



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**FACULDADE DE GEOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO *LATO SENSU* À DISTÂNCIA**

**Sarah Ramos de Sousa Lima**

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS ACIDENTES COM BARRAGENS DE  
REJEITO DE MINERAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**Belém-PA**

**2016**

SARAH RAMOS DE SOUSA LIMA

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS ACIDENTES COM BARRAGENS DE  
REJEITO DE MINERAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao curso de Pós Graduação *Lato Sensu* à Distância em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu Aberto do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Especialista.

Área de Concentração: Acidentes com barragens.

Orientador: Prof.º Dr. Paulo Pontes Araújo

**Belém-PA**

**2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação –biblioteca da UFPA**

SARAH RAMOS DE SOUSA LIMA

**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 - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Especialista.

Data de aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Conceito: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Estanislau Luczynski

Doutor em Energia

Universidade Federal do Pará - UFPA

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato

Doutor em Hidrogeologia e Recursos Minerais

Universidade Federal do Pará - UFPA

---

Prof. Dr. Paulo Pontes Araújo - Orientador

Doutor em Hidrogeologia

Universidade Federal do Pará - UFPA

A minha família e as minhas amigas que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A meus Pais, em agradecimento por todos os ensinamentos a mim concedidos, através dos quais estabeleço minha conduta pessoal frente às adversidades da vida e, igualmente, educarei minha filha.

Ao meu irmão Lucas, o qual colocou as minhas necessidades à frente das dele.

Ao meu esposo Rosalvo, pela inesgotável fonte de apoio, paciência e incentivo, luz que me guiou rumo a esta conquista.

A Ísis, minha filha, por ser minha alegria.

As minhas amigas Aira, Barbara, Daniele, Ívia, Viviane e Wanessa pela colaboração, pois cada uma me auxiliou de uma forma.

Agradeço a turma GEOMINAS, pela oportunidade acadêmica, em especial a Carla Tayanna Silva que me auxiliou desde o início do curso e agora ao final do mesmo não foi diferente. Profissional exemplar que realiza seu trabalho com muita dedicação, pois não mede esforços para auxiliar os alunos.

A Lúcia Imbiriba, bibliotecária do Instituto de Geociências pela paciência e auxílio.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geologia de Mina e Técnica de Lavra a Céu Aberto, os quais compartilharam seus extensos conhecimentos.

Um agradecimento especial para os meus colegas de curso, os quais compartilharam comigo gargalhadas durante os encontros presenciais e algumas a distância também.

Ao professor Paulo Pontes pela orientação.

A Deus, por estar ao meu lado e por ter me permitido viver.

*“Minas são muitas”. Porém, poucos são  
aqueles que conhecem as mil faces das  
Gerais”.*

João Guimarães Rosa

## RESUMO

O Estado de Minas Gerais, lidera a produção mineral no que se diz respeito à quantidade e diversidade destes minerais já a algumas décadas. No entanto, esta liderança de produção acarreta também a responsabilidade pela geração de grande quantidade de rejeitos provenientes de suas usinas de beneficiamento. A disposição final destes rejeitos, assim como a manutenção de suas estruturas de contenção, representa um problema para as mineradoras, uma vez que, geram custos mesmo com o encerramento das atividades. Neste trabalho, são discutidos os principais modelos construtivos de barragens de rejeito, assim como seu funcionamento. Estas estruturas de barramento, quando não construídas e geridas adequadamente, se tornam fontes potenciais de risco, pois em caso de ruptura, trazem grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais, principalmente se estas estiverem localizadas próximas a mananciais de água, áreas urbanizadas ou de preservação. Em Minas Gerais, até então, ocorreram seis acidentes com barragens de rejeitos e, segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), se medidas não forem tomadas este número pode aumentar, uma vez que, outras 19 barragens no Estado possuem estruturas instáveis. Neste cenário, o presente estudo é de extrema relevância, uma vez que, caracteriza e analisa os fatores que contribuíram para que estes acidentes ocorressem proporcionando uma compreensão dos fatos, a qual pode ser empregada de modo a evitar novos acidentes. Os seis casos de ruptura ocorridas no Estado, são apresentados como estudo de caso. Ao final realizou-se uma análise conjunta dos fatos, evidenciando que, os passivos ambientais ocasionados pela mineração em Minas Gerais, devem ser lembrados como uma herança da falta de gestão de segurança e risco por parte dos empreendedores do setor, conjuntamente com uma legislação a qual atualmente está sendo revisada e uma fiscalização ineficiente.

Palavras Chaves: Barragens de rejeitos. Segurança de barragens. Acidentes com barragens.



## **ABSTRACT**

The state of Minas Gerais, it leads the mineral production in what concerns already the quantity and diversity minerals the some decades. However, this production leadership brings also the responsibility for the generation of great quantity of damming originating from his processing factory. The disposal of these wastes as well as maintaining their containment structures is a problem for mining, since generate costs even with the discontinuance of. In this work, are discussed the main constructive models of tailings dam, as well as his functioning. These structures of damming, when not properly constructed and managed, become potential sources of risk, in case of break, bring great economic, social and environmental damage, especially if they are located close to water sources, urban or conservation areas. In Minas Gerais, until now, six accidents took place with dams and, according to the State Foundation of Environment (FEAM), if no action is taken this number may increase, since 19 other dams in the state have unstable structures. In this scenery, the present study is of extreme relevance, as soon as, it characterizes and it analyses the factors that contributed so that these accidents occurred, provided an understanding of the facts, which can be employed in order to prevent further accidents. The six cases of rupture that occurred in the state are presented as a case study. At the end we held a joint analysis of the facts, showing that environmental liabilities caused by mining in Minas Gerais, should be remembered as a legacy of the lack of security and risk management by the sector entrepreneurs, together with legislation which is currently being revised and inefficient supervision.

**Keywords:** Tailings dam. Dams security. Accidents with dams.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo teórico de variação da condutividade hidráulica em depósito de rejeito...	18
Figura 2 – Modelo teórico proposto por Santos .....	19
Figura 3 – Elementos do dique de partida .....	20
Figura 4 – Deposição das partículas em barragens de rejeito .....	21
Figura 5 – Alteamento de barragens de rejeito por método construtivo montante .....	22
Figura 6 – Alteamento de barragem de rejeito por método construtivo jusante .....	23
Figura 7 – Método construtivo de linha de centro.....	24
Figura 8 – Fatores que influenciam a posição da superfície freática dentro de um depósito de rejeito .....	25
Figura 9 – Formação de brecha de ruptura por galgamento: a) início em um ponto mais fraco; b) brecha em forma de v; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão .....	29
Figura 10 – Estágios de desenvolvimento de ruptura por <i>piping</i> .....	30
Figura 11 – Fases da ruptura da mina de fernandinho.....	36
Figura 12 – Cicatriz deixada pela ruptura da Barragem de Fernandinho .....	36
Figura 13 – Vista aérea da barragem e do talvegue a jusante após a ruptura .....	38
Figura 14 – Vista da barragem de rejeitos da mineração Rio Verde após a ruptura .....	39
Figura 15 – Vertedor lançamento lama diretamente no Córrego Bom Jardim.....	42
Figura 16 – Vista da barragem de rejeitos após ruptura .....	43
Figura 17 – Demonstração das estruturas (barragens b1, b2, b3, b4 e beneficiamento) do empreendimento, vale do afluente do córrego do silva e local do rompimento da barragem. B1 (linha em vermelho).....	45
Figura 18 – Vista do local de ruptura e baias restantes utilizadas no lago de deposição .....	45
Figura 19 – Vista de frente do movimento de massa proveniente do colapso da B1 .....	46
Figura 20 – Calha do curso d’água (vale encaixado) afluente do córrego do silva a jusante da b3, afetado pelo rompimento da b1 .....	47
Figura 21 – Detalhe do curso d’água afluente do Silva a jusante e próximo da B3.....	47

Figura 22 – Vista do material do rompimento da b1 retido no vale a montante da b3 .....	48
Figura 23 – Vista do local no lago de deposição de rejeitos da b1 no limite da ruptura e trinca longitudinal.....	49
Figura 24 – Barragens de rejeito do Complexo Industrial Germano.....	49
Figura 25 – Imagens de satélite das barragens da Samarco (A) e do povoado de Bento Rodrigues (B).....	50
Figura 26 – Série temporal de imagens do satélite <i>Landsat</i> 8 da região da foz do Doce .....	51
Figura 27 – Configuração das barragens quando os rejeitos são lançados de acordo com a bibliografia técnica .....	65
Figura 28 – Configuração das barragens fernandinho e cava 1 saturando o maciço.....	65

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais.. .....	35
Quadro 2 - Comparação entre os métodos construtivos de barragens.....	58
Quadro 3 - Comparação geral entre acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais.....	69
Quadro 4 - Atores envolvidos na operação e gestão das barragens que se romperam .....	70

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ALMG – Assembleia Legislativa de Minas Gerais

CGFAI – Comitê Gestor de Fiscalização Ambiental Integrada

CREA/MG – Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Minas Gerais

COPAM – Conselho Estadual de Políticas Ambientais

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

MPMG – Ministério Público de Minas Gerais

PL – Projeto de Lei

RADA – Relatório de Avaliação Ambiental

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SNISB – Sistema Nacional de Segurança de Barragens

SUPRAM – Superintendência Regional de Meio Ambiente

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	13
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>14</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
<b>2.1 Atividade mineradora .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Rejeitos e sua disposição final .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Comportamento geotécnico dos rejeitos.....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Segregação Hidráulica.....	17
<b>2.4 Barragem de rejeito.....</b>	<b>19</b>
2.4.1 Métodos construtivos de barragens de rejeito .....	20
2.4.1.1 Método de montante .....	21
2.4.1.2 Método de jusante.....	23
2.4.1.3 Método de linha de centro .....	24
2.4.2 Fatores críticos na construção e operação de barragens de rejeito .....	24
<b>2.5 Acidentes com barragens .....</b>	<b>26</b>
2.5.1 Erro humano .....	26
2.5.2 Erros organizacionais .....	27
2.5.3 Erros de projetos.....	27
<b>2.6 Mecanismos de ruptura em barragens de rejeito.....</b>	<b>28</b>
2.6.1 Ruptura por galgamento .....	28
2.6.2 Ruptura por liquefação .....	29
2.6.3 Ruptura hidráulica por “piping”/erosão progressiva .....	30
<b>2.7 Segurança e eficiência de barragens de rejeitos .....</b>	<b>31</b>
<b>2.8 Mineração em Minas Gerais.....</b>	<b>31</b>
<b>2.9 Legislação de barragens em Minas Gerais.....</b>	<b>32</b>
<b>2.10 Fiscalização de barragens em Minas Gerais.....</b>	<b>34</b>
3 - ESTUDO DE CASO .....	35
<b>3.1 Acidentes com barragem de rejeitos em Minas Gerais.....</b>	<b>35</b>
3.1.1 Itaminas - Mina Fernandinho (1986).....	35
3.1.2 Mineração Rio Verde – Cava C1 (2001) .....	38

3.1.3 Rio Pomba Cataguases – São Francisco (2006-2007).....	41
3.1.4 Herculano – Retiro do Sapecado (2014).....	44
3.1.5 Samarco – Fundão e Santarém (2015).....	49
<b>3.2 Diagnóstico atual sobre barragens de rejeitos em Minas Gerais .....</b>	<b>55</b>
4 – METODOLOGIA.....	56
5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO .....	58
<b>5.1 Modelos construtivos de barragens.....</b>	<b>58</b>
<b>5.2 Acidentes ocorridos com barragens de rejeito em Minas Gerais.....</b>	<b>63</b>
CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS .....	77

## **1 – INTRODUÇÃO**

A economia do Brasil sempre teve uma relação estreita com a extração mineral. Desde os tempos de colônia, o Brasil transformou a mineração em um dos setores básicos da economia nacional. Em Minas Gerais, esta relação é ainda mais estreita, o Estado é considerado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) o Estado mais importante para o setor. Ele representa 53% da produção do país, estando presente em seu território 40 das 100 maiores minas do Brasil (FERREIRA, 2015).

A presença da mineração em Minas Gerais é ostensiva, marcada na paisagem, no nome e na história do Estado, a atividade está presente em quase metade dos municípios mineiros (cerca de 400). Características que colocam o Estado em um paradoxo, de um lado uma economia dependente do setor mineral e do outro os constantes impactos no meio ambiente (PORTAL UAI, 2015). Assim como toda exploração de recurso natural, a atividade de mineração provoca impactos no meio ambiente seja no que diz respeito à exploração de áreas naturais ou mesmo na geração de resíduos (SILVA, 2007).

Em relação aos resíduos, a mineração gera grandes volumes de massas de materiais, existindo dois tipos principais de resíduos sólidos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra), no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas (IPEA, 2012). Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas às substâncias minerais e é composto por partículas finas e ultrafinas de minério que juntas geram grande quantidade de resíduo argiloso, que geralmente é armazenado em barragens, sendo este o método mais comumente utilizado no país (RESO, 2015).

Uma mineradora de grande porte pode gerar rejeito em dezenas de milhares de toneladas, a cada dia, demandando por novas estruturas para a contenção deste resíduo, e estas, por sua vez, tem apresentado dimensões cada vez maiores, tanto no que se refere à altura, quanto ao volume de armazenagem (OLIVEIRA, 2010). Este processo aliado a alguns acidentes com barragens de rejeito no Estado de Minas Gerais, especialmente com o mais recente, no município de Mariana, tem provocado maior cobrança por parte da sociedade na questão da responsabilidade ambiental e social em relação à segurança destas estruturas armazenadoras de rejeitos.

### **1.1 Justificativa**

A ocorrência do acidente na barragem de Fundão, no município de Mariana, conjuntamente com outros acidentes de barragens ocorridos em Minas Gerais, tem feito com



que as empresas de mineração sejam fortemente cobradas no que diz respeito à segurança e eficiência das suas estruturas de armazenamento.

É importante mencionar que mesmo com estes casos de acidentes, a atividade mineradora é, de toda forma, de vital importância para as sociedades e que suas operações devem ser realizadas de maneira planejada e com a devida fiscalização de suas instalações.

Diante dessas considerações, torna-se importante um estudo de caracterização e análise das barragens onde os acidentes aconteceram, de modo a compreender qual fator ou quais fatores de segurança, falharam fazendo com que os mesmos ocorressem. Compreender os fatores é importante, pois esta percepção pode ser utilizada de modo a evitar acidentes futuros ou na correção de falhas já identificadas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O principal objetivo desta proposta de trabalho é a caracterização e posterior análise dos acidentes ocorridos com barragens de rejeitos de mineração no Estado de Minas Gerais e suas possíveis relações com erros humanos, de projeto, gerenciamento e demais fontes potenciais de ocorrência.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Análise comparativa dos modelos construtivos de barragens.
- Análise dos acidentes ocorridos com barragens de rejeito em Minas Gerais.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Atividade mineradora**

Entende-se como mineração a elaboração, extração e beneficiamento de minerais em estado natural, abrangendo todas as atividades complementares para preparar e beneficiar minérios, de modo a torná-los comercializáveis, sem provocar alterações na sua condição primária, mas que conseqüentemente provoca transformações no meio ambiente, através das atividades de lavra e processos (RESENDE, 2013).

A lavra consiste no conjunto de atividades coordenadas que extraem um bem mineral, retirando materiais sem valor econômico do corpo do minério. Após a lavra, o mineral bruto desmontado é submetido a uma série de processos industriais que o torna adequado para sua utilização na indústria metalúrgica (ARAÚJO, 2006). Nestes processos industriais, ocorrem as separações físicas e químicas que preparam o mineral de interesse granulometricamente além de purificá-lo ou enriquecê-lo (ESPÓSITO, 2000). Como resultado destes processos, o material bruto é dividido em concentrado e rejeito.

### **2.2 Rejeitos e sua disposição final**

As atividades mineradoras produzem uma grande quantidade de resíduos sólidos, dos quais os mais importantes em função de volume são gerados pela extração de minérios (estéreis) e pelas usinas de beneficiamento (rejeitos) (LOZANO, 2006). Esta pesquisa abordará apenas os rejeitos.

Rejeitos são resíduos de mineração, resultantes dos processos de beneficiamento a que se submetem os minérios e que são constituídos por água, partículas de rocha e as substâncias químicas envolvidas no processo (SANTOS, 2007).

De acordo com o tipo de minério e das operações empregadas no beneficiamento, estes materiais exibem características geotécnicas, mineralógicas e físico-químicas variáveis, se apresentando como rejeitos granulares (com granulometria de areias médias e finas), ou lamas (partículas com a granulometria de siltes e argilas) (SANTOS, 2007).

Os rejeitos gerados pelo processo de beneficiamento podem ser descartados de forma líquida (polpas), sendo transportadas em tubulações através de bombas ou por gravidade; ou sólida (pasta ou granel), sendo o seu transporte feito por caminhões ou correias transportadoras.

No caso das polpas, estas passam por alguns processos antes de serem encaminhadas para descarte, de modo a diminuir a perda na usina. Os processos pelas quais são submetidas realizam a recuperação de água, além de separar parcelas de rejeito com diferentes

granulometrias. Esses processos se dão através do espessamento (deslamagem), filtragem e ciclonagem (MACHADO, 2007).

O espessamento recupera a maior quantidade possível de água isenta de sólidos, através do espessador. Os espessadores são tanques dotados de braços rotativos que transportam os sólidos em decantação do rejeito para a região central do tanque, de onde são recolhidos e bombeados para o sistema de contenção (MACHADO, 2007).

Na ciclonagem, a polpa é injetada sob pressão, com porcentagem de sólidos pré-estabelecida. O material adota uma trajetória helicoidal, onde os fragmentos mais grossos se direcionam para as paredes do ciclone devido à força centrípeta<sup>1</sup>, e os finos se acumulam no centro do equipamento. O material mais grosseiro sai por baixo do equipamento – porção chamada de *underflow*, com pouca quantidade de água. Os finos transbordam do equipamento, misturados em água. Essa porção é chamada de *overflow* (MACHADO, 2007).

Após os processos de desaguamento, a disposição final dos rejeitos pode ser feita: em escavações subterrâneas, em superfície e em ambientes subaquáticos (KAWA, 2015).

Na disposição subterrânea ocorre o preenchimento de galerias, onde o minério já foi extraído e caso sejam seguidos os procedimentos de segurança e ambientais necessários, este método apresenta-se como sendo bastante econômico e com menor impacto ambiental. A disposição subaquática não é muito utilizada devido ao seu elevado potencial poluidor, em contrapartida, a disposição em superfície é a mais aplicada, onde o material é disposto em barragens ou diques (SANTOS, 2007).

Os rejeitos produzidos cada vez em maior quantidade prejudicam qualitativamente e quantitativamente o meio ambiente, causando uma preocupação cada vez maior nas empresas mineradoras, que por sua vez, tentam minimizar os impactos ambientais e também os custos associados à contenção dos rejeitos, procurando novas formas seguras de armazenamento e disposição (RESENDE, 2013).

### **2.3 Comportamento geotécnico dos rejeitos**

O estudo do comportamento geotécnico dos rejeitos se faz necessário para a compreensão de como os mesmos se comportam quando armazenados, e também porque, na maioria das vezes as mineradoras utilizam estes mesmos rejeitos para realizarem o alteamento de suas barragens, logo, as características geotécnicas do material são um dos elementos condicionantes do comportamento das estruturas em termos de estabilidade dos taludes,

---

<sup>1</sup> Força centrípeta - Força resultante que puxa o corpo para o centro da trajetória em um movimento curvilíneo ou circular.

deformabilidade da estrutura, assim como das condições de percolação (HERNANDEZ, 2002).

Os rejeitos possuem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas bastantes variáveis, que somadas à complexidade do processo de deposição e a variabilidade das propriedades dos materiais depositados, influenciam a distribuição das densidades e das porosidades, dificultando assim a compreensão do seu real impacto nos critérios de projeto e na avaliação do comportamento das barragens de rejeito (ESPÓSITO & ASSIS, 1999).

O comportamento geotécnico, nos aspectos de compressibilidade de rejeitos, auxilia nos cálculos da vida útil dos reservatórios através da aplicação da teoria do adensamento<sup>2</sup> a grandes deformações (RIBEIRO, 2015).

Em relação ao rejeito depositado, sabe-se que rejeitos granulares dispostos através de aterros hidráulicos, podem também apresentar devido à forma de lançamento, densidades relativamente baixas, favorecendo, desta forma, a ocorrência de fenômenos associados à liquefação. Estes podem ser deflagrados por carregamentos estáticos, associados, por exemplo, a uma elevação súbita do lençol freático ou a um movimento localizado de massa, sem conotações dinâmicas, em uma área fracamente assísmica como é o caso da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (PEREIRA, 2005).

