento está dentro do recomendado.	0	Normal	não
Mon. Operacional	Talude/Berma/ Crista	Condição geral(existência de formigueiros ou semelhantes), vegetação, erosão, surgências água, abatimentos.	0	normal	não	Inclinação, dimensões da erosão. Deslocamento dos marcos superficiais, nível do N. A. Poropressão.	0	normal	não
	Drenagem Interna	Medidor de nível água, piezômetros, instados e funcionando. Saída dos dispositivos de drenagem.	0	Normal	não	Análise da medição N.A, poropressão, Vazão.	0	Normal	não

5.3.5 Considerações finais sobre avaliação da Barragem de São Francisco

A proposta para avaliação da estrutura indica que o vertedouro foi mal dimensionamento. Este fato contribuiu efetivamente para o acidente que ocorreu em 2007, onde o galgamento próximo a ombreira direita, e o vertedouro, causaram a erosão, que resultou na ruptura da barragem.

Conforme a avaliação realizada, o rebaixo da crista devido à comunicação direta entre o reservatório e a estrada de acesso também pode ter colaborado para a ruptura. A proposta de avaliação, quando aplicada, deveria solicitar a intervenção de um especialista para avaliar a situação, a fim de sugerir ações para corrigir eventuais problemas que poderiam causar a instabilidade dessa estrutura.

Já, a brecha que foi a responsável pelo incidente em 2006, teria sido identificada por meio da avaliação sistemática que faz parte desta proposta, conforme exposto anteriormente. Esta intervenção técnica também poderia solicitar outras intervenções com o objetivo de fechar esta brecha, evitando, assim, o vazamento.

Assim, a proposta sugerida e aplicada para a Barragem de São Francisco seria eficiente para identificar problemas antes deles terem ocorrido. Uma ação deste tipo possibilita que o pessoal responsável pela operação possa solicitar apoio técnico para melhor operar a barragem ou, até mesmo, propor e implantar medidas de correção.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Este estudo destaca a importância do acompanhamento da operação das barragens para garantir a estabilidade e operação, conforme definido no projeto. Além disso, o estudo também aponta a importância do acompanhamento temporal da barragem por especialistas visando dar apoio a operação nos momentos de dúvidas ou anomalias identificadas. Algumas diretrizes são recomendadas para aumentar a segurança de barragens de rejeito, em função da avaliação de alguns procedimentos operacionais inadequados realizados. Recomenda-se que a avaliação da operação com o auxílio de uma ficha simplificada de operação seja utilizada para identificação e solução de possíveis problemas, sempre com apoio de especialistas.

Além disso, a partir da síntese das causas de ruptura de barragens de rejeito de mineração no Brasil, pode se destacar que:

- ✓ A avaliação de um único ou mesmo de poucos parâmetros geotécnicos não é eficaz, sendo necessário o acompanhamento contínuo do desempenho da barragem.
- ✓ Falhas estruturais podem ser identificadas antes do colapso da barragem, indicando possíveis problemas que possam levar a instabilidade. A intervenção de um especialista no início da falha pode reduzir ou até mesmo evitar o colapso da estrutura.
- ✓ O monitoramento contínuo da barragem através de instrumentos, como piezômetros, medidores de nível de água, marcos de concreto, são essenciais, para a gestão e operação da estrutura.
- ✓ Os projetos devem considerar as características da fundação, do rejeito a ser depositado, material a ser usado para construção do maciço, perfil hidrológico e pluviométrico etc. para o correto dimensionamento do vertedouro, definição do ângulo de talude e borda livre.
- ✓ A drenagem interna e superficial da barragem, foi apontada como um dos pontos mais sensíveis da estrutura. Ela se mostrou uma das principais causas de instabilidade quando a barragem não é operada e gerenciada corretamente, a partir de uma disposição incorreta do rejeito ou falha de projeto.

- ✓ Constatou-se também, por meio deste estudo, que o método de construção a montante, foi de fato, aquele mais susceptível a ruptura.
- ✓ O fenômeno de liquefação resultante da associação de outros problemas como drenagem, lançamento do rejeito etc. Foi responsável pelo colapso de cinco das seis barragens estudadas que foram construídas pelo método de montante.
- ✓ Outro aspecto a destacar sobre o estudo do histórico de rompimento de barragens de rejeito no Brasil é a importância da forma de operar esses empreendimentos. Constatou-se que a má operação das barragens aumenta significativamente as chances de ruptura. Assim, é importante que a equipe de operação esteja capacitada e treinada para acompanhar e identificar os problemas assim que eles ocorram.

