



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS
ESCOLA DE MINAS



**ANÁLISE DE ESTUDOS SOBRE O COLAPSO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO - 2015.**

MARCELO FERREIRA CASTRO

Ouro Preto - MG

2021

Marcelo Ferreira Castro

**ANÁLISE DE ESTUDOS SOBRE O COLAPSO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO - 2015.**

Monografia de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para conclusão do curso.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Ouro Preto – MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C355a Castro, Marcelo Ferreira.
Análise de estudos sobre o colapso da Barragem de Fundão - 2015.
[manuscrito] / Marcelo Ferreira Castro. - 2021.
65 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Barragens de rejeitos. 2. Solos - Liquefação. 3. Sismologia - Sismos.
4. Terremotos. I. Lima, Hernani Mota. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 624.136:550.34

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas



Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e nove dias do mês de abril de 2021, às 14h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Marcelo Ferreira Castro** matrícula: 15.2.1333, intitulado: **ANÁLISE DE ESTUDOS SOBRE O COLAPSO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – 2015,**

perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, Prof^a. Dr^a. Tatiana Barreto dos Santos, e M.Sc. Danielle Aparecida Menezes. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a Prof^a. Dr^a. Tatiana Barreto dos Santos, segundo, a M.Sc. Danielle Aparecida Menezes e em último, o Prof. Dr. Hernani Mota de Lima. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 8,5 (oito e cinco), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 29 de abril de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: Prof^a. Dr^a. Tatiana Barreto dos Santos

Membro: M.Sc. Danielle Aparecida Menezes

Discente: Marcelo Ferreira Castro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde, além da determinação, persistência e confiança necessárias para não desanimar durante a realização deste curso de graduação. Agradeço também por ter colocado em minha vida todos os tipos de pessoas com quem convivi e contribuíram de alguma forma para minha formação profissional ou pessoal.

A minha mãe, Maria Imaculada Ferreira (*in memoriam*), por todo amor, conselhos e ensinamentos, confiança, dedicação, coragem e resiliência passados a mim durante os 27 anos em que pude conviver com ela.

Ao Tio Nem, por ser um grande conselheiro e exemplo de ser humano e profissional, além de fazer com perfeição o papel de pai em minha vida.

A Dhia por ter um coração maravilhoso, por sempre me motivar e apoiar em seguir em frente de cabeça erguida, e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos amigos para toda vida, Henrique e Carla, em especial a minha afilhada Sofia, por me apoiarem em todas as decisões.

Ao Dudu, meu amigo que sempre me apoiou, me aconselhou e me ouviu ao longo de todo curso.

A Aline, Aureliano, Blenda, Carol, Thais, Thamiris, Vitinho e Vivis por me ajudarem, incentivarem e não deixarem que desanimasse.

A todos os Professores da Universidade Federal de Ouro Preto, em especial aos Professores da gloriosa Escola de Minas e do Departamento de Engenharia de Minas, pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

Um agradecimento em especial ao meu orientador de curso e amigo, Professor Hernani Mota de Lima, por toda sabedoria e exemplo passados, além de toda paciência, dedicação e oportunidades que me proporcionou ao longo de toda graduação.

Agradeço também aos Professores Adilson Curi, José Aurélio Medeiros da Luz, José Fernando Miranda e José Margarida da Silva pela confiança e oportunidades depositadas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Minas, em especial a Dona Izabel, minha gratidão.