Estudos sobre a influência da mineralogia na resistência ao cisalhamento de rejeitos granulares, assim como de potencial de liquefação, podem ser encontrados em linhas de pesquisas produzidas pela UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto (PEREIRA, 2005).

### 2.3.1 Segregação Hidráulica

A segregação hidráulica provoca um processo de deposição, onde partículas de diferentes densidades são assentadas a diferentes distâncias quanto ao ponto de lançamento, logo, trata-se de um processo importante na formação de aterros hidráulicos, sendo responsável pela criação de um gradiente de concentração ao longo da praia de rejeitos (RIBEIRO, 2000).

Geralmente o lançamento de rejeitos é efetuado com canhões ou hidrociclones. No caso de canhões, o processo de separação granulométrica acontece na própria praia em função da velocidade de descarga, concentração e atributos mineralógicos do rejeito, enquanto que nos hidrociclones uma primeira classificação granulométrica é feita antecipadamente ao lançamento (RIBEIRO et al, 2003). Durante a deposição hidráulica, de acordo com Vick

---

<sup>2</sup> Teoria do adensamento a grandes deformações: Teoria que se baseia na permeabilidade e compressibilidade de sólidos saturados.

(1983), é prevista uma zona de alta permeabilidade nas áreas próximas ao ponto de descarga, uma zona de permeabilidade baixa afastada do ponto de lançamento e uma zona de permeabilidade intermediária estabelecida entre os dois pontos, como mostrado na Figura 1. Essa afirmativa só é correta para depósitos de material com massa específica real de grãos constante, devido à segregação hidráulica elege partículas de acordo com seus pesos, e não por seus tamanhos.

Figura 1 - Modelo teórico de variação da condutividade hidráulica em depósito de rejeitos.



Fonte: SANTOS (2004)

Segundo ESPÓSITO & ASSIS (1999), no caso dos rejeitos derivados de minas de minério de ferro, um percentual dos sólidos (de 10 a 50%) é composto pelo próprio minério e o remanescente por solos arenosos. Perfis de segregação notados em campo e em ensaios de simulação mostram que próximo aos pontos de lançamento há uma predominância de partículas de menores diâmetros circunspeta por minério, depois ocorre uma zona de partículas arenosas de maiores diâmetros e, por último, afastado do ponto de lançamento, as partículas menores e mais leves. Santos (2004) apresentou um modelo teórico de variação da deposição hidráulica levando em consideração a variação do teor de ferro no rejeito, o qual é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Modelo teórico proposto por Santos (2004).



Fonte: SANTOS (2004)

O processo de segregação ocasiona em certas regiões da barragem de rejeito, zonas de alta concentração de ferro. Desta maneira, as simulações realizadas por Santos (2004) assinalam uma forte influência das características das partículas no processo de segregação.

## 2.4 Barragem de rejeito

Coube à geotecnia, a missão de assegurar a contenção ou armazenamento dos rejeitos de mineração, através das barragens, o que representa um contínuo desafio, na medida em que estas vêm aumentando seu porte ao decorrer dos anos e porque apresentariam implicações catastróficas em caso de ruptura (RESENDE, 2013).

A utilização de barragens de rejeitos é método mais difundido entre as mineradoras. Em sua construção podem ser empregados materiais compactados de áreas de empréstimo ou os próprios rejeitos, determinado assim o comportamento das barragens e suas características (SANTOS, 2007).

Rejeitos na forma de lamas, cuja granulometria se equipara a das argilas, usualmente são dispostos em barragens construídas com solo argiloso ou em enrocamento com núcleo argiloso, ocorrendo à deposição subaquática do material. Para a deposição dos rejeitos granulares, a construção mais adequada é a de barragens por aterro hidráulico, sendo o próprio rejeito utilizado para a construção dos taludes. Está técnica admite a construção de alteamentos sucessivos na barragem, mas exige a aplicação de princípios geotécnicos durante o seu projeto e construção, porque o comportamento da barragem pode ser afetado pela concentração da lama, propriedades mecânicas dos rejeitos, velocidade do fluxo de rejeitos e das características de deposição. O uso do próprio rejeito na construção das barragens é o método mais implementado devido à facilidade construtiva, disponibilidade do material e ao seu baixo custo (SANTOS, 2007).

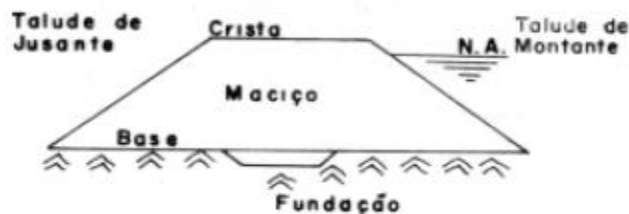
Quando as barragens são erguidas com o próprio rejeito, elas portam-se como aterros hidráulicos, que são estruturas construídas pelo transporte e deposição de solo em meio

aquoso. A maior desvantagem desta técnica é que o lançamento hidráulico de rejeitos provoca segregação hidráulica - processo fundamental na construção de aterros hidráulicos, afetando inteiramente a distribuição granulométrica e as condições de fluxo ao longo da praia.

#### 2.4.1 Métodos construtivos de barragens de rejeito

A construção e os posteriores alteamentos das barragens de rejeitos, podem adquirir diferentes configurações e características, existindo três diferentes modelos cujo nome refere-se à direção tomada pelos alteamentos em relação ao dique de partida (FIGURA 3). São eles: método de montante, método de jusante e método de linha de centro (RESENDE, 2013).

Figura 3 - Elementos do dique de partida.



Fonte: RESENDE (2013)

A escolha do método construtivo adequado deve estar atrelada a análise criteriosa da natureza e da caracterização geotécnica dos rejeitos gerados (PEREIRA, 2005), assim como outras condicionantes do projeto, tais como topografia, hidrologia, geologia, granulometria, concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura e disponibilidade de equipamentos (SOARES, 2010).

Para os três modelos, inicialmente é feito um dique de partida com material de empréstimo e ao longo do tempo são construídos os alteamentos. Os rejeitos são distribuídos ao longo da crista do dique por séries de pequenas tubulações ou por ciclones, para que haja uma formação uniforme da praia de rejeito. A sedimentação das partículas se dá em função do seu tamanho e densidade, ou seja, as partículas mais finas e leves ficam em suspensão e por segregação misturam-se a fase líquida, posteriormente, transportam-se para o centro da barragem até a bacia de decantação. As partículas mais grossas e densas depositam-se mais rapidamente próximo do dique conforme a Figura 4. A diferença entre estes métodos está na direção do alteamento em relação ao dique inicial (SANTOS, 2007).

Figura 4- Deposição das partículas em barragens de rejeito.



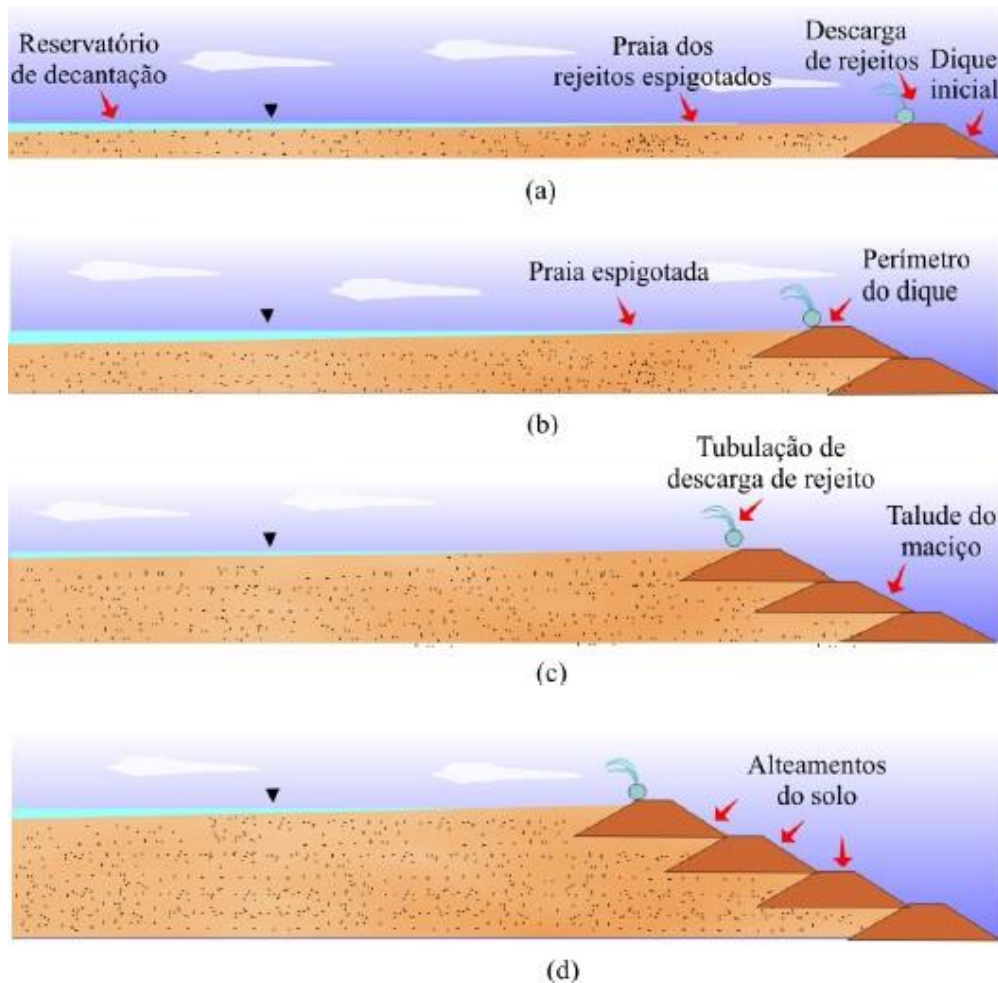
Fonte: MAIA (2015)

#### 2.4.1.1 Método de montante

Tem como critério reduzir significativamente o custo de barramento e, portanto, procura aproveitar os rejeitos depositados como parte da estrutura de contenção, construindo-se um dique inicial. Simultaneamente com a deposição dos rejeitos, vai-se alteando a barragem, construindo-se novo dique a montante do eixo do dique inicial, apoiado no próprio rejeito depositado (MAIA, 2015). Este processo continua sucessivamente, com diques sendo construídos em todo o perímetro da bacia até a cota final, determinada pelas necessidades operacionais da mina (RESENDE, 2013), conforme as etapas da Figura 5.



Figura 5 - Alçamento de barragens de rejeito por método construtivo montante.



Fonte: MAIA (2015)

Neste tipo de barragem, por razões técnicas e construtivas o rejeito é lançado por sobre a crista da barragem, de modo que haja segregações granulométricas, ficando a fração grossa depositada próxima ao maciço formando uma praia, a qual servirá de suporte ao próximo alçamento. As frações mais finas (lamas) são direcionadas ao lago de decantação, que deve ser posicionado na extremidade oposta (RESENDE, 2013).

Se os alçamentos forem construídos com rejeitos, é necessário que estes apresentem cerca de 40 a 50% de areia e que na descarga a polpa seja de alta porcentagem de sólidos por peso, para que ocorra a segregação granulométrica; esta alta porcentagem de sólidos pode ser alcançada pela ciclonagem da polpa (VICK, 1983).

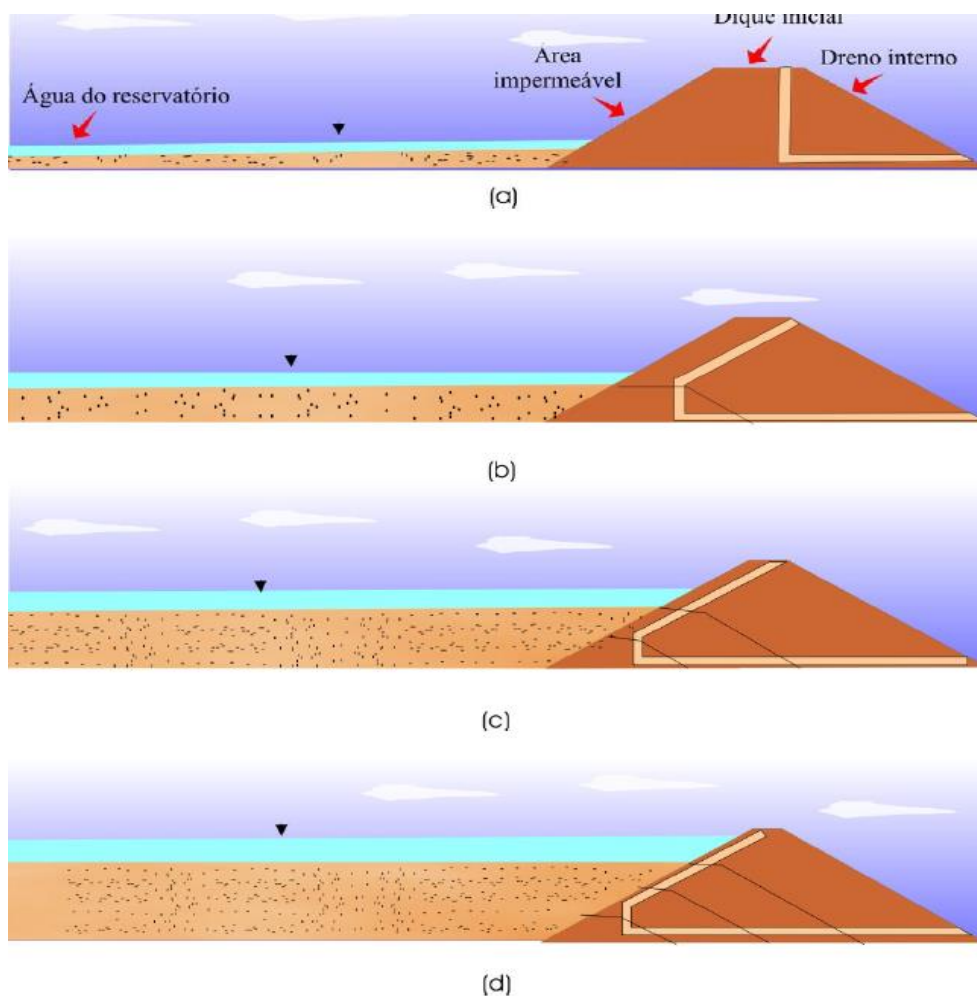
Em relação à ciclonagem, o rejeito granular (*underflow*) é aplicado como material de construção da estrutura da barragem enquanto a lama é jogada diretamente no reservatório. A utilização do rejeito granular como material de construção adéqua um aumento na

estabilidade da estrutura pela manutenção do alto coeficiente de permeabilidade do maciço, evitando que o material fino se incorpore ao aterro de construção (MACHADO, 2007).

#### 2.4.1.2 Método de jusante

Os alteamentos desta barragem se deslocam para jusante de acordo com as etapas da Figura 6. É levantado um dique inicial impermeável, o qual deve ter uma drenagem interna, composta por filtro inclinado e tapete drenante. O talude interno da barragem ou talude de montante, nos alteamentos, é impermeabilizado. A drenagem interna e a impermeabilização do talude de montante não são obrigatórias se os rejeitos possuírem características de alta permeabilidade e ângulo de atrito elevado (LOZANO, 2006).

Figura 6 - Alteamento de barragens de rejeito por método construtivo jusante.



Fonte: MAIA (2015)

Neste método, os rejeitos são ciclados e o material que sai do ciclone é lançado no talude da jusante. Somente os rejeitos grossos são utilizados no alteamento, podendo ser usado também material de empréstimo, ou estéril proveniente da lavra (LOZANO, 2006).

### 2.4.1.3 Método de linha de centro

Barragens alteadas pelo método de linha de centro oferecem uma solução intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, proporcionando vantagens dos dois métodos anteriores, na tentativa de minimizar suas desvantagens (RESENDE, 2013). Apesar disso, seu comportamento geotécnico se assemelha mais a barragens alteadas para jusante, tal qual pode se ver na Figura 7, tornando-se uma variação deste método, onde o alteamento da crista é realizado de forma vertical, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida (ARAUJO, 2006).

Figura 7- Método construtivo de linha de centro.



Fonte: ALBUQUERQUE (2004)

Neste método, o rejeito é lançado periféricamente da crista do dique até formar uma praia. O alteamento subsequente é formado lançando-se materiais de empréstimo ou estéril, sobre o limite da praia anterior e no talude de jusante do maciço de partida (ARAUJO, 2006). É possível então a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que permite o controle da linha de saturação. Este controle promove uma dissipação de poro-pressões<sup>3</sup> tornando o método adequado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade (RESENDE, 2013).

### 2.4.2 Fatores críticos na construção e operação de barragens de rejeito

A escolha do local de construção de uma barragem é considerada um fator crítico, porque a população local pode não se sentir segura com a presença da estrutura de contenção, mesmo que esta esteja distante de sua moradia (MACHADO, 2007).

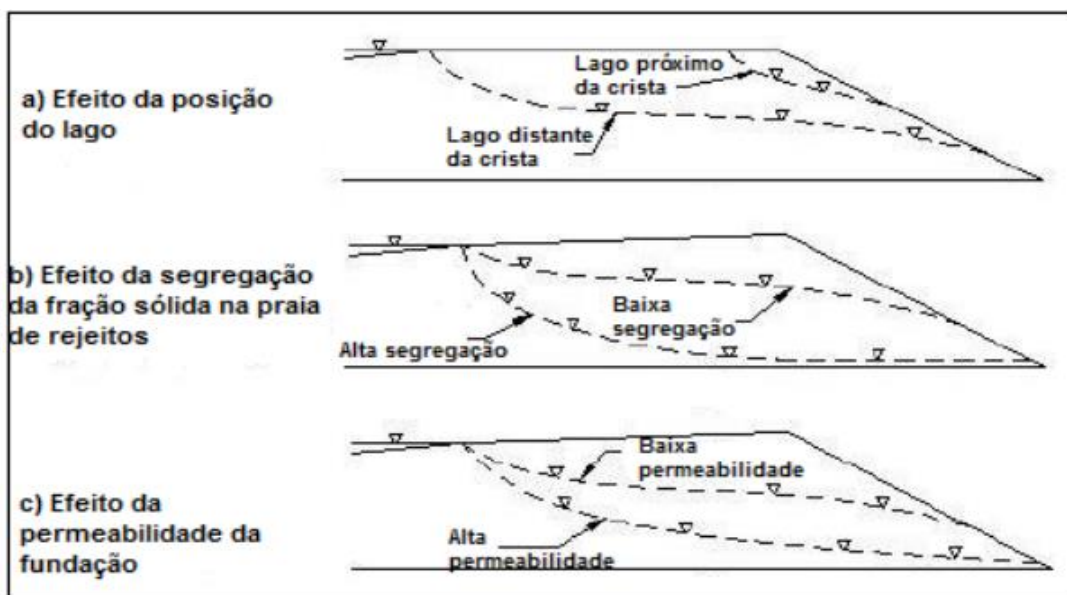
É esperada certa heterogeneidade nas barragens de rejeito, devido às diferentes épocas de alteamento e materiais utilizados provenientes de diferentes frentes de lavra. Em especial nas barragens alteadas pelo método de montante ou de linha de centro, onde os alteamentos são executados sobre rejeitos recentemente depositados, pouco consolidados, tendo como

<sup>3</sup> Poro-pressões: pressão que o fluido exerce no interior dos poros dos elementos porosos como os solos e as rochas.

consequência uma menor resistência ao cisalhamento. Além disso, não existe compactação das camadas anteriores, a não ser pelo tráfego de equipamentos durante a construção (RESENDE, 2013).

Um dos parâmetros de segurança fundamentais das barragens de rejeitos é o controle da superfície freática dentro do depósito. A água, com certeza é um dos principais fatores críticos na estabilidade de estruturas, pois diversas situações afetam o comportamento da superfície freática dentro do depósito, conforme exemplificado na Figura 8 (VALERIUS, 2014).

Figura 8 - Fatores que influenciam a posição da superfície freática dentro de um depósito de rejeito.



Fonte: VALERIUS (2014)

Outro fator crítico a ser entendido é que, não se pode confiar na eficiência dos sistemas de drenagem em barragens, devido às possíveis cristalizações impermeabilizantes ocasionadas por reações químicas no rejeito, em especial para barragens de rejeito de minério de ferro, onde a água é condicionada no reservatório tendendo apenas a sua clarificação, ficando somente o tempo necessário para garantir a decantação dos finos em suspensão. Uma vez atingidos os padrões exigidos, a água pode ser lançada no curso d'água da bacia na qual a barragem foi instalada ou então reutilizada no processo (RESENDE, 2013).