Por estas razões apresentou-se neste trabalho uma proposta que possibilita uma avaliação contínua, de forma simples e rápida, a partir do uso de uma ficha simplificada de operação, que auxilia a tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção de um geotécnico e do projetista na operação, a fim de evitar problemas de instabilidade e falta de segurança no futuro dessas barragens. Além disto, esta proposta também permite que se avalie se a operação da estrutura está ocorrendo em conformidade com as boas práticas de operação. A aplicação desta proposta para dois casos em que houve ruptura de barragens no Brasil possibilitou avaliar sua eficiência.

A proposta para avaliação da estrutura através da ferramenta da ficha simplificada de operação indicou para Barragem I de Brumadinho, construída pelo método de montante, o seguinte:

- ✓ Para o tópico Dados do Projeto: problemas com a inclinação do talude, forma de controle da percolação e sistema de transporte do rejeito.
- ✓ Para o tópico Operação das águas: a anomalia no controle de fluxo da água dentro do reservatório e direcionamento das águas foi identificada.
- ✓ Para o tópico Operação dos rejeitos: foi possível identificar falhas nos pontos de descarga, formação da praia, captação e recirculação das águas.
- ✓ Para a Operação do Alçamento: constatou-se problemas nas definições de características e parâmetros geotécnicos de projeto, como largura da

berma, inclinação de talude, grau de compactação e drenagem. Estes aspectos indicam deficiência de controle e falta de maior compromisso e/ou envolvimento dos especialistas.

- ✓ Para o Monitoramento: A aplicação desta proposta conseguiu apontar dados da instrumentação que indicavam falhas na identificação da posição da linha freática, causando problemas de drenagem e instabilidade.

A aplicação desta proposta para avaliação do desempenho da Barragem de São Francisco, que foi construída pelo método de jusante, indicou o seguinte:

- ✓ Para o tópico Operação das Águas: no incidente que ocorreu em 2006 apontou falha no vertedouro devido a existência de trinca e funcionalidade do *Stop Log*, apontando a necessidade de intervenção de especialista.
- ✓ Para o tópico Operação das Águas: no acidente de 2007, indicou falhas com possibilidade de galgamento e falha no monitoramento da borda livre.

Considera-se que essa proposta foi eficiente, tanto para o caso de uma barragem construída pelo método de montante como de jusante, ou seja, para características de construção, gestão e operação distintas. Considera-se, por isso, que a proposta de avaliação da operação que utiliza a ficha simplificada é um recurso interessante para operação de barragens de rejeito.

Destaca-se que a decisão em conjunto sobre a correção da anomalia identificada na aplicação da proposta de avaliação da operação, deve ser realizada de forma rápida e tecnicamente respondida.

Para a continuidade de pesquisas com este tipo de abordagem sugere-se aplicar essa proposta em uma barragem de rejeito em operação. Destaca-se que, neste caso, deve-se contar com o apoio de especialistas, toda vez que forem identificados problemas de operação ou desempenho da estrutura, para evitar problemas e garantir a segurança da estrutura. Ainda como continuidade da pesquisa sugere-se adaptação da proposta de avaliação da operação através da ficha simplificada de operação, para avaliação da operação de pilhas de estéril, devido a semelhança nos conceitos de projeto, gestão e operação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE FILHO, L. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeito de minério de ferro através de ensaios de piezocone.** Solos e Rochas, v. 29, n. 3, p. 391–394, 2004.

ALMEIDA, B. **Cataguases, barragem rompida foi desativada após acidente em 2003.** Publicado pelo jornal Zona da Mata MG. Disponível em: <http://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2015/11/em-cataguases-barragem-rompida-foi-desativada-apos-acidente-em-2003>. Acesso em: 15 março/2020

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **ANM:** Relatório de segurança de barragens,2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **ANM:** Relatório de segurança de barragens,2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO . **ANM.** O Relatório de Segurança de Barragens,2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **ANM.** Manual De Fiscalização: Barragens De Mineração. Sebrae Rj, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR13028.** Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e preservação de água,2017.