Barragens de contenção de rejeitos são tipicamente construídas em estágios, como consequência, as condições das barragens de contenção de rejeitos estão sempre se modificando com o aumento progressivo da carga dos rejeitos na fundação do reservatório com o tempo, e por isso sua segurança deve ser sucessivamente reavaliada. Uma condição estável não é adquirida até que se interrompa a operação da mina (RESENDE, 2013).

No geral, o risco de ruptura de barragens cresce à medida que há crescimento dos volumes de rejeitos produzidos; aumento da altura das barragens (maior probabilidade de ruptura) e aumento do volume do reservatório (maior potencial de dano) (MACHADO, 2007).

## **2.5 Acidentes com barragens**

Os sistemas de disposição de rejeitos exigem grande responsabilidade, pois, no caso de falhas, além de paralisar as atividades da mina afetando a produção, pode causar grandes catástrofes. Acidentes envolvendo barragens de rejeitos infligem pressões enormes nas empresas mineradoras e, ao mesmo tempo, têm compelido reavaliações de suas práticas de engenharia, de segurança e ambientais (OLIVEIRA, 2010).

Devido à densidade dos rejeitos, os estragos decorrentes de vazamentos ou de rupturas de barragens de contenção é muito maior se comparado a danos de vazamentos do mesmo volume de água. Enquanto a água pode alagar casas e outras construções, o rejeito pode empurrá-las e carregá-las junto com o fluxo viscoso (PENMAN, 1998).

Segundo Davies (2002), acidentes com barragens de rejeitos acontecem a partir de uma ou da associação de mais de uma falha, seja no projeto, na construção ou na operação de barragens, este último incluindo erro humano e também organizacional.

### **2.5.1 Erro humano**

Barragens são estruturas que demandam o trato por profissionais experientes, devido à complexidade dos impactos socioambientais envolvidos e do risco potencial que, em caso de acidente, resultam em consequências custosas para a engenharia, a sociedade e o meio ambiente, com danos significativos. Em decorrência disso, tem sido atribuído ao fator erro humano, a maior parcela de responsabilidade sobre as causas e seus efeitos (MEDEIROS & PINTO, 2014).

As inúmeras formas de manifestação de erro humano se dão normalmente pela falta de conhecimento, desatenção, a incapacidade técnica, erros de julgamento ou avaliação, erros de controle, omissão e execução de ação ou procedimento incorreto. Deve-se estar atento à ocorrência de falhas de avaliações, decisões erradas e julgamentos inadequados das pessoas ou atores responsáveis pela concepção e consecução do empreendimento. Dentre estas falhas pode-se alegar (MEDEIROS & PINTO, 2014):

- O foco obsessivo na economia a qualquer preço;
- A avaliação simplista do grau de complexidade do empreendimento;
- Omissão em assuntos relevantes;
- Inabilitação técnica para os desafios do mesmo.

### 2.5.2 Erros organizacionais

No risco organizacional os principais atores são dirigentes, gestores públicos, agências reguladoras e demais agentes cujas decisões se propagam em toda a organização (do empreendedor ao órgão fiscalizador) com impactos na qualidade e segurança do empreendimento. Pode-se afirmar, portanto, que dentre os diversos fatores de risco organizacional, merecem destaque (MEDEIROS & PINTO, 2014):

- Falta de qualificação;
- Falha na supervisão;
- Erros em procedimentos;
- Falhas no modelo de gestão;
- Fixação de prazos exequíveis;
- Falhas (ou negligência) nos procedimentos de manutenção das estruturas e equipamentos;
- Dificuldade de obtenção de Licença Ambiental nos prazos requeridos.

Segundo Dinésio Franco (2016), todos os acidentes catastróficos havidos com barragens na mineração foram ocasionados por erro humano e falhas ao não se utilizar, ou utilizar mal os conhecimentos técnicos e práticas disponíveis.

### 2.5.3 Erros de projetos

O projeto de engenharia apropriado para barragens deve realizar os estudos dos rejeitos e seu comportamento, estudos geológico-geotécnicos com sondagens e ensaios dos materiais de fundação e de construção, hidrológicos, especificação das boas técnicas de construção, além de um projeto de instrumentação para observação do comportamento da barragem. A carência no atendimento destes requisitos têm sido causa de muitos acidentes relatados (ÁVILA & BICUDO, 2014).

Em relação ao projeto, as falhas de campo mais comumente observadas para que ocorram vazamentos ou rupturas são (OLIVEIRA, 2010):

- Obstrução da estrutura vertente, com ou sem galgamento da crista;
- Quebras ou rupturas nas tubulações de rejeitos;
- Erosões superficiais provocadas por vazamentos em tubulações de rejeitos ou por lançamento inadequado desses materiais;
- Percolação pela face do maciço devido à aproximação do lago em relação à crista;
- Ruptura por cisalhamento;
- Acúmulo de material sobrecarregando a estrutura;

- Instabilidade de taludes;
- Falhas de fundação;
- Falhas estruturais.

Todas estas falhas identificadas em campo provêm de falha de projetos mal elaborados (incluindo o local escolhido); aplicação de modelos e métodos não aquedados; barragens levantadas com materiais impróprios; falta de monitoramento apropriado; rupturas originadas por falta de manutenção; gerenciamento inadequado dos rejeitos e construção desprovida de supervisão adequada ou negligência em respeito a certos estágios da construção (PENMAN, 1998).

O conhecimento dos principais lapsos associados a problemas que ameaçam a segurança das barragens de rejeitos é substancial para a compreensão da importância da operação dessas estruturas e, por consequência, para a percepção dos principais pontos que concebem riscos (OLIVEIRA, 2010).

## **2.6 Mecanismos de ruptura em barragens de rejeito**

Tendo em vista a segurança de barragens de rejeito, faz-se necessário conhecer os principais modos de ruptura a que essas estruturas estão sujeitas. Tal conhecimento contribui para melhores julgamentos e avaliações quanto às situações práticas, que por consequência promovem a correções de falhas (VALERIUS, 2014).

### **2.6.1 Ruptura por galgamento**

O galgamento procede da inaptidão do vertedouro da barragem, em extravasar inteiramente a cheia afluyente ao reservatório. Esse comportamento implica a passagem de uma parcela da vazão afluyente sobre a barragem, em locais não projetos para verter água, desencadeando a ruptura do maciço da barragem. Esse problema é particularmente perigoso para barragens compostas de material solto, como as barragens de terra (LAURIANO, 2009).

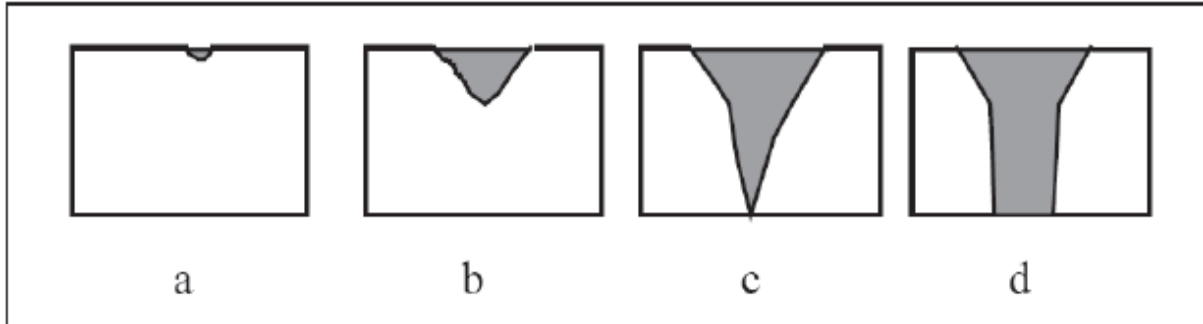
Segundo Collischonn (1997), três situações podem causar galgamento, são elas:

- Má operação do reservatório durante a cheia;
- Ocasão de uma cheia extraordinária, onde o vertedouro seja incapaz de verter essa cheia afluyente;
- Formação de uma onda dentro do reservatório, de origem sísmica ou incitada pelo deslizamento de uma grande quantidade de terra de encostas.

Se o tempo e a intensidade do galgamento são suficientes, inicia-se uma brecha em um ponto qualquer mais fraco na crista da barragem, e essa brecha crescem com o tempo, por erosão, em uma velocidade que depende do material da barragem e das características do

reservatório (COLLISCHONN, 1997). A Figura 9 apresenta a formação de uma brecha por galgamento.

Figura 9 - Formação de brecha de ruptura por galgamento: a) início em um ponto mais fraco; b) brecha em forma de V; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão.



Fonte: LAURIANO (2009)

### 2.6.2 Ruptura por liquefação

Liquefação é o fenômeno que ocorre, quando um solo arenoso em condições saturadas passa a se comportar como um material no estado líquido perdendo o atrito entre as partículas, no entanto, para que ocorra liquefação é preciso que o solo granular seja suscetível de se liquefazer, o que ocorre com as areias pouco compactadas ou “fofas” (SOUZA, 2016).

Geralmente, para solos suscetíveis desenvolverem o fenômeno da liquefação é imperativo existir condições que desencadeiem o processo, condições as quais são chamadas de gatilho. O gatilho da liquefação pode se dar por carregamentos estáticos ou por carregamentos dinâmicos, este último causado por terremotos e vibrações (RIBEIRO, 2015). Esta pesquisa abordará apenas a liquefação estática, uma vez que Minas Gerais está localizada numa região fracamente assísmica.

A liquefação estática tem sido estudada com muito menor ênfase que a liquefação associada a eventos dinâmicos, constatando-se um número ainda limitado de pesquisas e publicações relacionadas ao assunto na literatura técnica (DAVIES, 2002). A ausência de um número menor de publicações é associada ao pouco conhecimento do fenômeno ou mesmo a um conhecimento isento de explicações associadas a carregamentos não sísmicos. A liquefação estática pode estar associada a eventos tais como (PEREIRA, 2005):

- Elevação do nível d’água em depósitos de materiais granulares;
- Carregamentos rápidos;
- Movimentos de massa na área de influência dos depósitos de materiais granulares;
- Excessos de precipitação pluviométrica

Vários relatos mostram a ocorrência da liquefação estática com instabilidades iniciais em alteamentos, galgamentos, erosões internas, superfície freática elevada, dentre outros,



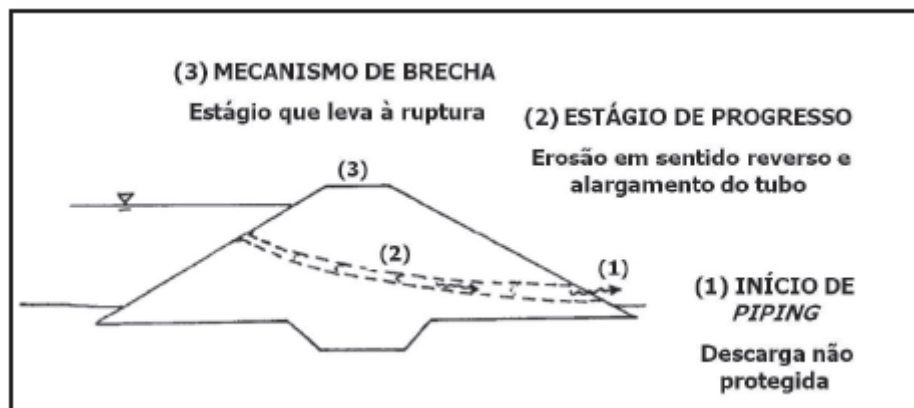
atribuindo-se estes mecanismos como disparador do fenômeno. Este papel secundário dado à liquefação estática gera muito debate a esse respeito, o que é inquietante, pois apesar de necessitar de uma instabilidade inicial para ser iniciada, é ela quem determina o potencial destruidor da ruptura (PENNA et al, 2010).

### 2.6.3 Ruptura hidráulica por “*piping*” /erosão progressiva

A perda da resistência e da estabilidade de uma massa de solo por efeito das forças de percolação é chamada de ruptura hidráulica. Quando a perda de resistência se inicia em um ponto, ocorre erosão neste local, o que provoca ainda maior concentração de fluxo nesta região; com o aumento do gradiente, surge maior erosão e assim, progressivamente, forma-se um furo que progride regressivamente para o interior do solo. Este fenômeno, conhecido pelo nome de *piping* ou erosão progressiva é uma das formas mais frequentes de ruptura de barragens (TOMÁS, 2016).

Segundo Maia (2015), *piping* é uma forma de ruptura hidráulica, que ocorre nos casos onde registra-se erosão, através de carreamento dos grãos do solo pelas forças de percolação, que, embora aconteça internamente, seu mecanismo é semelhante à erosão superficial provocada pela chuva. Seu início se dá num ponto de surgência d’água, progredindo para trás em torno de um filete d’água que arrasta os grãos, cujo resultado é a formação de um tubo, o que leva a ser conhecida também como retroerosão tubular, este processo apresenta-se na Figura 10.

Figura 10- Estágios de desenvolvimento de ruptura por *piping*.



Fonte: LAURIANO (2009)

No caso de barramentos, deve-se observar as águas que chegam ao reservatório, seja junto com os rejeitos, por precipitação direta, por escoamento superficial, por processos de evaporação, e, particularmente, aquelas que percolam pelo maciço, que merecem especial atenção (MAIA, 2015).

Os fatores condicionantes ao *piping* são (MIRANDA, 2016):

- Ausência de filtros horizontais tipo sanduíche, construídos com materiais fracamente permeáveis;
- As condições de compactação do maciço de solo;
- Ausência de transições adequadas entre materiais granulares;
- Presença de fundações arenosas.

Em todos os modos de ruptura de barragens de rejeitos, a água mesmo indiretamente, é um dos fatores desestabilizadores, tanto de forma interna como externa (VALERIUS, 2014).

## **2.7 Segurança e eficiência de barragens de rejeitos**

As barragens de rejeitos devem ser estruturas estáveis em longo prazo e integradas ao meio ambiente após a sua desativação (DITR, 2007).

Por representarem fonte de poluição em caso de rupturas e vazamentos, sua construção, desde a escolha da localização até o encerramento das atividades, deve seguir as normas estruturais, sociais, ambientais e os critérios geotécnicos e de segurança. Para tanto, torna-se imprescindível gerenciar a segurança das barragens de rejeitos, mediante sistemas que gerenciam e minimizam os riscos associados a essas estruturas, agregando conceitos e práticas de segurança à rotina operacional e à cultura dos envolvidos no gerenciamento de rejeitos (OLIVEIRA, 2010).

Para que uma barragem de rejeito mantenha os requisitos de segurança, é necessário um adequado gerenciamento, realizando avaliações de risco para cada estágio de estudo e projeto, avaliando tudo aquilo que poderia acontecer de errado com essas estruturas ou com os métodos associados à sua operação, identificando modos de falha, possibilidades de ocorrências dessas falhas e suas respectivas decorrências, resultando em uma base para o gerenciamento de todos os riscos analisados (OLIVEIRA, 2010).

Um eficiente gerenciamento de rejeitos e de seus barramentos é essencial e indispensável, para isto é necessário seguir um conjunto de diretrizes que permitirão uma operação segura, com procedimentos pré-estabelecidos focadas na manutenção da segurança dessas estruturas, na preservação do ambiente, no bem-estar social e nas expectativas de todos os envolvidos, durante toda a sua fase operacional (OLIVEIRA, 2010).

## **2.8 Mineração em Minas Gerais**

A presença da mineração em Minas Gerais é ostensiva, marcada na paisagem, no nome e na história do Estado, a atividade está presente em quase metade dos municípios

mineiros (cerca de 400). O Estado de Minas Gerais detém, há vários anos, a liderança na produção mineral do país tanto pela diversificação das substâncias produzidas, como pelos métodos de produção empregados, que vão desde o garimpo aos mais sofisticados métodos de lavra e beneficiamento (SINDIEXTRA).

O Estado é o maior produtor nacional de ferro, ouro, zinco, nióbio, fosfato, grafita, calcário e gemas, e o segundo maior produtor de minérios de alumínio e níquel; o terceiro na produção de manganês, rochas ornamentais e águas minerais, e o único produtor nacional de chumbo e lítio. Minas é também um grande produtor de minerais utilizados na construção civil como areia, brita e argila (CREA-MG, 2013).

Em Minas Gerais o método mais utilizado para disposição de rejeitos de mineração são barragens. Isso se deve ao fato da grande disponibilidade de áreas com topografia favorável, como vales encaixados e a baixa ocorrência de sismo, que favorece a implantação das mesmas (TONIDANDEL, 2011). Atualmente, existem cerca de 460 registros de barragens de rejeitos no Estado, segundo o banco de dados disponível no site da FEAM-Fundação Estadual do Meio Ambiente.

Diante das repercussões sociais e ambientais dos acidentes de grande relevância em barragens, e por ser o Estado de Minas Gerais um território onde a atividade mineradora é a base econômica, a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD, por meio da Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, iniciou em 2001 um amplo processo de debates sobre gestão de barragens de rejeitos e resíduos em indústrias em minerações, com a participação de empreendedores, consultores de notório saber, representantes de diversas entidades que atuam na área ambiental e da sociedade (ARAÚJO, 2006).

## **2.9 Legislação de barragens em Minas Gerais**

Os acidentes em barragens provocaram reações da sociedade, levando a tentativas diversas de regulamentação legal que obrigue os proprietários de barragens a tomarem providências efetivas de redução de riscos (ÁVILA, 2016). No Brasil, as tentativas de regulamentação legal vêm sendo feitas há mais de trinta anos, no entanto, somente em 2010, resultaram em uma Legislação Federal sobre segurança de barragens (Lei 12.334/2010).

As barragens de rejeito presentes no Estado de Minas Gerais são fiscalizadas, quantificadas e cadastradas pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, juntamente com a SEMAD (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável).

O acidente com a barragem de rejeitos da Mineração Rio Verde, em 2001, foi determinante para que se iniciasse um novo marco sobre as políticas ambientais relacionadas ao setor mineral, principalmente sobre normas regulamentadoras de barragens. Neste mesmo ano, a FEAM coordenou a elaboração de regulamentação específica, que foi discutida com representantes das empresas mineradoras, corpo docente de universidades, empresas de engenharia e também com consultoria especializada, dando origem às Deliberações Normativas, DN 62/2002, DN 65/2003, DN 87/2005 e DN 124/2008 do Conselho Estadual de Políticas Ambientais - COPAM. As barragens de rejeitos em MG somente são licenciadas se atenderem aos requisitos destas regulamentações (TONIDANDEL, 2011).

A Legislação Estadual de Minas Gerais adota e institui a necessidade da implantação de sistemas de gestão aplicados às barragens de rejeitos, com o objetivo de garantir a segurança dessas estruturas durante a sua implantação, construção, operação e fechamento, tendo em vista a diminuição do risco. A Legislação Estadual também institui a obrigatoriedade da apresentação do Manual de Operação da barragem de rejeitos e de suas estruturas complementares (OLIVEIRA, 2010). Os outros itens obrigatórios que devem constar no sistema de gestão de barragens são: o relatório como-construído (as *built*), o próprio projeto executivo da estrutura, o plano de contingência, a análise do desempenho da barragem, o plano de desativação, além da efetivação de auditorias periódicas de segurança (COPAM, 2002).

De um modo geral, a FEAM atua como participante das incursões fiscalizadoras do Comitê Gestor de Fiscalização Ambiental Integrada (CGFAI) auxilia no atendimento a emergências, notificam os proprietários de barragens a respeito de irregularidades, monitora a devida implantação das recomendações decorrentes do processo de auditoria das barragens de contenção de rejeitos, além de gerenciar as informações sobre o cadastro de barragens (OLIVEIRA, 2010).

As SUPRAM'S - Superintendências Regionais de Meio Ambiente, atuam no licenciamento de novas barragens, no licenciamento de alteamento e na revalidação de licenças das barragens em operação, na fiscalização das barragens de rejeitos, no monitoramento do cumprimento de condicionantes ambientais (OLIVEIRA, 2010).

Após o acidente na Barragem de Fundão no município de Mariana/MG, surgiu o Decreto nº 46.933/2016 que propõe alterações nas normas de disposição de rejeitos de mineração em Minas Gerais. O novo Decreto suspendeu por tempo indeterminado a utilização da técnica de alteamento a montante para a construção de novas barragens e para a execução de obras de ampliação nas barragens existentes. Quanto às ampliações já feitas em barragens

existentes, elas têm prazo até 1º de setembro de 2016 para passar por Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragens e obter dela, sendo o caso, uma Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade. A mineradora sujeita à Declaração deverá apresentar ao mesmo tempo um Plano de Ação descrevendo as medidas emergenciais que tomará em caso de problemas na estrutura da barragem (CRUZ, 2016).

Por meio da Resolução Conjunta 2.371/2016, divulgada no Diário Oficial do Estado em 07/05/2016, foram postas as diretrizes para a realização da Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragens, para a emissão da correspondente Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade e para a apresentação do Plano de Ação de que trata o Decreto 46.993/2016 (CRUZ, 2016).

## **2.10 Fiscalização de barragens em Minas Gerais**

Através da lei 12.334 de 2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens, foi criado o Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNISB), o qual determina os procedimentos a serem seguidos pelos técnicos do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) durante a fiscalização das barragens de rejeito. O controle é feito por análises documentais verificando o atendimento à legislação vigente e vistoria de campo, que envolve a realização de verificação in loco de múltiplos aspectos referentes à operação, manutenção, monitoramento, e de segurança (MINÉRIOS & MINERALES, 2015).

No entanto, o excecível número de fiscais compromete o trabalho de fiscalização e aplicação das leis – o DNPM conta com 200 técnicos especialistas para realizar o controle de todas as barragens de contenção de rejeitos. – de acordo com a própria direção do departamento, o número é insuficiente para atender todas as estruturas (MINÉRIOS & MINERALES, 2015).

Após a tragédia de Mariana (MG), a legislação de segurança de barragens está sendo revisada, com o desígnio de avaliar a Política Nacional da Segurança de Barragens e do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. O DPMN também divulgou que necessita rever toda a normatização da área e contratar novos consultores para auxiliar no estudo em relação às barragens de mineração (MINÉRIOS & MINERALES, 2015).

Estes esforços que visam o controle e a fiscalização de barragens de rejeito foram motivados por acidentes anteriormente ocorridos, que causaram a mobilização não apenas da sociedade civil, mas também de entidades ambientais e estudiosos, com o objetivo de adequar os métodos e tecnologias para a diminuição de riscos das estruturas de contenção de rejeitos.

### 3 - ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Acidentes com barragem de rejeitos em Minas Gerais

Em Minas Gerais, ocorreram seis grandes acidentes envolvendo barragens de rejeito (QUADRO 1), os quais serão tratados com mais detalhes ao longo do capítulo.

Quadro 1- Acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais.

<b>ANO</b>	<b>BARRAGEM—MUNICÍPIO</b>	<b>PRINCIPAIS DANOS</b>
1986	Itaminas – Fernandinho – Itabirito	7 mortes
2001	Rio Verde – Cava C1 – Nova Lima	5 mortes
2006	Rio Pomba Cataguases – São Francisco - Mirai	Vazamento de rejeitos de bauxita. Interrupção de fornecimento de água
2007	Rio Pomba Cataguases – São Francisco - Mirai	Vazamento de rejeitos de bauxita. Interrupção de fornecimento de água
2014	Herculano – Retiro do Sapecado – Itabirito	3 Mortes
2015	Samarco – Fundão – Mariana	17 Mortes

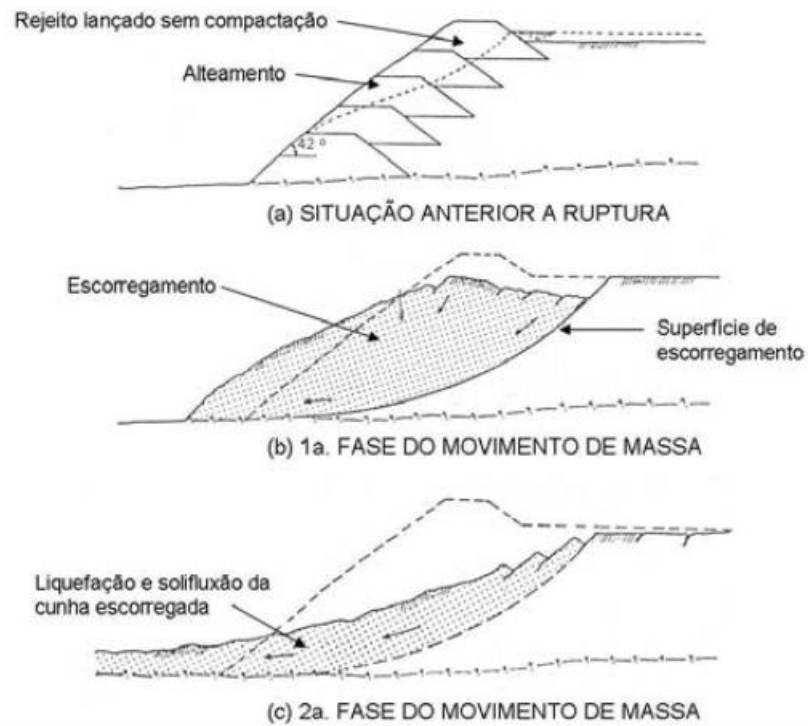
Fonte: elaborado pela autora

##### 3.1.1 Itaminas - Mina Fernandinho (1986)

A ruptura da barragem de contenção de rejeitos da Mina de Fernandinho, de propriedade da Itaminas Comércio de Minérios S/A, situada no município de Itabirito, em Minas Gerais, aconteceu em maio de 1986, envolvendo cerca de 350.000 m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro com registros de mortes. A ruptura dessa estrutura é narrada por Parra & Lasmar (1987).

Segundo esses autores, baseados em relatos de testemunhas, a ruptura teria ocorrido em duas etapas conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11- Fases da ruptura da Mina de Fernandinho.



Fonte: PARRA & LASMAR (1987)

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 (FIGURA 12) associado à formação de uma onda de lama fluida em alta velocidade, que desceu vale abaixo, arrasando completamente a vegetação local (PEREIRA, 2005).

Figura 12 - Cicatriz deixada pela ruptura da Barragem de Fernandinho.



Fonte: PARRA & LASMAR (1987)

A barragem de 40 m de altura, ainda em operação, vinha sendo alteada, estando o nível do seu topo cerca de 2 metros acima do rejeito confinado no reservatório. De acordo

com Parra & Lasmar, 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 (PEREIRA, 2005).

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 metros, sem nenhum controle de compactação. Diante disso, o maciço apresentava uma estrutura precariedade compactada, com densidade relativamente baixa (PEREIRA, 2005).

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, provocando condições não drenadas. Isso se explica pelo fato de que, as partículas de ferro tendem a compor a fração mais fina do rejeito e, motivo pelo qual, amostras com maiores teores de ferro oferecerem menores valores da condutividade hidráulica (PEREIRA, 2005).

Estando 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 uma tendência à 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).

Os sinais deixados pelo acidente impressionaram pela rapidez com que se desenvolveram, pela velocidade alcançada e pelo alto grau de fluidez da massa envolvida. Em gargantas situadas a jusante, irregularidades do terreno que poderiam ter aprisionado parte da massa em movimento ficaram vazias, evidenciando o caráter de reduzidas viscosidades do fluido. (PARRA e LASMAR, 1987).

Nas margens, havia sinais de grandes desníveis nas alturas alcançadas pela onda de lama. Toda a vegetação e o solo superficial foram removidos pela força da massa em movimento, deixando uma superfície com aspecto desértico. Apresenta-se na Figura 13 uma vista aérea da barragem de Fernandinho e do talvegue a jusante após a ruptura (MELO, 2013).



Figura 13 - Vista aérea da barragem e do talvegue a jusante após a ruptura.



Fonte: PARRA & LASMAR (1987)

### 3.1.2 Mineração Rio Verde – Cava C1 (2001)

A Mineração Rio Verde realiza no município de Nova Lima/MG, atividades de exploração de ferro e conseqüentemente a disposição de seus rejeitos. No ano de 2001, a contenção de rejeitos era realizada em uma antiga cava, denominada cava C1, a qual se localizava ao extremo norte da mina. Essa antiga cava passou a ser usada como depósito de rejeitos, quando sua operação foi interrompida em 1990 devido às restrições impostas pela própria geometria da cava, que tinha 500 m de comprimento, 120 m de largura e 100 m de profundidade (DINIZ, 2006).

Os rejeitos de granulometria fina e com elevado teor de ferro, eram lançados ao extremo sul da estrutura de contenção e se sedimentavam ao longo da mesma. De acordo com as características de deposição comuns a este tipo de situação, as partes grossas e mais pesadas dos rejeitos se sedimentavam mais rapidamente, enquanto que o material fino com líquidos se dirigia para a zona norte da barragem. O direcionamento da fração fina com líquidos para as proximidades da borda norte, somado a inexistência de um sistema de drenagem interna, contribuiu claramente para a elevação do nível freático da barragem, atingindo níveis inaceitáveis (DINIZ, 2006).

No segundo semestre de 1994, a barragem C1 alcançou os limites de altura da cava, começando assim a segunda fase do projeto, com a implementação de diques de contenção ao longo das bordas norte e leste da barragem. Para isto, começaram a ser executados alteamentos pelo método de montante com altura de 10m por 15m de largura. No entanto, os

últimos taludes realizados antes da ruptura eram visivelmente menores do que o informado e também não foram identificados instrumentos de monitoramento ao longo da estrutura (DINIZ, 2006).

Em 22 de junho de 2001, ocorreu a ruptura da borda nordeste deste sistema de contenção, cuja o alteamento se encontrava a 20m acima da cota da crista da barragem, a qual já estava com alturas superiores a 40m em relação as bordas. Neste momento, o perímetro da estrutura de contenção era de aproximadamente 1130m, com uma seção transversal de 45.300 m<sup>2</sup> e com taludes com inclinações médias de aproximadamente 1V:1.8H. Vale a pena ressaltar, que esta inclinação de talude é muito acentuada para este tipo de estrutura. A ruptura apresentou dimensões de mais ou menos 330m de largura ao longo da barragem de rejeito, que liberou imediatamente 530.000m<sup>3</sup> de rejeitos acumulados (DINIZ, 2006).

O material deslizou rapidamente devido a topografia extremamente acidentada da área, alcançando uma extensão de aproximadamente 6,3km de distância, com uma largura média estimada de 60 metros e uma altura total de 400 metros. Observou-se que em alguns lugares houve a deposição destes rejeitos em depressões ao longo do caminho, enquanto que em outros, a lama expôs o solo a erosão e causando novas instabilidades, a Figura 14 mostra a vista da barragem de rejeito após a ruptura (DINIZ, 2006).

Figura 14 - Vista da barragem de rejeitos da mineração Rio Verde após a ruptura.



A ruptura da barragem de contenção de rejeitos da Mineração Rio Verde, matou cinco operários, destruiu a principal via de acesso, soterrou parte do município de São Sebastião das Águas Claras e devastou 79 hectares de Mata Atlântica. Cerca de 600 mil m<sup>3</sup> de rejeitos alcançaram o córrego Taquaras e 30 hectares de uma área de proteção ambiental na região (CETEM, 2016).

A mineração Rio Verde promoveu alteamentos sucessivos na Cava C1 sem o devido licenciamento ambiental de forma intencional, não cumprindo as normas técnicas exigidas, pois, no procedimento de licenciamento consta apenas um alteamento de 10 metros, no entanto, foram realizados mais dois alteamentos os quais não foram licenciados pelo órgão competente. Desta forma, não houve a elaboração de projeto executivo da obra, considerando as informações geotécnicas necessárias à avaliação precisa da situação de risco, e nem a intervenção de responsável técnico para acompanhar a execução da mesma (COMARCA DE NOVA LIMA, 2007).

Além do número de alteamentos, outras possíveis causas para o incidente foram: geometria inadequada dos alteamentos; método de lançamento dos rejeitos no reservatório; e a inexistência de sistema de drenagem e filtração interna. A associação destes fatores levou à situação de talude crítica, com elevação excessiva da superfície freática e consequente ruptura (DINIZ, 2006).

As seguintes observações técnicas foram consideradas no laudo do acidente (GOMES, 2001):

- Erro no método de lançamento dos rejeitos no reservatório a montante, mantendo uma lâmina de água afastada da estrutura de contenção. Neste Caso, o lançamento ocorreu contra a corrente e em direção ao dique;
- Falta de análise das características do rejeito por meio de ensaios de laboratório e/ou campo, buscando avaliar a capacidade de carga da barragem considerando a cimentação dos rejeitos antes de utilizá-los como base para novos alteamentos;
- Falta de dispositivos de drenagem interna;
- Falta de monitoramento da estrutura de contenção e encostas durante a operação, identificando as variações no nível da água e a ocorrência de pequenos deslocamentos, dentre outros indícios de mau desempenho.

Entidades ambientalistas atribuíram o rompimento da barragem de rejeitos da Mineração Rio Verde ao descaso dos governos estadual e federal na inspeção das atividades mineradoras (CETEM, 2016). As fiscalizações da cava C1 foram realizadas pelo agente B.M.J da FEAM ( Fundação Estadual do Meio Ambiente) - nos dias: 05 de abril de 1991; 16

de agosto de 1994; 24 de novembro de 1994; 27 de março de 1995; 13 de dezembro de 1995; 19 de janeiro de 1996; 26 de abril de 1996; 09 de janeiro de 1997; 02 de outubro de 1997; 26 de agosto de 1998; 02 de março de 1999; 17 de dezembro de 1999; 10 de maio de 2000; 14 de junho de 2000; 11 de outubro de 2000; 09 e 10 de maio de 2001, ou seja a última inspeção foi realizado no mês anterior ao de ruptura (COMARCA DE NOVA LIMA, 2007).

A comissão de sindicância do conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Minas Gerais (CREA-MG), concluiu que o acidente decorreu da construção de uma obra sem a noção de técnicas adequadas, desconsiderando normas e regulamentos pertinentes descumprindo da legislação ambiental e de segurança de barragens (COMARCA DE NOVA LIMA, 2007).

O rompimento da barragem provocou ações cíveis e penais na Justiça mineira e em junho de 2007, dois engenheiros da mineradora foram condenados a oito anos e oito meses de prisão, em regime fechado, por crime ambiental. Incidiram contra eles crimes contra a flora, a fauna, a unidade de conservação, e alegações de inadimplência das exigências do licenciamento ambiental (CETEM, 2016). A decisão foi da Comarca de Nova Lima/MG, ficando provado que o evento lesivo era previsível pela Mineradora Rio Verde, já que a obra de alteamento além de ser ilegal não cumpria com as exigências de segurança e que a mineradora em questão não tomou as medidas de precaução, assumindo assim os riscos por falta da mesma. A implementação das medidas de precaução importaria ônus de natureza econômica para a empresa a qual optou por evitar a realização de maiores despesas (COMARCA DE NOVA LIMA, 2007).

### 3.1.3 Rio Pomba Cataguases – São Francisco (2006-2007)

A empresa de mineração Rio Pomba Cataguases, situada no município Miraí, em Minas Gerais foi responsável por dois acidentes com a mesma barragem em menos de um ano. O primeiro acidente com a barragem São Francisco ocorreu em 1º de março de 2006, com uma abertura entre as placas do vertedouro, havendo o vazamento de 400 mil metros cúbicos de lama, misturados com resíduo de bauxita (CETEM, 2012).

O acidente deveu-se ao deslocamento ocorrido entre as placas reguladoras de vazão dos vertedores, tipo tulipa, gerando uma fenda de 96 cm de comprimento por 5 cm de largura. Dos 400 mil metros cúbicos de lama (argila e água, sem material tóxico), 135.000m<sup>3</sup> encaminharam-se para as águas do Córrego Bom Jardim (FIGURA 15) (CETEM, 2012).

Figura 15 – Vertedor lançamento lama diretamente no Córrego Bom Jardim.



Fonte: FEAM (2006)

Os rejeitos foram lançados no córrego bom jardim por 36 horas, ocasionando uma série de impactos ambientais em grandes proporções nas áreas de jusante, como (CETEM, 2012):

- Inundação de áreas agriculturáveis;
- Aumento de turbidez das águas do Córrego Bom Jardim, Ribeirão Fubá e Rio Muriaé;
- Eliminação de ecossistemas ribeirinhos;
- Interferência na biota aquática com mortandade de peixes.
- Interferência no consumo de água das cidades de jusante como: Lage de Muriaé e distritos de Retiro e Comendador Venâncio, em Itaperuna, no Estado do Rio de Janeiro.

Em 2007, a barragem São Francisco já estava no seu limite e, com as fortes chuvas que caíram sobre a região, cerca de 2 milhões de m<sup>3</sup> de lama, contendo água e argila, vazaram, envolvendo as cidades de Mirai e Muriaé, alcançando aos rios Fubá e Muriaé, alcançando cidades mineiras e fluminenses, sendo este o segundo acidente envolvendo a São Francisco (CETEM, 2012).

Em resposta à solicitação do promotor de Justiça de Mirai, devido ao acidente anterior com a mesma barragem, técnicos do Ministério Público já haviam realizado vistorias e emitido os respectivos laudos onde ressaltaram, entre outros problemas, processos erosivos em uma das ombreiras da barragem e em sua base, com recomendação para adoção das providências cabíveis para resolver o problema, sob administração e orientação de profissional técnico certificado, com anotação de responsabilidade técnica (LARCHER, 2012).

Na última inspeção, feita pouco mais de 2 meses antes do segundo rompimento, apurou-se um alteamento não liberado na barragem, visando aumentar sua vida útil, constatando os técnicos do Ministério Público mineiro que o vertedouro da barragem ficou em nível mais alto que a própria barragem. Foi aconselhado pelos técnicos do Ministério Público que a empresa expusesse ao órgão ambiental um projeto como-construído “as *built*” das modificações realizadas, bem como tomar as providências cabíveis para aumentar o coeficiente de segurança da barragem até níveis satisfatórios (LARCHER, 2012).

Excepcionalmente, poucos dias antes de uma nova inspeção para apurar a execução das exigências, mais precisamente na madrugada do dia 10 de janeiro de 2007, durante fortes chuvas que atingiram a região, a barragem galgou (FIGURA 16), causando ruptura e os danos já narrados (LARCHER, 2012).

Figura 16- Vista da barragem de rejeitos após ruptura.



Fonte: LAURIANO (2009)

Em vistoria no local, técnicos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) averiguaram que a barragem de rejeito aferia aproximadamente 35 m de altura e que cerca de 70% do material antes armazenado acabara vazando. O percentual do material que havia sobrado poderia também verter caso a chuva permanecesse forte. Os técnicos informaram, ainda, que a empresa e a Defesa Civil estavam levantando uma barreira de contenção da lama vermelha restante no barramento. Perante flagrante de acidente ambiental e poluição das águas, os técnicos do DNPM solicitaram a interrupção imediata das atividades de mineração da empresa (DNPM, 2007).

Em um balanço da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), publicado em março de 2007, a mineradora foi culpada pelo acidente, já que sua causa foi uma falha na estrutura da barragem não sanada pela Mineração Rio Pomba. O documento assinala um desnível na parte superior da barragem, onde existia uma escada de acesso ao local. Também foi registrado que o vertedouro (dispositivo que serve para escoar o excesso de água que chega ao reservatório durante o período de chuvas) de emergência, à direita da barragem, não contava com o revestimento apropriado à passagem do fluxo de água. Eis a razão de a barragem ter cedido às chuvas intensas da época (CETEM, 2012).

#### 3.1.4 Herculano – Retiro do Sapecado (2014)

No ano de 2013 uma auditoria já apontava problemas na barragem da Mina do Retiro do Sapecado pertencente a Herculano Mineração, que se rompeu em setembro de 2014 em Itabirito, na região Central de Minas Gerais. 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, as mesmas foram atestadas que não comprometeriam a estrutura, uma vez que o auditor garantiu a estabilidade da barragem (CÂMARA, 2014).

No local operavam quatro barragens denominadas B1, B2, B3 e B4 (FIGURA 17). As estruturas B1 e B4 eram utilizadas unicamente para armazenagem 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 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, almejando produzir, mas sem onde poder alocar os rejeitos (EMERICH, 2015).

Figura 17 - Demonstração das estruturas (barragens B1, B2, B3, B4 e beneficiamento) do empreendimento, vale do afluente do córrego do Silva e local do rompimento da barragem B1 (linha em vermelho).



Fonte: Google Earth (2015)

A Herculano então voltou a utilizar a barragem B1 de forma irregular. Sem licenças ambientais ou projetos, foram criadas quatro valetas com dimensões estimadas de aproximadamente 150 x 10m cada baía, sobre os rejeitos sedimentados no topo da barragem B1 aumentando a área de armazenamento, sendo que no momento da ruptura da B1, uma quinta valeta estava sendo construída, parte destas valetas podem ser vistas na Figura 18 (EMERICH, 2015).

Figura 18 - Vista do local de ruptura e baias restantes utilizadas no lago de deposição da B1.