AVILA *et all*, livro **Barragens de Rejeito no Brasil.** Capítulo 26, pag. 262-267, Edição: Comitê Brasileiro de Barragens, 2007.

CSP2 (2016). CENTER FOR SCIENCE IN PUBLIC PARTICIPATION. **Tailings Dam Failures 1915-2016.** Disponível em: <http://www.csp2.org/technical-reports>, Acessado em: 7 de fev. 2020.

CNPG, Conselho Nacional Procuradores Gerais, **Ações judiciais e termo de compromisso garantem direitos de atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana.** 2016. Ministério Público de Minas Gerais (MPMG).Disponível em: <http://www.cnpg.org.br/index.php/todas-as-noticias-do-cnpg>. Acesso em: 18 maio/2020.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos, CNRH, Resolução Nº 143, de 10 de julho de 2012, publicada no D.O.U em 04/09/2012.

DINIZ, N. C. et al. **Casos históricos de ruptura de presas de relaves em Brasil** : proposta de geoindicadores para el monitoreo. v. 117, n. 2, p. 265–275, 2006.

DUARTE, A. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco,** Dissertação Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

EMERICH, Danilo. **Omissão de mineradora causou rompimento de barragem em Itabirito**: 2015. Publicado pelo jornal O Tempo. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/omissao-de-mineradora-causou-rompimento-de-barragem-em-itabirito>. Acesso em: 18 maio. 2020.

Espósito, T.J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragem de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2000.

FERNANDES, RAFAELA BALDI. **Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA**. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 2020.

FERNANDES, R.B (2017). Manual para elaboração de planos de ação emergencial para barragens de mineração (PAE). 2017.

GEOCONSULTORIA S/C LTDA; (2006). Relatório de Avaliação de Segurança (Carta de Risco), 36p.

IBRAM. **Relatório Anual de Atividades 2019**. Disponível em: <https://ibram.org.br/Relatorios-de-Atividades> . Acesso em: 05 dez. 2019

ICOLD COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (ICOLD). Bulletin 121: **Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences. Lessons learnt from practical experiences**. 2001. 146 páginas.

LIMA, S. R. DE S. **Caracterização e análise dos acidentes com barragens de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais**. Monografia apresentada ao curso de pós-graduação lato senso à distância em geologia de minas e técnicas de lavra a céu aberto do instituto de geociências da universidade federal do Pará, 2016.

LOZANO, F. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica** . Dissertação Mestrado Universidade de São Paulo 2006.

MACHADO, W. G. DE F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Dissertação Mestrado Universidade de São Paulo, 2007.

MARENGO, N. **Falhas em licenciamento da barragem de Fundão**, 2016. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/mp-de-minas-gerais-ve-falhas-em-licenciamento-da-barragem-de-fundao>. Acesso em: 20 fev. 2019.

MINAS, **Polícia Civil conclui primeiro inquérito referente ao rompimento da Barragem de Fundão**. 2016. Disponível em: <https://g37.com.br/c/estadual/policia-civil-conclui-primeiro-inquerito-referente-ao-rompimento-da-barragem-de-fundao>. Acesso em: 18 maio. 2020.

OLIVEIRA, J.B.V.R. **Manual de Operação de Barragens de Contenção de Rejeitos como Requisito Essencial ao Gerenciamento dos Rejeitos e da Segurança das Barragens**. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2010.

PEDROSA, L. **Reavaliação Do Sistema De Classificação De Barragens**. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2010.

PEREIRA, E. L. **Estudo de potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, p. 210, 2005.

PIRETE, WASHINGTON. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001) [manuscrito] / Washington Pirete da Silva. - 2010. **Dissertação (Mestrado Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO.)**

ROBERTSON, P. K. et al. **Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão**. 2019.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Miraf, Minas gerais, Brasil**. Dissertação Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SANTAMARINA, J.C., Torres-Cruz, L.A. and Bachus, R.C. (2019). **Why coal ash and tailings dam disasters occur**. Science Magazine, 364 [6440], 526-528. DOI: 10.1126/science.aax1927.

Soares, L, **Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios**, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831–896. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França, 2010.

VALERIUS, M. **Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2014.