Fonte: SUPRAM (2014)



O rompimento de parte da barragem aparentemente ocorreu de cima para baixo, tendo a ruptura alcançado duas baias e meia, que estavam localizadas próximas ao maciço da barragem na sua porção oeste. Próximo às quatro baias que estavam sendo utilizadas no beneficiamento do minério havia pessoas trabalhando que acabaram sendo carreadas com o deslizamento, ocasionando o falecimento de dois trabalhadores e o desaparecimento de outro (SUPRAM, 2014).

O colapso da estrutura alcançou o corpo da barragem na porção noroeste (crista e taludes de montante e jusante - perto dos pontos 611555,98/7760306 a 611734,51/7760439,233 no sentido norte/sul). O escoamento de massa incidiu no sentido leste/noroeste e posteriormente foi dirigido para o sentido norte/sudoeste, que é o sentido da calha do córrego do Silva. O movimento de massa, proveniente do colapso causou assoreamento do córrego a montante e jusante da B3, acontecimentos expostos nas Figuras 19,20 e 21 (SUPRAM, 2014).

Figura 19 - Vista de frente do movimento de massa proveniente do colapso da B1.



Fonte: SUPRAM (2014)

Figura 20 - Calha do curso d'água (vale encaixado) afluente do córrego do Silva a jusante da B3, afetado pelo rompimento da B1.



Fonte: SUPRAM (2014)

Figura 21 - Detalhe do curso d'água afluente do Silva a jusante e próximo da B3.



Fonte: SUPRAM (2014)

A Barragem B2, que foi completamente danificada, recebeu inicialmente a maior parte do movimento de massa proveniente do colapso da B1 sendo que em seguida, a B3 (parcialmente danificada e galgada) veio a receber e conter considerável volume material deslizado no vale a seu montante conforme Figura 22 (SUPRAM, 2014).

Figura 22 - Vista do material do rompimento da B1 retido no vale a montante da B3.



Fonte: SUPRAM (2014)

A investigação constatou que as barragens passaram por auditorias em 2012 e 2013 pela empresa ENGEO, sendo apontadas diversas falhas, inclusive a falha da drenagem e falha dos sistemas de monitoramento. Mesmo com as informações, a Herculano continuou a operação e não sanou os problemas. Além disso, também apresentou informações falsas ao órgão fiscalizador do governo do Estado (EMERICH, 2015).

Embora tenha sido informado no Relatório de Avaliação Ambiental (RADA) que “... assim que a barragem B4 for disponibilizada, não somente a B1 deixará de ser utilizada, como a última camada de material depositado, durante o período de funcionamento da usina de concentração, será removida e encaminhada para nova barragem, liberando também o material de seu substrato para recuperação (PA COPAM Nº 00020/1988/004/2005 pag132 e 133.)”, no entanto, foi observado através de resolução temporal do Google Earth que a operação da B1 não foi interrompida, sendo constatada a evolução e rearranjo da área considerada como Dique 1 dentro da B1, inclusive com alteamento do maciço não sendo avisado e nem requerido licenciamento ambiental junto a SUPRAM Central (SUPRAM, 2014).

Resultados iniciais de perícia encomendada pelo Ministério Público de Minas Gerais mostram que a barragem B1 da Herculano Mineração, irrompeu por causa da instabilidade do talude localizado imediatamente abaixo de plataformas (bacias) de secagem de rejeitos, devido à saturação de água na B1 e a carência de drenagem na estrutura, o que originou a elevação do nível freático no interior da barragem (FIGURA 23) (VALE, 2014).

Figura 23 - Vista do local no lago de deposição de rejeitos da B1 no limite da ruptura e trinca longitudinal.



Fonte: SUPRAM (2014)

### 3.1.5 Samarco – Fundão e Santarém (2015)

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. Até a data do acidente, o complexo contava com três barragens de rejeitos, denominadas Santarém, Fundão e Germano. A Figura 24 mostra a disposição das mesmas no complexo (BACIA DO RIO DOCE, 2015).

Figura 24 - Barragens de rejeito do Complexo Industrial Germano.

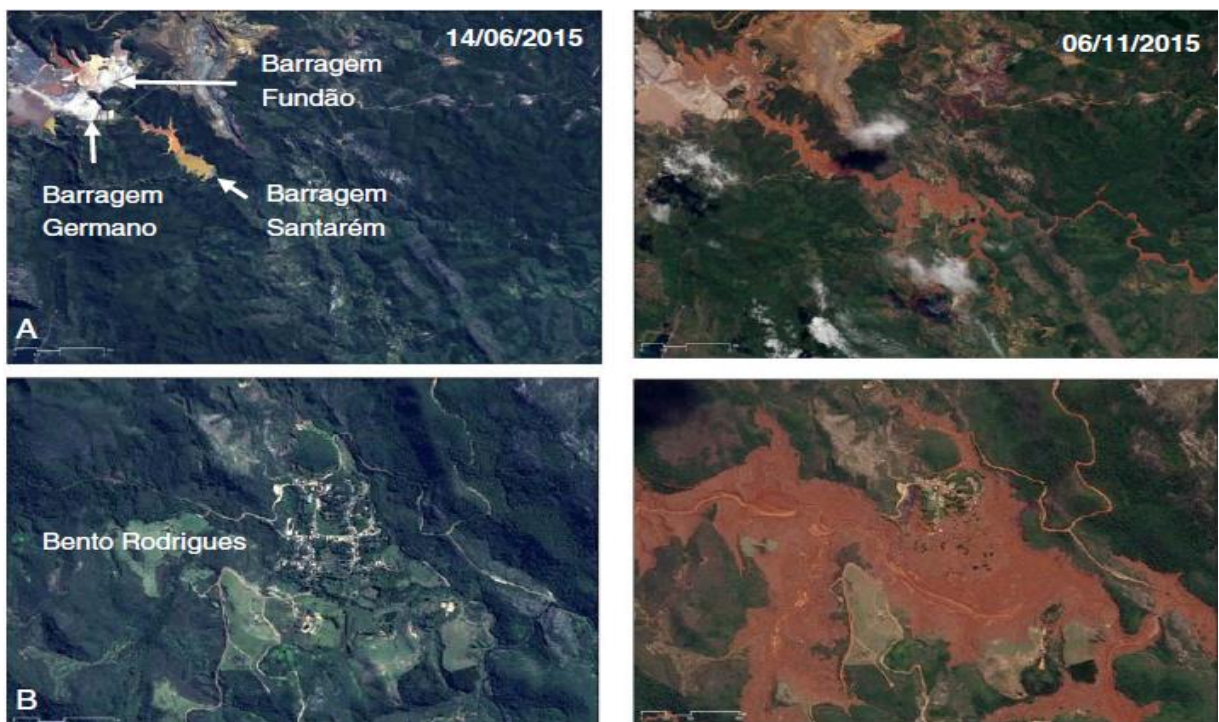


Fonte: IBAMA ( 2015)

O volume armazenado na barragem de Fundão no dia da ruptura, era de cerca de 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro, no entanto, as informações inseridas no Banco de Declarações Ambientais da FEAM, informa que a barragem poderia armazenar somente 45.000.000 m<sup>3</sup> de rejeitos. O rompimento da estrutura de contenção, liberou um volume estimado de 34 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos, causando diversos impactos socioeconômicos e ambientais, ficando os outros 16 milhões de m<sup>3</sup> depositados nas adjacências da barragem (IBAMA, 2015).

A ruptura causou um efeito em cadeia, provocando o galgamento da barragem Santarém que acumulava água. Dessa forma, quando o material contido na barragem rompida chegou a Santarém, a água ali contida diluiu ainda mais o rejeito aumentando a velocidade da lama, causando grande dano. A barragem Santarém, concebida para armazenamento de rejeito e água, localiza-se a jusante das barragens Germano e Fundão. Encontrava-se com 33,1 metros de altura do maciço e 0,76 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de volume, segundo dados do Relatório de Auditoria da estrutura de 2015. A onda de rejeitos galgou o barramento de Santarém erodindo severamente o talude de jusante, descalçando o pé do talude e comprometendo a saída do dreno interno e a própria estabilidade do maciço (FEAM, 2016).

Figura 25 - Imagens de satélite das barragens da Samarco (A) e do povoado de Bento Rodrigues (B).



Fonte: IBAMA (2015)

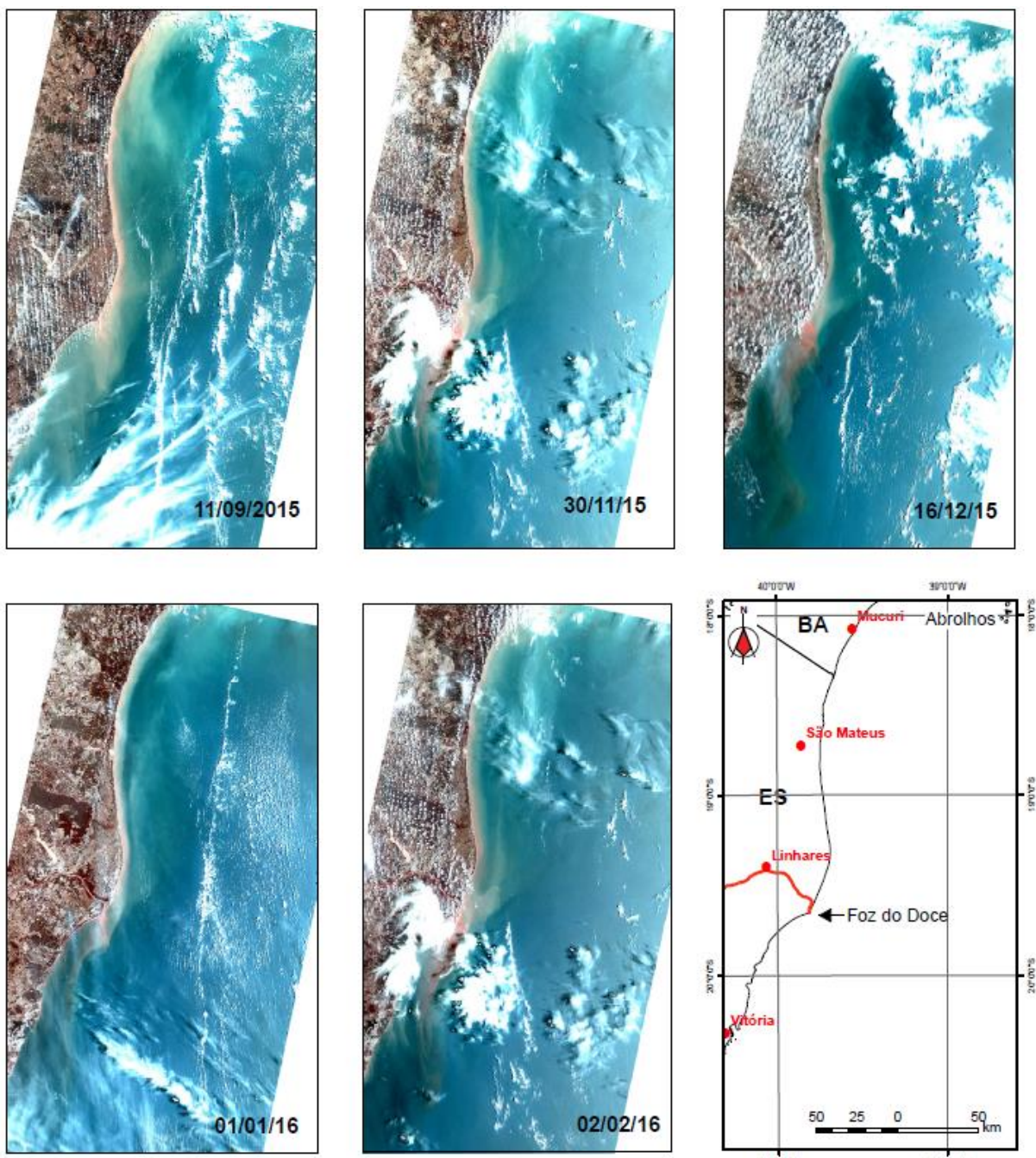
A ruptura da barragem deixou dois desaparecidos e 17 mortos. A enxurrada de lama gerou transtornos em cidades de Minas Gerais e do Espírito Santo. Dentre os distritos

mineiros atingidos, Bento Rodrigues se destaca, pois foi praticamente extinguido pela lama, a Figura 25 mostra imagens temporais da barragem e do Distrito de Bento Rodrigues, antes e depois da ruptura (MARENGO, 2015).

Além da tragédia social, os impactos ambientais também foram significativos: depois de contaminar o Rio Doce, a lama alcançou ao Oceano Atlântico, no Espírito Santo, no litoral sul da Bahia e o Arquipélago de Abrolhos conforme imagens temporais da Figura 26 (MARENGO, 2015).

Figura 26 - Série temporal de imagens do satélite Landsat 8 da região da foz do Doce

Nota: Composição colorida de bandas R3G2B1.



Fonte: IBAMA (2015)

A barragem de 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: acertar as irregularidades geométricas pontuais do talude de jusante; revegetar as áreas desprotegidas do talude do dique 1 e ombreira direita; 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 (OLIVEIRA, 2015).

Pela análise destas 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 à aparição de surgências (OLIVEIRA, 2015).

Na data do rompimento, 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 (CORREIA & MAGALHÃES, 2016).

Cerca de 40 dias após o ocorrido, ainda não estavam claras as causas do acidente, mas a Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Minas Gerais (SEMAD) conjuntamente com o Ministério Público de Minas Gerais deram início a apuração dos fatos, incluindo a análise dos documentos de licenciamento ambiental, os quais já apresentavam irregularidades (MARENGO, 2015).

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 cedida, em 2007, sem que a mineradora apresentasse o projeto executivo, que reúne todas as informações de uma intervenção deste porte (MARENGO, 2015).

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 o mesmo 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 de Fundão, teve início no chamado “recuo”, na região próxima à “ombreira” esquerda, de forma abrupta. De acordo com as provas testemunhais e documentais que constituem parte dos inquéritos civis dirigidos pelo MPMG, em 2013, 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 o almejado (CNPG, 2016).

Consta no relatório que, a ruptura da barragem de Fundão ocorreu sob condições não drenadas, ocasionada pela ocorrência de uma camada de baixa permeabilidade e resistência proporcionando assim resíduos altamente heterogêneos na sua fundação (CNPG, 2016).

Quando a altura da barragem chegou a uma elevação de 864m, a tensão e cisalhamento horizontal aumentaram junto com elevação da crista. A barragem atingiu seu estado crítico com a altura de 898m em função da permeabilidade, da resistência ao cisalhamento da zona fraca onde ocorreu o recuo, associada à taxa de elevação da barragem, ao nível d'água e, sobretudo, pela altura da estrutura (CNPG, 2016).

Para elucidar a ruptura rápida e catastrófica, os rejeitos na base da barragem careciam 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), a qual ocorreu, no local onde foi feito o recuo do eixo. Sete fatores contribuíram para que surgisse o processo de liquefação (MINAS, 2016):

1. Alta saturação dos rejeitos arenosos sedimentados na Barragem de 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 poro-pressões junto aos rejeitos arenosos depositados e também dos rejeitos constituintes dos diques de alteamento.



3. Muitos equipamentos de monitoramento estavam com defeito, não sendo concretizadas, inclusive pelo pessoal da VOGBR, as referentes 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 (cerca de 20m de altura por ano, em média). 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 modelo construtivo escolhido nos alteamentos, no caso, alteamento à montante, só agravou os acontecimentos. Para Carlos Barreira Martinez, coordenador do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), se o projeto construtivo fosse outro, a probabilidade de que esse evento desastroso não ocorresse era palpável e que apesar de previsto em norma, este modelo não deveria ter sido utilizado (MISLEH, 2015).

Especialista em segurança de barragens, o engenheiro civil Daniel Prenda de Oliveira Aguiar explica: “Mesmo adotando todas as medidas de controle e segurança durante a obra, esse método a montante não é aconselhado devido ao risco que oferece. A chance de acontecer percolação (infiltração) de água pela interface entre os contínuos alteamentos é alta. Com isso, pode ocorrer desestabilização do maciço e perda da capacidade de suporte da fundação.” Aguiar destaca que “o alteamento a jusante é acatado como o mais seguro, entretanto, por ser também mais caro, raramente é aplicado” (MISLEH, 2015).

### 3.2 Diagnóstico atual sobre barragens de rejeitos em Minas Gerais

Dados do Inventário de Barragens de 2015, publicado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), apontam que das estruturas inspecionadas em 2014, 19 oferecem riscos de rompimento com estabilidade não garantida e outras 16 têm avaliação inconclusiva por falta de informações repassadas pelas mineradoras (CAZETTA, 2016).

A condição de estabilidade não garantida significa que o auditor após os estudos hidrológicos, geotécnicos, hidráulicos, além de análises visuais, avaliações das condições de construção (“as *built*”) e/ou condições atuais (“as *is*”) das estruturas, não garante que as mesmas encontram-se seguras seja pelo ponto de vista da estabilidade física do maciço ou pela estabilidade hidráulica (passagem de cheias), assim sendo são estruturas que oferecem maior risco de rompimento, caso medidas preventivas e corretivas não sejam adotadas. Já a condição onde não há conclusão sobre a estabilidade da estrutura devido à falta de dados e/ou documentos técnicos, concerne à situação em que o auditor não dispõe dos estudos necessários e por esse motivo não consegue atestar a estabilidade da estrutura (FEAM, 2016).

A maioria das barragens possui estabilidade garantida segundo o inventário, contudo, a afirmativa pode não dizer muita coisa, uma vez que a própria barragem de Fundão, no inventário de 2014, era considerada como segura (CAZETTA, 2016).

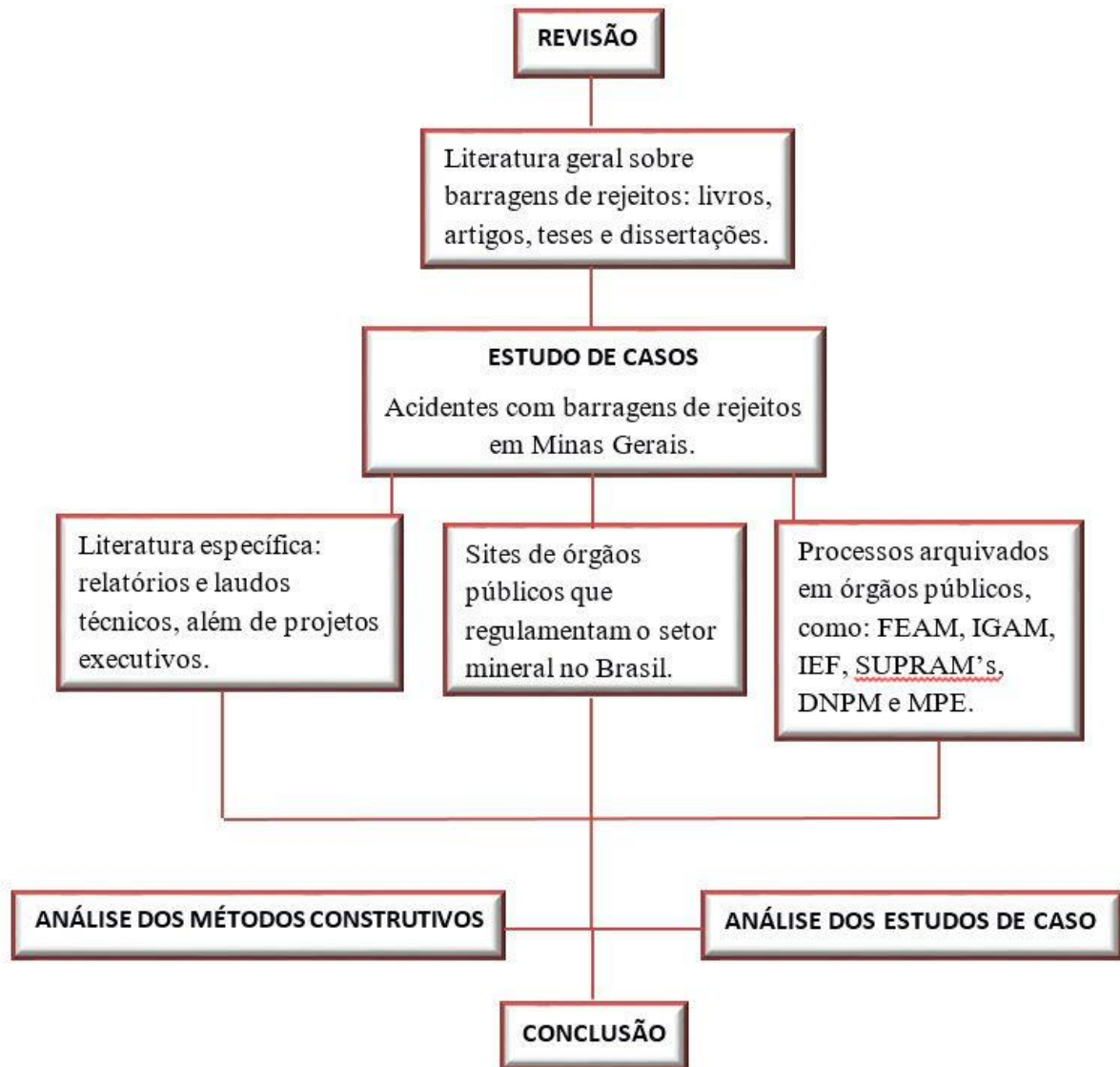
Ainda sobre o diagnóstico atual das barragens mineiras, é importante salientar que, deputados da Assembleia Legislativa de Minas Gerais (ALMG) aprovaram, no dia 07 de julho deste ano, o relatório da Comissão Extraordinária das Barragens.

O documento recomenda alterações na lei que regulamenta esse tipo de obra e tenta alcançar mais recursos para o trabalho de fiscalização. Entre as mudanças e recomendações indicadas pelo documento, está um projeto de lei (PL) que coíbe a instalação de barragens pelo método de alteamento a montante. Este mesmo texto proíbe qualquer barragem em um raio de dez quilômetros de povoaamentos ou de mananciais de água (MGTV, 2016).

Outro PL quer o encaminhamento de todo o dinheiro recolhido com a taxa de licenciamento à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), para aprimorar a fiscalização de diques e barragens no Estado (MGTV, 2016).

#### 4 – METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma abordagem qualitativa objetivando a descrição, interpretação e compreensão dos acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais. O desenvolvimento do trabalho abarcou as etapas resumidas e organizadas conforme esquema abaixo.



Para a revisão bibliográfica preliminar, pesquisou-se a respeito dos modelos construtivos de barragens de rejeitos, assim como seu funcionamento. Estes dados foram obtidos através de revistas técnicas, artigos, normas técnicas, teses e em anais de congressos que abordaram temas específicos sobre barragens e geotecnia. Posteriormente, para uma melhor compreensão e esclarecimento dos aspectos associados às rupturas em barragens de rejeitos, foram expostos dados a respeito dos seis acidentes ocorridos com barragens deste tipo no Estado de Minas Gerais.

As pesquisas sobre os estudos de caso, em sua maioria, foram realizadas em sites de órgãos públicos que regulamentam e fiscalizam barragens no Brasil, dentre eles a Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM ([www.feam.br](http://www.feam.br)), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM ([www.igam.gov.br](http://www.igam.gov.br)), o Instituto Estadual de Florestas - IEF ([www.ief.gov.br](http://www.ief.gov.br)), o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM ([www.dnpm.br](http://www.dnpm.br)), e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente - IBAMA ([www.ibama.br](http://www.ibama.br)).

Nestas homepages, pesquisaram-se os processos arquivados de acidentes ocorridos com barragens de rejeitos em Minas Gerais, assim como, planos de gestão e segurança de barragens, laudos técnicos de acidentes com barramento, inventários técnicos, projetos conceituais e executivos de construção de barragens de rejeito e relatórios de auditoria técnica de segurança de barragens.

De forma geral, a dificuldade na realização da pesquisa bibliográfica se deu em encontrar informações a respeito do primeiro estudo de caso apresentado, ocorrido em 1986, logo, sem o advento da internet na época do evento, encontrou-se pouca diversidade de materiais impressos discorrendo a respeito do mesmo.

A análise e discussão foram divididas em duas etapas de acordo com os objetivos específicos propostos inicialmente. A primeira etapa, diz respeito à análise dos métodos construtivos de barragens, onde um quadro comparativo modificado da literatura, é exposto propiciando uma discussão sobre o assunto, posteriormente, os seis acidentes ocorridos com barragens de rejeitos em Minas Gerais são analisados.

Após o levantamento de dados sobre os acidentes, criou-se dois quadros com as principais características de cada um, averiguando assim, os aspectos comuns e particulares de cada acidente. Além do quadro, realizou-se também uma análise detalhada dos documentos reunidos, identificando os principais aspectos referentes à questão de ruptura. Neste contexto, gerou-se um mapa georreferenciado através do software ARCGIS 10.2, com a localização das respectivas barragens.

Por fim apresentou-se uma conclusão com as principais considerações desta pesquisa.

## 5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO

### 5.1 Modelos construtivos de barragens

A escolha do método construtivo tem grande peso na elaboração de uma barragem, uma vez que cada modelo está susceptível em maior ou menor grau aos mecanismos de ruptura anteriormente tratados na revisão. No Quadro 2 estão resumidas as principais características dos três métodos construtivos, assim como seus aspectos de segurança, vantagens e desvantagens.

Quadro 2 - Comparação entre os métodos construtivos de barragens.

	<b>MÉTODO DE MONTANTE</b>	<b>MÉTODO DE JUSANTE</b>	<b>MÉTODO DE LINHA DE CENTRO</b>
<b>Características Gerais</b>	* Método mais antigo e o mais emprego na atualidade.	* Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé; * Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante	* Variação do método de jusante.
<b>Tipo de rejeito recomendado</b>	* Mais de 40% de areia; * Baixa densidade de polpa para promover segregação.	* Qualquer tipo	* Areias ou lamas de baixa plasticidade.
<b>Armazenamento de água</b>	* Não recomendado para grandes volumes	* Boa	* Não recomendada para armazenamento permanente.
<b>Resistência Sísmica</b>	* Falha em áreas de alta sismicidade	* Boa	* Aceitável
<b>Restrições de alteamento</b>	* 5 a 10m por ano	* Nenhuma - mas com menor velocidade	* Pouca
<b>Requisitos de alteamento</b>	* Solo natural, rejeitos ou estéril.	* Rejeitos ou estéril	* Rejeitos ou estéril
<b>Custo Relativo do corpo do aterro</b>	* Baixo (Vm*)	* Alto (3Vm)	* Moderado (2Vm)
<b>Vantagens</b>	* Menor custos; * Maior velocidade de	* Maior segurança (drenagem);	* Variação do volume de <i>underflow</i>

	alteamento.	*Compactação de todo corpo da barragem; *Pode ter elevadas alturas; * baixo risco de ruptura por liquefação e <i>piping</i> .	em relação ao método jusante; * facilidade construtiva; *controle da linha freática de jusante.
<b>Desvantagens</b>	* Maior a probabilidade de instabilidade devido à presença de finos não adensado no corpo da barragem; * Baixa compacidade do material; *Possibilidade de liquefação e <i>piping</i> ; * impõe dificuldade na implantação de sistemas de drenagem; *não deve ter grande altura.	* Necessidade de grande quantidade de material; * Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).	* Pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.

\*  $V_m$  = volume da barragem alteada pelo método de montante.

Fonte: Vick (1983) e Soares (2004), modificados.

Analisando o quadro é fácil compreender o porquê do método a montante ser o mais utilizado pelas mineradoras, e antes fosse por motivos de segurança, no entanto, esta preferência se dá por motivos financeiros, não havendo outra razão pela qual uma mineradora optaria pelo modelo mais crítico em relação à segurança. Nota-se a escolha econômica através dos seguintes aspectos:

- O método a montante permite maior velocidade nos alteamentos, admitindo assim, um regime maior de produção anual.
- Baixo custo construtivo uma vez que necessita de menor volume de material de empréstimo, ou no caso do uso de rejeito, menor volume de areia, já que para utilização deste no alteamento mistura-se cerca de 40 a 50% de material granular objetivando a segregação hidráulica.
- Mesmo sabendo-se que os materiais de empréstimo geralmente apresentam melhor qualidade construtiva devido ao seu comportamento geotécnico, a maioria das mineradoras ainda assim optam por realizar alteamentos com rejeitos.

- O uso do próprio rejeito no alteamento já é uma forma de liberar espaço para mais armazenamento de material.
- O fato do volume de material de alteamento (empréstimo ou rejeito) ser menor faz com que as empresas também tenham menores custos com maquinários de terraplanagem e seus insumos (diesel, óleo, operadores e depreciação das máquinas).
- Baixo gasto com filtros, uma vez que a estrutura utiliza somente tapete drenante junto ao dique de partida.

Em relação às desvantagens do método a montante, pode-se fazer as seguintes considerações:

- A velocidade de alteamento que inicialmente é uma vantagem do método, favorece a realização de novos alteamentos em curto espaço de tempo, sendo assim, os mesmos acabam sendo realizados sobre materiais anteriormente depositados e não consolidados. Neste cenário saturado e pouco compactado, os rejeitos granulares tornam-se pouco resistentes ao cisalhamento, ficando vulnerável a liquefação estática.
- A configuração geométrica do método, dificulta a implementação de sistemas de drenagem e filtros, fazendo com que este modelo seja crítico em relação à estabilidade da estrutura.
- A inexistência de drenagens ao longo do alteamento pode provocar uma variação no nível de água da lagoa de decantação, diminuindo a distância entre a lagoa e o barramento. Esta proximidade favorece a ruptura por liquefação, percolação e piping.
- O rejeito deve ser lançado rigorosamente a montante do dique inicial e dos demais alteamentos subsequentes, caso contrário, a praia vai ter baixa segregação e permeabilidade, logo o nível freático da barragem vai se elevar, podendo ocorrer *piping*.

O método de alteamento para montante é o que carece de critérios mais rígidos tanto na construção, quanto na operação e monitoramento, uma vez que a maioria dos eventos de ruptura de barramentos ocorre em estruturas que utilizam este modelo construtivo.

Uma forma de se utilizar este modelo com um pouco mais de segurança, seria condicionar a rapidez dos alteamentos às propriedades dos rejeitos, dado que a segurança da barragem advém da resistência mobilizável dos mesmos. O talude a jusante deve ser tratado contra erosões, seja pela condução das águas por intermédio de canaletas e caixas de passagem, ou ainda por proteção superficial com cobertura vegetal, auxiliando para o bom funcionamento do modelo.

De todos os três métodos, o de montante é o que oferece a maior desvantagem em termos de segurança, no entanto, é o método que se tem maior vantagem econômica. Ao escolher este método, o empreendedor assume os riscos em troca de um menor gasto construtivo.

O método de jusante, em contrapartida é considerado como o mais seguro, uma vez que os alteamentos são levantados sobre um dique inicial impermeável, dotado de drenagem interna, por meio de filtro vertical e tapete drenante. Os demais taludes de montante são impermeabilizados com argila compactada ou manta geotêxtil.

Através dos conhecimentos anteriormente adquiridos, sabe-se que esta compactação torna o rejeito mais resistente ao cisalhamento. Impedindo-se o estado “fofo”, evita-se a susceptibilidade dos rejeitos granulares à liquefação. Esta compactação atuando conjuntamente com um barramento bem construído e devidamente controlado nos quesitos de drenagem diminui significativamente as chances de ruptura por liquefação e *piping*.

A maior parte das desvantagens deste método margeiam razões econômicas, apesar de motivos técnicos também existirem. O método de jusante solicita maior custo de investimento, tanto no que diz respeito ao volume de material para os alteamentos, quanto à preparação da estrutura para receber os rejeitos.

Nas primeiras etapas de construção, o método necessita de três vezes mais material de alteamento do que o método a montante, além do alto investimento inicial devido à complexidade do dique de partida e de enrocamento de pé, o qual serve para conter o avanço do *underflow*. A necessidade de gasto com ciclones para uma ideal separação granulométrica também se faz presente.

Entre as desvantagens técnicas temos a impossibilidade de proteção do talude com cobertura vegetal, e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos no talude de jusante; aumento da área de ocupação, caso a característica dos rejeitos torne necessário o uso de taludes mais abatidos, e por fim, possível atraso nas obras uma vez que em épocas de alta pluviosidade é necessária a espera por épocas de estio, que oportuniza a compactação dos rejeitos.

O método de linha de centro trata-se de uma variação do método a jusante e montante, no entanto mais barato e não tão seguro. Sua principal vantagem se dá pela facilidade construtiva, seguida da permissão do controle da linha freática de jusante.

Dentre as desvantagens econômicas podem-se citar as mesmas do método a jusante, já em relação às desvantagens técnicas observa-se:

- O método não permite tratamentos da superfície do talude de jusante;



- O modelo construtivo pode apresentar ângulos muito inclinados na face de montante, logo, se a parte superior do talude perder fortuitamente o confinamento, pode aparecer fissuras, provocando problemas de erosão e aumentos de poro-pressão na linha de centro, havendo assim, possibilidade de escorregamentos;
- Necessidade de sistema de drenagem e também sistema de contenção a jusante uma vez que se o rejeito a jusante ficar saturado comprometerá o maciço.

Analisando as características de cada método, nota-se que há premissas para uma melhor gestão de segurança, as quais cabem a qualquer um dos três métodos independente de suas individualidades. São elas:

- Como os rejeitos vêm sendo utilizados como principal material de alteamento, as mineradoras devem fazer uma investigação das características e propriedades destes rejeitos antes de utiliza-los. Uma pesquisa preliminar ponderará parâmetros de segurança e controle de qualidade, reduzindo assim as incertezas geradas pelo comportamento dos rejeitos nessas estruturas;
- Que os materiais mais compressíveis e menos resistentes sejam mantidos o mais longe possível da barragem;
- Que a barragem seja erguida com materiais adequados, colocados em áreas adequadas.
- Que seja realizado treinamento dos operadores, de modo que estes possam realizar o adequado lançamento de rejeitos imediatamente a montante do talude, evitando retenções de água rente à crista;
- Que o lago de decantação esteja posicionado o mais longe possível da barragem;
- Que o nível freático do reservatório fique longe da crista da barragem. Para isso deve-se fazer o máximo uso de sistemas de esgotamento, tanto das águas de chuva quanto das liberadas pela própria polpa, pois a minimização da saturação dos rejeitos melhora os quesitos de estabilidade;
- Que as fundações apresentem resistência, compressibilidade e permeabilidade condizentes com as boas técnicas construtivas;
- Que os taludes da barragem sejam os mais seguros possíveis, dentro das características de altura, do nível d'água e dos materiais disponíveis;
- O monitoramento da obra deve ser feito durante todo o período de alteamento, continuando na fase de encerramento;
- Que não haja consequência séria, principalmente ao ser humano, devido à ocorrência de ruptura total ou parcial. Uma vez que barragem boa é barragem que não rompe.

Tendo em vista os aspectos discutidos, infere-se que devido às suas diferentes características, cada barragem demanda de gestão específica, fugindo-se de fórmulas prontas e comuns a todas as barragens. Cada estrutura de contenção de rejeitos é um sistema único demandando estudos específicos sobre a região em que se encontra além do tipo de processo de beneficiamento empregado e as características dos rejeitos gerados, possibilitando assim uma gestão eficiente.

## 5.2 Acidentes ocorridos com barragens de rejeito em Minas Gerais.

A localização das barragens que compõem o objeto deste estudo está presente no Mapa 1 do Apêndice A. Nota-se que quatro das cinco estruturas encontram-se no Quadrilátero Ferrífero, região com imensas reservas de ferro. No Quadro 3 a seguir estão expostas as características gerais referentes a cada acidente, as quais posteriormente serão discutidas.

Quadro 3 - Comparação geral entre acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais.

	<b>Itaminas Fernandinho (1986)</b>	<b>Rio verde Cava 1 (2001)</b>	<b>Rio Pomba São Francisco (2006-2007)</b>	<b>Herculano Retiro do Sapicado (2014)</b>	<b>Samarco Fundão (2015)</b>
<b>Minério beneficiado</b>	Ferro	Ferro	Bauxita	Ferro	Ferro
<b>Método Construtivo Montante</b>	X	X	X	X	X
<b>Erro no lançamento dos rejeitos</b>	X	X			
<b>Solo pouco compactado</b>	X	X	X	X	X
<b>Sistema de drenagem ausente ou precário</b>	X (Falha)	X (Ausência)	X (Falha)	X (Falha)	X (Falha)
<b>Varição do lençol freático</b>	X	X	X	X	X
<b>Geometria inadequada de taludes</b>	X	X			X (Além da falta de revestimento)
<b>Problemas no licenciamento</b>					X
<b>Obras ilícitas</b>		X	X	X	X
<b>Falha de fiscalização</b>		X (Não monitorou a obra)		X	X (20 anual)

<b>Contribuição Natural</b>			X		
<b>Ausência ou falha de monitoramento</b>		X (Falha)		X (Falha)	X (Ausência e Falha)
<b>Ruptura por percolação (instabilidade de talude)</b>		X		X	
<b>Ruptura por galgamento</b>			X		
<b>Ruptura por liquefação</b>	X				X

Fonte: Elaborado pela autora.

✓ *Quanto ao método construtivo*

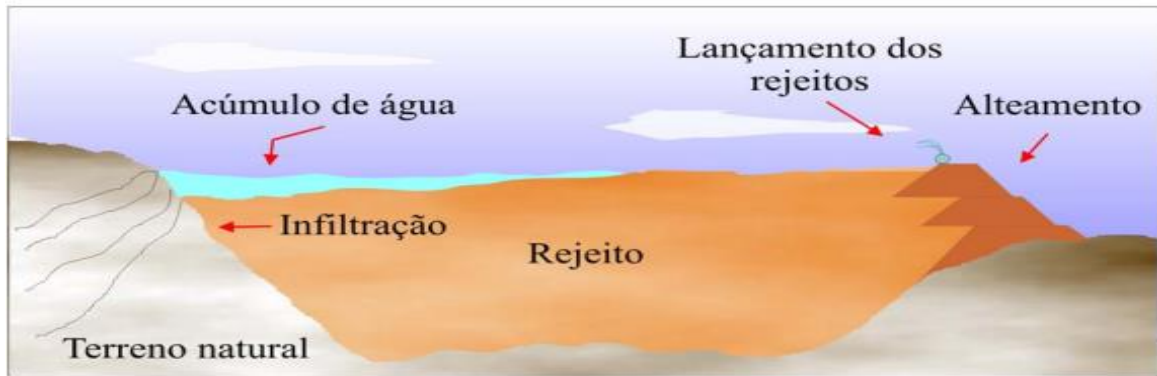
Todas as mineradoras do presente estudo optaram por realizar alteamentos a montante, método cuja utilização é questionável, conforme demonstrado anteriormente.

✓ *Quanto ao lançamento dos rejeitos*

Em duas das barragens analisadas, os rejeitos eram lançados de forma errônea, mais precisamente do lado oposto do barramento. Esta forma de lançamento vai contra a premissa de segurança, onde se deve manter o lago de decantação a maior distância possível do barramento.

Segundo a bibliografia técnica, os rejeitos devem ser lançados sobre a crista da barragem, ou seja, sempre junto ao barramento e não do lado oposto. Quando os rejeitos são lançados de modo adequado tem-se a configuração exemplificada pela Figura 27, no entanto a configuração alcançada pelas barragens Fernandinho e Cava 1 da mineração Rio Verde devido a forma de lançamento dos rejeitos, é a apresentada na Figura 28.

Figura 27- Configuração das barragens quando os rejeitos são lançados de acordo com a bibliografia técnica.



Fonte: MAIA (2015)

Figura 28 - Configuração das barragens Fernandinho e Cava 1 saturando o maciço.



Fonte: MAIA (2015)

- ✓ *Quanto à compactação dos rejeitos utilizados como base para os próximos alteamentos*

O próprio método construtivo imputa dificuldades na compactação dos rejeitos, a qual é feita somente pelo transitar das máquinas, logo, o estado “fofo” dos rejeitos é algo característico do modelo adotado. Este estado de baixa compactação foi decisivo para que as barragens de Fernandinho e Fundão sem rompessem por liquefação.

- ✓ *Quanto à saturação do barramento*

Em todos os casos expostos, o barramento estava com a linha freática alta saturando o maciço. Fato que confirma que a água é um dos principais agentes desestabilizadores destas estruturas, ainda mais nos estudos de casos apresentados, onde a maioria dos sistemas de drenagem não estava funcionando corretamente.

Em relação à barragem de Fernandinho e a Cava 1 da mineração Rio Verde, não resta dúvida que a situação colocada anteriormente quanto a má prática de lançamento dos rejeitos, levou a saturação do maciço dos barramentos.

✓ *Quanto à geometria dos alteamentos*

Notou-se disparidades quanto a geometria dos taludes das barragens da mina Fernandinho, Cava 1 da Rio Verde e Fundão da Samarco. Segundo Rezende (2013), taludes já possuem uma tendência natural ao deslizamento, o qual é contido quando as tensões cisalhantes mobilizadoras são iguais ou menores que a resistência ao cisalhamento do material interceptado por este talude. Logo, quando um talude é muito inclinado, esta tendência se torna ainda mais crítica. Escorregamentos acontecem sempre que a inclinação do talude excede aquela imposta pela resistência ao cisalhamento do maciço e na presença de água. Cenário presente nas barragens de Fernandinho, Cava 1 e Fundão.

✓ *Quanto à execução do barramento*

Observou-se que 80% das obras de alteamento foram realizadas de forma irregular, ou seja, não licenciadas pelo órgão competente. Nestes termos, as mineradoras infringiram tanto leis quanto regras de segurança.

✓ *Quanto ao projeto de barramento*

Como as mineradoras Rio Verde, Rio Pomba e Herculano executaram obras ilícitas, as mesmas não se deram ao trabalho de realizar um projeto executivo destas obras. No entanto, a mineradora que mais chama a atenção neste quesito de projeto executivo é a Samarco, uma vez que não se sabe como esta empresa conseguiu o licenciamento ambiental de seus barramentos sem a apresentação deste documento, o qual é obrigatório na hora de requerer a licença ambiental.

✓ *Quanto à fiscalização ao longo dos anos*

Com relação à fiscalização da mineradora Rio Pomba, não resta dúvida quanto à existência de constantes vistorias ao local, principalmente depois da ruptura parcial ocorrida em 2006. Inclusive foi em uma destas vistorias que os problemas no vertedouro da barragem foram detectados. No entanto, a mineradora não solucionou o problema a tempo.

No caso da mineradora Rio Verde, houve vistoria um mês antes do evento de ruptura, no entanto, pergunta-se qual a qualidade desta vistoria uma vez que no local estava em andamento dois alteamentos de 10m cada os quais não estavam licenciados.

A falha da fiscalização na mineradora Herculano, não se deu somente pela não identificação de alteamentos ilegais no local, mas também devido a um relatório incompleto do auditor responsável, o qual garantiu a estabilidade da barragem mesmo atestando rachaduras na estrutura, não mencionando em seu relatório quantas eram e nem a dimensão destas.

Já em relação à Samarco, a fiscalização foi falha em atestar a quantidade de rejeitos na barragem, uma vez que a mesma suportava 45 milhões de m<sup>3</sup>, mas fazia o barramento de 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos. E também pelo não aferimento do alteamento anual da barragem, o qual era muito superior ao indicado pela bibliografia técnica do modelo de alteamento adotado.

✓ *Quanto à falta de controle e monitoramento*

Ressalvando as mineradoras Itaminas e Rio Pomba, as demais foram irresponsáveis quanto a segurança de suas estruturas, seja pela falta ou falha de monitoramento. No caso da Samarco, ambas as situações.

✓ *Quanto à análise dos mecanismos de ruptura*

➤ Itaminas - Fernandinho

Os rejeitos misturados ao material granular eram lançados em pontos afastados da crista da barragem, situação a qual gerou saturação do maciço devido à proximidade do lago com o barramento. Ao mesmo tempo, os taludes pouco compactados possuíam alturas e inclinações incompatíveis para a estrutura, que neste cenário saturado tanto pela forma de lançamento dos rejeitos, quanto pela falha dos sistemas de drenagem, favoreceu o escorregamento de massa. Este escorregamento foi o gatilho que tirou os rejeitos granulares saturados e “fofos” de seu estado de equilíbrio, fazendo com que a barragem se rompesse por liquefação estática.

A confirmação que a estrutura se rompeu por liquefação é evidenciada pela viscosidade da lama a qual se comportou como um material líquido fluído em alta velocidade.

➤ Rio Verde - Cava 1

Os rejeitos, assim como na mina de Fernandinho, também eram lançados de forma inadequada, provocando a saturação do maciço. A inexistência de drenagem interna contribuiu significativamente neste processo.

Este estado supersaturado somado a uma inclinação incompatível para este tipo de estrutura levaram os taludes para um estado crítico. Como todo talude tende ao deslizamento e

ainda mais sobre estas circunstâncias as chances de deslizamento foram aumentadas, não havendo dúvidas quanto à ruptura por percolação e instabilidade do talude.

➤ Rio Pomba – São Francisco

A ruptura parcial da estrutura em 2006 se deu pelo deslocamento entre as placas reguladoras de vazão do vertedouro, gerando assim uma abertura entre elas.

Em relação à ruptura total em 2007, sabe-se que a barragem na data do evento já se encontrava saturada devido a falhas no sistema de drenagem. Neste mesmo espaço temporal, a barragem foi alteada de forma que o vertedouro, o qual não possuía revestimento apropriado para a passagem do fluxo d'água, fosse colocado em um nível mais alto do que a própria barragem.

Esta inaptidão do revestimento juntamente com o desnível identificado, fez com que o vertedouro não conseguisse extravasar a cheia do reservatório, assim, a barragem veio a romper por galgamento.

➤ Herculano – Retiro do Sapecado

A barragem encontrava-se saturada e com problemas no sistema de drenagem e este cenário elevou o nível freático no interior da barragem fazendo com que a linha freática entrasse em contato com o barramento. As rachaduras presentes no mesmo fizeram com que a água se infiltrasse mais facilmente no maciço, causando a instabilidade do talude. Portanto, a barragem Retiro do Sapecado rompeu por percolação e instabilidade de talude.

➤ Samarco – Fundão

Assim como nos outros casos, a barragem de Fundão também se encontrava saturada, fato comprovado tanto pela presença de água na cota 879m (segundo as leituras dos piezômetros), quanto pela existência de fluxo subterrâneo de água. A falha do sistema de drenagem interna contribuiu significativamente para este estado de saturação.

Levando-se em conta o estado de saturação que a barragem se encontrava, conjuntamente com a força peso exercida pelos taludes extras e pelo lançamento abusivo de polpa, os rejeitos anteriormente depositados, os quais estavam servindo como base para este alteamento e lançamento ilegais, saiu de seu estado de repouso, fazendo com que a estrutura se rompesse por liquefação estática.

Assim como a Mina de Fernandinho a barragem de Fundão também sofreu liquefação estática, inclusive ambos os processos foram impulsionados pelo mesmo gatilho, movimento de massa na área de influência dos depósitos de materiais granulares. No caso de Fernandinho,

ocasionado pelo escorregamento de um talude instável, e no caso de Fundão devido à sobrecarga de rejeitos e os carregamentos rápidos.

✓ *Quanto à previsibilidade do acidente*

Em ressalva da Mina Fernandinho, as demais rupturas de certa forma eram previsíveis, tendo em vista que obras irregulares sem projeto executivo (desconsiderando assim as informações geotécnicas necessárias à avaliação da situação de risco) estão destinadas a darem errado.

No caso das mineradoras Herculano e Samarco esta previsibilidade era ainda mais palpável, uma vez que várias falhas foram apontadas em auditorias anteriores realizadas pela ENGEO e VOGBR, respectivamente.

✓ *Quanto às responsabilidades*

Segundo Duarte (2008), as responsabilidades pela segurança de barragens são partilhadas por distintos atores, tais como proprietários, operadores, projetistas, construtores, legisladores e demais entidades envolvidas. As partes citadas devem estar envolvidas durante todo o ciclo de vida da barragem. Davies (2002) complementa que, acidentes com barragens de rejeitos acontecem a partir de uma ou da associação de mais de uma falha, seja no projeto ou na operação de barragens, esta última abarcando erro humano e também organizacional, as quais são cometidas pelos atores anteriormente citados. No Quadro 4 a seguir, são apresentadas as prováveis responsabilidades de cada um dos atores envolvidos na operação e gestão das barragens que se romperam.



Quadro 4 - Atores envolvidos na operação e gestão das barragens que se romperam.

<b>FALHA DE OPERAÇÃO (ERRO HUMANO E ERRO ORGANIZACIONAL)</b>			
	<b>OPERADOR</b>	<b>MINERADORA</b>	<b>ORGÃO PÚBLICO E DEMAIS ENTIDADES</b>
<b>Itaminas Fernandinho (1986)</b>	- Os rejeitos eram lançados em pontos afastados do maciço.	- Fato de ter escolhido o método de alteamento menos seguro por fatores econômicos e não por fatores de segurança;  - Falta de treinamento dos operadores.	
<b>Rio verde Cava 1 (2001)</b>	- Erro no método de lançamento dos rejeitos no reservatório a montante.	- Fato de ter escolhido o método de alteamento menos seguro por fatores econômicos e não por fatores de segurança;  - Falta de treinamento dos operadores;  - Promover alteamentos sem licenciamento ambiental;  - Realização de obra sem projeto executivo;  - Consciência dos riscos ao não se realizar o monitoramento da barragem.	- Falha na fiscalização (alteamentos sem licença e falta de instrumentos de monitoramento), sendo que a última inspeção foi realizada um mês antes da barragem se romper.
<b>Rio Pomba São Francisco (2006-2007)</b>		- Fato de ter escolhido o método de alteamento menos seguro por fatores econômicos e não por fatores de segurança;  - Promover alteamentos sem licenciamento ambiental;	

		- Falta de prontidão em resolver o problema nos vertedouros.	
<b>Herculano Retiro do Sapecado (2014)</b>		- Fato de ter escolhido o método de alteamento menos seguro por fatores econômicos e não por fatores de segurança; - Apresentação de informações falsas ao órgão ambiental; - Utilização da barragem de forma irregular; - Alteamentos sem licenciamento e projeto; - Procrastinação em resolver os problemas apontados pela auditoria.	- Auditor garantiu estabilidade da estrutura, no entanto, deu parecer incompleto quanto às rachaduras encontradas na barragem.
<b>Samarco Fundão (2015)</b>		- Fato de ter escolhido o método de alteamento menos seguro por fatores econômicos e não por fatores de segurança; - Sobrecarregamento da estrutura (45-50 milhões de m <sup>3</sup> ); - Falta de projeto executivo para realização da obra; - Falta de monitoramento contínuo do nível de água; - Elevada taxa de alteamento anual, sabendo-se que o modelo adotado só permite 10m anualmente.	<b>ORGÃO PÚBLICO</b> - Irregularidade com o licenciamento ambiental; - Falta de fiscalização (alteamentos de 20m e equipamentos de monitoramento). <b>CONSULTORIA</b> - Omissão sobre equipamentos com defeitos no relatório

Fonte: Elaborado pela autora.

✓ *Erro Humano*

Considera-se que erro humano pode se manifestar das mais variadas formas, tanto pela falta de conhecimento a respeito de algo, quanto por desatenção ou ainda incapacidade técnica para execução de determinada atividade. O erro humano em relação aos estudos de caso apresentou-se através da falha de conhecimento e capacitação por parte dos operadores das barragens Fernandinho e Cava 1, pois suas ações tiveram relações diretas com as causas de ruptura destas barragens, uma vez que os mesmos lançavam os rejeitos de forma inadequada. Muitas vezes quem opera as barragens de rejeitos não é uma equipe especializada, mas alguém da produção que fica encarregada desta tarefa.

Este erro poderia ter sido evitado através de ações de capacitação e treinamento com apoio de instrutores especialistas, os quais poderiam apontar para os operadores as possíveis consequências de um lançamento inadequado. O operador precisa estar capacitado e preparado, com conhecimentos específicos das tarefas inerentes à operação.

Observa-se nesta situação que antes da ocorrência de erro humano houve erro organizacional por parte das mineradoras, pois estas são as reais responsáveis pela contratação de operadores capacitados ou então pela capacitação e treinamento de operadores inexperientes.

✓ *Erro Organizacional*

O primeiro erro organizacional notório nos casos analisados se dá por parte das mineradoras, as quais tentaram continuamente reduzir os custos de construção e operação.

A redução de custos não é um erro organizacional quando as premissas de segurança são colocadas em primeira instância, no entanto, nestes estudos de caso isso não ocorreu. A economia a qualquer custo pode ser vista por uma série de atitudes como:

- A escolha de um modelo de alteamento inseguro;
- Falta de manutenção e/ou ausência de equipamentos de monitoramento;
- Falta de treinamento de pessoas;
- Construção de alteamentos ilegais, uma vez que além de economizar nas taxas de licenciamento, entrar com o processo significaria esperar a aprovação pelo órgão que muitas vezes demoram um pouco, logo frearia a produção (tempo é dinheiro);
- Sobrecarga da estrutura e elevada taxa de alteamento no caso da mineradora Samarco.

Uma gestão responsável realmente envolve grandes investimentos, mas que não se compara aos custos que as mineradoras têm quando estas estruturas rompem e causam danos aos seres humanos e ao meio ambiente. Motivo pelo qual deve-se realizar um monitoramento apropriado, realizar treinamentos, fazer manutenções e provisão de medidas preventivas e corretivas das estruturas em questão.

Em relação aos erros organizacionais por parte dos órgãos públicos, os principais lapsos se deram por uma fiscalização falha quando eram realizadas ou então pelo espaçamento longo entre uma inspeção e outra. Neste tópico, duas das três barragens onde existiram falhas de fiscalização chamaram mais a atenção, são elas a Cava 1 pertencente a Rio verde e a barragem de Fundão pertencente à Samarco.

No caso da Rio verde, inspeções foram realizadas por um mesmo agente ao longo do tempo, que nestas oportunidades de inspeção pode acompanhar a execução do alteamento ilegal, mas nunca registrou que os mesmos não constavam na licença e muito menos que não existiam equipamentos de monitoramento na estrutura do maciço. O agente falhou no seu dever de fiscalizar adequadamente a estrutura, tendo em vista que, uma das condicionantes estabelecidas para o licenciamento ambiental da cava, determinava uma reavaliação periódica e acompanhamento do projeto de alteamento da barragem de acordo com as normas técnicas, para se evitar o rompimento da mesma.

O agente B.M.J contribuiu para a ruptura da barragem de rejeito, agindo negligentemente, na condição de agente da Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM -, ao ignorar os deveres e objetivos do trabalho de fiscalização, deixando de lavrar os autos de infração relativos à ilegalidade do alteamento, à inexistência de equipamentos de monitoramento da estrutura do alteamento, bem como pela não realização de todos os procedimentos consagrados pela engenharia geotécnica tradicional para a execução dos referidos alteamentos com segurança. Se o agente B.M.J denunciado pelo Ministério Público, tivesse lavrado autos de infração, como determina o Decreto Estadual, a constatação da situação de risco pelo agente levaria à suspensão das atividades (como aconteceu após o rompimento da cava), evitando-se seu desfecho trágico.

No caso da Samarco, além da fiscalização falha, houve também irregularidades no licenciamento ambiental da obra, pois o projeto executivo, item obrigatório na hora de requerer a licença, estava ausente na documentação, no entanto, a licença foi concedida pela Fundação Estadual do Meio Ambiente. Sobre este quesito, há especulações políticas por detrás desta facilidade, as quais são investigadas sob sigilo.

## CONCLUSÃO

O método de alteamento a montante está associado a todos os acidentes com barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais. Aparentemente, as mineradoras responsáveis pelas barragens deste estudo optaram por utilizar este tipo de alteamento mesmo conhecendo suas fragilidades e maiores possibilidades de ruptura. Presume-se que as mesmas se basearam em esperanças infundadas de que os modelos não falhariam, uma vez que utilizaram mal tanto os conhecimentos técnicos quanto as melhores práticas de engenharia disponíveis.

O alteamento a montante, mesmo que bem gerenciado, tende a ser problemático. Esta predisposição juntamente com a forma com que as mineradoras vêm utilizando-o, faz com que as barragens alteadas pelo método sejam consideradas ainda mais perigosas. A constatação desta falta de zelo e cuidado por parte das mineradoras ao longo dos anos em Minas Gerais gerou, além de discussões o surgimento de diversos marcos legislativos. O primeiro marco surgiu após o acidente com a mineração Rio Verde em 2001 (DN 62/2002) e o último após a ruptura da barragem de Fundão, através do Decreto Estadual 46.933/2016, o qual suspendeu por tempo indeterminado a utilização da técnica de alteamento a montante para a construção de novas barragens e para execução de obras de ampliação nas barragens existentes.

Espera-se que este novo marco regulatório contribua de forma efetiva na prevenção de acidentes com barragens de rejeito no Estado, uma vez que mesmo com a existência de marcos anteriores, acidentes ainda ocorreram. É desanimador reconhecer que estes marcos regulatórios surgiram só após as tragédias se concretizarem, servindo de forma preventiva para próximos eventos, e que só são revisados quando estes “próximos eventos” vem a ocorrer.

Contudo, lamentavelmente, nem a melhor lei do mundo pode garantir que acidentes com barragens de rejeitos não ocorrerão, até mesmo porque os empreendedores e órgão públicos, sejam eles reguladores ou fiscalizadores, também devem cumprir com os papéis que os cabem. No decorrer desta pesquisa, foi possível verificar as dificuldades do DNPM em exercer suas funções e este fato enfraquece a fiscalização e potencializa os riscos de acidentes com barragens de rejeitos.

Em todos os casos analisados, além do método construtivo comum, observou-se a falta de controle da água nos barramentos, propiciando situações críticas as quais se materializaram através dos mecanismos de ruptura, evidenciando que a maior parte do problema de gerenciamento de barragens se concentra em saber lidar com a água.

Em virtude dos fatos discutidos ao longo do trabalho, entende-se que a maioria das falhas técnicas identificadas nos estudos de caso, procederam de um gerenciamento inadequado das estruturas, onde vários fatores foram negligenciados em função do lucro máximo. O setor minerário tem que ter em mente que não existe gestão eficiente sem suporte de recursos físicos e financeiros, e que a aplicação de boas práticas somente é conseguida se tiver apoio do topo.

Por mais que os rejeitos não tragam retorno financeiro, devem-se aplicar esforços de modo a obter excelência no gerenciamento dos mesmos, pois em caso de acidentes os custos com indenizações e ações de recuperação ambiental serão maiores do que a economia feita negligenciando a boa técnica, além da perda de credibilidade a qual afeta o valor de mercado do produto beneficiado. Além disso, acidentes abalam a confiança pública, a qual as empresas do setor devem cativar uma vez que esta confiança é um requisito essencial para que as minas possam ser licenciadas e operadas. Logo, a indústria da mineração deve mostrar comprometimento e provar que seu sistema de controle é capaz de gerenciar adequadamente os rejeitos produzidos.

No início da pesquisa, esperava-se que todos ou pelo menos a maior parte dos acidentes fossem consequências de um projeto mal elaborado e/ou construído, portanto a constatação das irresponsabilidades envolvendo erros organizacionais como precedente dos mesmos foi uma surpresa.

Espera-se que a discussão e análise dos estudos de caso sirvam de exemplo no que diz respeito ao que não deve fazer quanto à gestão e operação de barragens de rejeito. O trabalho também abre espaço para a reflexão de proprietários e gestores deste tipo de empreendimento: será que realmente vale a pena arcar com todos os transtornos e possíveis perdas humanas em prol de uma economia, que ao final pode sair muito mais cara?

Diante do exposto, em relação aos estudos de caso, conclui-se que os acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais devem ser lembrados como uma herança da falta de gestão de segurança e risco por parte dos empreendedores do setor, conjuntamente com uma legislação a qual atualmente está sendo revisada e uma fiscalização ineficiente.

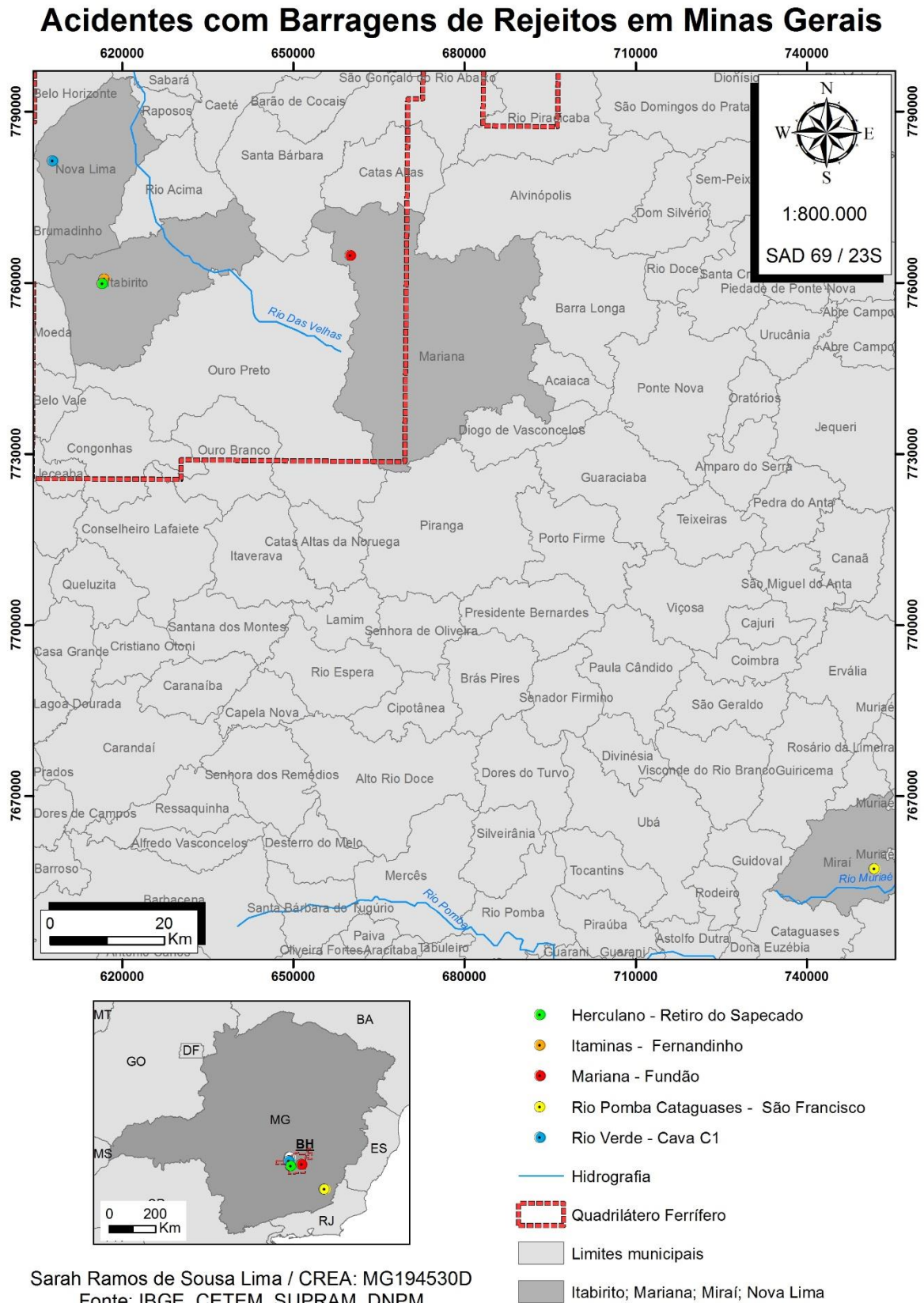
Já em relação à monografia no geral, ressaltasse que apesar das dificuldades encontradas, todos os objetivos propostos inicialmente foram alcançados, uma vez que foi possível realizar uma análise crítica comparativa tanto dos modelos construtivos de barragens quanto dos acidentes com barragens de rejeitos em Minas Gerais.

Os resultados obtidos ressaltam a importância de um adequado gerenciamento dos rejeitos, pois a segurança e o perfeito funcionamento de suas estruturas de barramento são

fundamentais para uma contínua realização das atividades minerais e que apesar dos acidentes, a atividade mineradora é vital para o desenvolvimento da sociedade. As operações devem, portanto, serem realizadas de maneira planejada e com a devida fiscalização de suas instalações.

ANEXO A

Mapa 1- Localização das barragens que compõem o objeto deste estudo.





## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Filho L.H. **Análise do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. 2004. 191 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ARAUJO, Cecília Bhering. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito na mineração de ferro**. 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Cap. 2. Disponível em: <[http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2006/Teses/ARAUJO\\_CB\\_06\\_t\\_M\\_geo.pdf](http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2006/Teses/ARAUJO_CB_06_t_M_geo.pdf)>. Acesso em: 09 jul. 2016.
- ASSIS, A. P., HERNANDEZ, H. M., COLMANETTI, J.P. (2003). Apostila de barragens. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.
- ÁVILA, J. P. Mesa Redonda Sobre Segurança de Barragens. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, Comitê Brasileiro de Barragens, 24 de abril de 2008, Belo Horizonte, Minas Gerais. [Apresentação PowerPoint]. Disponível em: <[http://cbdb.org.br/xxxsngb/download/trabalhos\\_temas/12-05/tarde/Erton%20Carvalho/CBDB-RELATOR-ERTON-XXX-SNGB.pdf](http://cbdb.org.br/xxxsngb/download/trabalhos_temas/12-05/tarde/Erton%20Carvalho/CBDB-RELATOR-ERTON-XXX-SNGB.pdf)>. Acessado em: 13 de julho de 2016.
- AVILA, Joaquim Pimenta de. **SEGURANÇA DE BARRAGENS E SISTEMAS DE GESTÃO DE RISCOS**. 2016. Disponível em: <[http://www.pimentadeavila.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=132:seguranca-de-barragens-e-sistemas-de-gestao-de-riscos&catid=46:area-de-atuacao&Itemid=122](http://www.pimentadeavila.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=132:seguranca-de-barragens-e-sistemas-de-gestao-de-riscos&catid=46:area-de-atuacao&Itemid=122)>. Acesso em: 12 jul. 2016.
- ÁVILA, Joaquim Pimenta de; BICUDO, Ricardo Ivan. **BOAS PRÁTICAS NA GESTÃO DE PROJETOS DE BARRAGENS DE REJEITOS**. Belo Horizonte: Vídeo, 2014. 24 slides, color. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005311.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.
- BACIA DO RIO DOCE: Rompimento da Barragem em Mariana/MG**. Belo Horizonte: Agência Nacional de Águas, 2015. Encarte Especial. Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil.
- CÂMARA, Luciene; CAZETTA, Jhonny; CASTRO, Johnatan. **Auditoria já mostrava trincas em barragem que se rompeu**. 2014. Publicado pelo jornal O Tempo. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/auditoria-ja-mostrava-trincas-em-barragem-que-se-rompeu-1.914592>>. Acesso em: 14 jul. 2016.
- CAZETTA, Jhonny. **MG tem 19 barragens em risco**: Segundo inventário da Feam, avaliação de outras 16 é inconclusiva; Estado possui 710 estruturas. 2016. Publicado pelo jornal O Tempo. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/mg-tem-19-barragens-em-risco-1.1270170>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

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

<<http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/exibeverbete.aspx?verid=211>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (São Paulo) (Org.). **Rompimento de barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases afeta qualidade da água em MG e no RJ.** 2012. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/mariana/verbete-rio-pomba.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2016.

CNPG, Conselho Nacional Procuradores Gerais. **MINAS 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: 15 jul. 2016.

COLLISCHONN, W. **Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997, 193 p.

COMARCA DE NOVA LIMA. Tribunal de Justiça de Minas Gerais. Repositório de Sentenças nº 018801002864-8. Ministério Público de Minas Gerais. P.M.L., J.L.M.L., M.L.R., Mineração Rio Verde Ltda., e B.M.J.. Relator: Juiz Juarez Moraes de Azevedo. Nova Lima, MG, 15 de janeiro de 2007. Nova Lima. Disponível em: <<http://www.tjmg.jus.br/data/files/AC/37/4F/B9/87A4B4109195A3B4E81808A8/ Penal - Leis Penais Especiais.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

COPAM (2002). Deliberação Normativa número 62. Conselho Estadual de Política Ambiental, 9 p.

CORREIA, Rogério; MAGALHÃES, João. **COMISSÃO EXTRAORDINÁRIA DAS BARRAGENS:** Relatório Final. Belo Horizonte: Diário do Legislativo, 2016. (Aprovado na Comissão Extraordinária das Barragens). Disponível em: <[http://www.rogeriocorreia.com.br/wp-content/uploads/2016/07/relatorio\\_final\\_da\\_comissao\\_de\\_barragens.pdf](http://www.rogeriocorreia.com.br/wp-content/uploads/2016/07/relatorio_final_da_comissao_de_barragens.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2016.

CREA-MINAS (Org.). A força da mineração: Altos investimentos possibilitam a expansão e o vigor do setor mineral. **Revista Vértice CREA-Minas**, Belo Horizonte, v. 15, n. 1, p.9-12, jun. 2013. Trimestral.

CRUZ, Sávio Souza. **Decreto nº 46.933/2016 suspende utilização de técnica de alteamento.** 2016. Disponível em: <<http://www.saviosouzacruz.com.br/decreto-n-46-9332016-suspende-utilizacao-de-tecnica-de-alteamento/>>. Acesso em: 16 jul. 2016.

DAVIES, M.P. (2002). Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical Engineers Listening? *Geotechnical News, Waste Geotechnics*, 6 p.

DINIZ, N.C. et al. 2006. Casos históricos de ruptura de presas de relaves en Brasil: propuesta de geoindicadores para el monitoreo. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (2): 265-275 ISSN:

0366-0176. Disponível em: <[http://www.igme.es/Boletin/2006/117\\_2\\_2006/Art.4.PDF](http://www.igme.es/Boletin/2006/117_2_2006/Art.4.PDF)>. Acessado em: 13 de julho de 2016.

DITR (2007). Tailings Management – Leading Practice Sustainable Development Program for the mining Industry. Department of Industry, Tourism and Resources – Australian Government, 73 p.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. DNPM vistoria e paralisa mineradora em Miraf, 16 jan. 2007. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=99&IDPagina=72&IDNoticiaNoticia=236>>. Acessado em: 14 de julho de 2016.

EMERICH, Danilo. **Omissão de mineradora causou rompimento de barragem em Itabirito**: Responsáveis pela mineradora e por auditoria foram indiciados por homicídio com dolo eventual e sete tipos de crimes ambientais. 2015. Publicado pelo jornal O Tempo. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/omissao-de-mineradora-causou-rompimento-de-barragem-em-itabirito-1.1193280>>. Acesso em: 14 jul. 2016.

ESPÓSITO, T.J. & ASSIS, A. (1999). **Método Probabilístico acoplado ao método observacional aplicado a barragens de rejeito**. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, ABMS/ ABGE/ CBGB, São José dos Campos, SP, pp. 187-194.

ESPÓSITO, Terezinha de Jesus. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. 394 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2000. Cap. 2.

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente. Ministério Público de Minas Gerais (Org.). **Parecer Técnico DIMIM 057/2006**: Rio Pomba Empresa de Mineração Ltda. Belo Horizonte: Feam, 2006. 7 p. Processo COPAM: N.º 201/1986/031/2006 Processo DNPM: 831.090/1981.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. **INVENTÁRIO DE BARRAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS ANO 2015**. Belo Horizonte: Feam-dger-gerim-rt-03/2015, 2016. 54 p. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS\\_MINERAÇÃO/Inventário\\_de\\_Barragens\\_2015\\_Final\\_V01.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERAÇÃO/Inventário_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2016.

FERREIRA, Bárbara (Org.). **Minas Gerais vira ‘refém’ da mineração em relação perigosa**. 2015. Publicado pelo jornal O Tempo. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/minas-gerais-vira-ref%C3%A9m-da-minera%C3%A7%C3%A3o-em-rela%C3%A7%C3%A3o-perigosa-1.1185431>>. Acesso em: 06 maio 2016.

FRANCO, Dinésio. **RISCOS EM BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**. São Paulo, 2016. 31 slides, color. III Congresso de “Desenvolvimento e Riscos no contexto Latino Americano” - Sociedade de Análise de Risco Latino Americana SRA-LA. Disponível em: <<http://abge.org.br/uploads/arquivos/apresentacaodinesio2016053115330438983.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

GOMES, R.C., OLIVEIRA Filho, W.L. y RIBEIRO, L.F.M. 2001. Laudo pericial da ruptura do dique de contenção de rejeitos de minério de ferro da cava C1 da Mineração Rio Verde Ltda, localizada no município de Nova Lima / M.G. Universidade Federal de Ouro Preto. M.G., Brasil, 18p

HERNANDEZ, Hector Mauricio Osorio. **Caracterização geomecânica de rejeitos aplicada a barragens de aterro hidráulico**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002. Cap. 3.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Belo Horizonte: Ibama, 2015. 38 p.

Disponível em:

<[http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias\\_ambientais/laudo\\_tecnico\\_preliminar.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2016.

ICOLD (2001). Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, International Commission on Large Dams (ICOLD), France, 144 p. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA 2012. Relatório de pesquisa - **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**.

Disponível em:

<[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120814\\_relatorio\\_atividade\\_mineracao.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120814_relatorio_atividade_mineracao.pdf)> Acessado em: Maio de 2016.

KAWA, Prof Luciane. **Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro**. 2015.

Disponível em: <<http://professoralucianekawa.blogspot.com.br/2015/11/tecnicas-para-disposicao-de-rejeitos-de.html>>. Acesso em: 09 jul. 2016.

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

LAURIANO, André Wilhiam. **ESTUDO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE FUNIL: COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS FLDWAV E HEC-RAS**. 2009. 251 f.

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

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MAIA, Francisco Neto. **Análise dinâmica de rompimento em barragem de rejeitos**.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA. 37p. Belo Horizonte, 2015.

MARENCO, Daniel. **MP de Minas Gerais vê falhas em licenciamento da barragem de Fundão: Órgão afirma que autorização foi concedida sem projeto executivo e estudo sobre drenagem**. 2015. Publicado pelo jornal O Globo. Disponível em:

<<http://oglobo.globo.com/brasil/mp-de-minas-gerais-ve-falhas-em-licenciamento-da-barragem-de-fundao-18494612>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

MEDEIROS, Carlos Henrique de A. C.; PINTO, Antônio A. Veiga. A IMPORTÂNCIA DOS FATORES NÃO TECNOLÓGICOS NA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS. DESTAQUES PARA O ERRO HUMANO E GESTÃO DE RISCO. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens: COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.52-58, 01 abr. 2014.

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

MGTV (Belo Horizonte) (Org.). **Relatório da Comissão Extraordinária das Barragens é aprovado na ALMG**. 2016. Publicado pelo jornal O Globo. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/07/relatorio-da-comissao-extraordinaria-das-barragens-e-aprovado-na-almg.html>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

MINAS, Agência. **Polícia Civil conclui primeiro inquérito referente ao rompimento da Barragem de Fundão**. 2016. Disponível em: <<http://agenciaminas.mg.gov.br/noticia/policia-civil-conclui-primeiro-inquerito-referente-ao-rompimento-da-barragem-de-fundao>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

**MINÉRIOS & MINERALES**. São Paulo: Cotta Produções Gráficas, v. 376, nov. 2015. Mensal.

MIRANDA, Eng. Ivson. **Efeito PIPING em Barragens de Terra**. 2016. Portal Engenheiros Unidos. Disponível em: <<http://engenheirosunidos.com.br/efeito-piping-em-barragens-de-terra/>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

MISLEH, Soraya. **MARIANA – O desastre que a boa engenharia poderia ter evitado**. 2015. Publicado pelo Sindicato dos Engenheiros do Amazonas- SENGE-AM. Disponível em: <<http://sengeamazonas.com.br/mariana-o-desastre-que-a-boa-engenharia-poderia-ter-evitado>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

OLIVEIRA, J. B. V. R. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeito como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e a segurança de barragens**. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

OLIVEIRA, José Bernardo Vasconcelos Rodrigues de. **MANUAL DE OPERAÇÃO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS COMO REQUISITO ESSENCIAL AO GERENCIAMENTO DOS REJEITOS E À SEGURANÇA DE BARRAGENS**. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola de Minas. Nugeo. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <[http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo\\_2014/teses/arquivos/jose-bernardo-v-r-oliveira.pdf](http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/jose-bernardo-v-r-oliveira.pdf)>. Acesso em: 12 jul. 2016.

OLIVEIRA, Nildo Carlos. Tragédia de Mariana coloca engenharia geotécnica em alerta. **Minérios & Minerais: Especial Barragens**, São Paulo, v. 376, n. 5, p.18-19, nov. 2015. Trimestral.

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

PENNA, A.D.M. (1998). The need for dam safety. Case Studies on Tailings Management. International Council on Metals and Environment (ICME), P. 5-6.

PENNA, Lorena Romã; OLIVEIRA FILHO, Waldyr Lopes de; ARAÚJO, Luiz Gonzaga de. Liquefação Estática em Depósitos de Rejeitos de Mineração. In: ENGENHARIA GEOTÉCNICA PARA O DESENVOLVIMENTO, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE. 2010, Ouro Preto. Anais. Gramado: Cobramseg, 2010. p. 1 - 7. Disponível em: <[http://www.geosynthetica.net/wpcontent/uploads/LiquefacaoEstaticaMineracao\\_Samarco\\_Cobramseg2010.pdf](http://www.geosynthetica.net/wpcontent/uploads/LiquefacaoEstaticaMineracao_Samarco_Cobramseg2010.pdf)>. Acesso em: 02 ago. 2016.

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

PORTAL UAI. **Dependente da mineração, Minas vive paradoxo após tragédia ambiental em Mariana**. 2015. Disponível em: <[http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2015/11/20/internas\\_economia,710096/dependente-da-mineracao-mg-vive-paradoxo-apos-tragedia-ambiental-em-m.shtml](http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2015/11/20/internas_economia,710096/dependente-da-mineracao-mg-vive-paradoxo-apos-tragedia-ambiental-em-m.shtml)> . Acesso em: 06 maio 2016.

RESO. Soluções Ambientais. **Mineração e seus diversos tipos de resíduos**. Fevereiro de 2015. Disponível em: <<http://resoambiental.com/2015/02/mineracao-e-seus-diversos-tipos-de-residuos>>. Acessado em: Maio de 2016.

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

RIBEIRO, L.F.M. **Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados à Barragens de Rejeitos**. 2000. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 232 p.

RIBEIRO, L.F.M., PRESOTTI, E.S., PEREIRA, E.L., 2003 – “**Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro**”, In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre.

RIBEIRO, Vinícius Queiroga Fortes. **Proposta de metodologia para avaliação dos efeitos de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos**. 2015. 291 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RIBEIRO, Vinícius Queiroga Fortes. **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE RUPTURAS DE ESTRUTURAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS**. 2015. 291 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SANTOS, A.G., 2004 – **Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro**, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, julho de 2004.

SANTOS, Djanira Alexandra Monteiro dos. **Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro**. 2007. 9 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. REVISTA ESPAÇO DA SOPHIA - Nº 08 – NOVEMBRO/2007 – MENSAL – ANO I.

SINDIEXTRA - Sindicato da Indústria Mineral do Estado de Minas Gerais. Mineração em Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.sindiextra.org.br/?pag=interna&cat=perfil-do-setor&id=50>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

SOARES, Lindolfo (Org.). **Barragem de Rejeitos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia - Cetem, 2010. 69 p. (Coordenação de Processos Minerários – COPM). Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/769/CCL00410010.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 09 jul. 2016.

SOUZA, Leonardo Mesquita de (Org.). **Perícia de Engenharia Civil e Geologia no caso da Barragem do Fundão**. Belo Horizonte: Superintendência Regional no Estado de Minas Gerais Setor Técnico-científico - Setec, 2016. 71 slides, color. Polícia Federal.

SUPRAM - Superintendências Regionais de Meio Ambiente. **PARECER ÚNICO Nº 211/2014 (DOC SIAM nº 1165006/2014)**. Belo Horizonte: Copam, 2014. 10 p. Disponível em: <[http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/URCS\\_SupramCentral/RioVelhas/79/13.1-herculano.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/URCS_SupramCentral/RioVelhas/79/13.1-herculano.pdf)>. Acesso em: 14 jul. 2016.

TOMÁS, Denis. **PERMEABILIDADE NOS SOLOS: Gradiente Crítico**. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/104736750/Permeabilidade-1>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

TONIDANDEL, Rodrigo de Paula. **ASPECTOS LEGAIS E AMBIENTAIS DO FECHAMENTO DE MINA NO ESTADO DE MINAS GERAIS**. 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia Econômica Aplicada, Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

VALE, João Henrique do. **Buscas por trabalhador entram no quarto dia em local indicado por cães**: Cães farejadores transportados de Uberaba indicaram um ponto onde possivelmente o corpo da vítima está. 2014. Publicado pelo Jornal Correio Braziliense. Disponível em: <[http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2014/09/13/internas\\_polbraeco,4469](http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2014/09/13/internas_polbraeco,4469)>

[49/buscas-por-trabalhador-entram-no-quarto-dia-em-local-indicado-por-caes.shtml](#)>. Acesso em: 14 jul. 2016.

VALERIUS, Marcelo Bernardi. **CADASTRO E ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DAS BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DO ESTADO DE GOIÁS**. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Cap. 3. Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/245-2014.pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

VICK, S. G. **Planning, design and analysis of tailing dams**. New York: John Wiley & Sons. 1983. 369 p. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books/about/Planning\\_Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Tailings.html?id=4yloQgAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/Planning_Design_and_Analysis_of_Tailings.html?id=4yloQgAACAAJ&redir_esc=y)> Acesso em: 09 jul. 2016.