*“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”
Albert Einstein.*

RESUMO

5 de novembro de 2015 entrou para a história do Brasil. Neste dia, por volta das 15:45 horas locais, a Barragem de Rejeitos de Fundão, pertencente a empresa SAMARCO Mineração S.A entrou em colapso. De imediato, a barragem liberou aproximadamente 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos em forma de lama fluida. Após o acidente, inúmeros estudos e investigações foram realizadas nos âmbitos acadêmico, empresarial e jurídico para tentar determinar o possível gatilho e os eventos que possam ter causado e iniciado os processos que levaram a falha da Barragem de Rejeitos de Fundão. Dessa forma, este trabalho de conclusão de curso teve como finalidade realizar uma análise comparativa entre documento “*Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam issued by the Fundão Tailings Dam Review Panel on August 25, 2016*” e o trabalho investigativo desenvolvido pelo Eng. De Minas Kleber Luiz de Mendonça Terra, publicado em 2019, que teve o suporte do laudo pericial técnico da Perícia de Engenharia da Polícia Federal. Assim, foram debatidas a localização de início da falha da Barragem de Rejeitos de Fundão, o papel dos sismos ocorridos no dia 5 de novembro de 2015 no colapso do barramento e também, a árvore de falhas elaborada para analisar os eventos que antecederam a ruptura. Morgenstern *et al.*, (2016) constatou que o colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão ocorreu através do deslizamento fluidos provocado por liquefação estática devido a extrusão lateral sofrida pela lama comprimida na ombreira esquerda do barramento. Com relação aos sismos ocorridos, Morgenstern *et al.*, (2016) concluiu que foram de baixa magnitude e por isso, não seriam considerados como danosos a uma barragem comum. Contudo, para a Barragem de Rejeitos de Fundão, o processo de ruptura, de acordo com Morgenstern *et al.*, (2016), já estava bem avançado e provavelmente foi acelerado pelos tremores. Entretanto, no estudo apresentado por Terra (2019), relatou-se haver um fator de segurança abaixo de 1 na ombreira direita e que esta poderia ter iniciado a falha, se sujeita a condições não drenadas, uma vez que este fator de segurança é inferior ao fator de segurança da ombreira esquerda. Com relação aos sismos, evidências e cálculos sugerem que a intensidade dos tremores e os danos provocados foram maiores do que o esperado para sismo de magnitude 2,6 e por isso, há uma probabilidade de que o rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão tenha ocorrido devido a uma falha por liquefação cíclica induzida por sísmica. Dessa forma, nota-se que há necessidade de um melhor entendimento dos fatores que possam ter levado a Barragem de Rejeitos de Fundão, uma vez que está compreensão pode contribuir significativamente para uma melhora das práticas da engenharia pratica de barragens de mineração do Brasil, tornando assim a mineração brasileira mais sustentável e segura.

Palavras-chaves: Barragem de Rejeitos de Fundão, liquefação, sismos.

ABSTRACT

November 5, 2015 entered the history of Brazil. On this day, around 15:45 local time, the Fundão tailings dam, owned by the company SAMARCO Mineração S.A collapsed. The dam immediately released approximately 32 million cubic meters of tailings in the form of fluid mud. After the accident, numerous studies and investigations were carried out in the academic, business and legal fields to try to determine the possible trigger and the events that may have caused and started the processes that led to the failure of the Fundão tailings dam. Thus, this course completion work aimed to perform a comparative analysis between the document "Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam issued by the Fundão Tailings Dam Review Panel on August 25, 2016" and the investigative work developed by Eng. De Minas Kleber Luiz de Mendonça Terra, published in 2019, which was supported by the technical expert report of the Federal Police's Engineering Expertise. Thus, the location of the beginning of the failure of the Fundão Reject Dam was discussed, the role of earthquakes that occurred on November 5, 2015 in the collapse of the dam and also the fault tree designed to analyze the events that preceded the rupture. Morgenstern et al., (2016) found that the collapse of the Fundão Tailings Dam occurred through fluid sliding caused by static liquefaction due to the lateral extrusion suffered by the mud compressed in the left shoulder of the dam. Regarding the earthquakes that occurred, Morgenstern et al., (2016) concluded that they were of low magnitude and therefore, they would not be considered as harmful to a common dam. However, for the Fundão Tailings Dam, the rupture process, according to Morgenstern et al., (2016), was already well advanced and probably was accelerated by the tremors. However, in the study presented by Terra (2019), it was reported that there is a safety factor below 1 in the right jamb and that it could have started the failure, subject to undrained conditions, since this safety factor is lower to the safety factor of the left abutment. With regard to earthquakes, evidence and calculations suggest that the intensity of the tremors and the damage caused were greater than expected for a 2.6 magnitude earthquake and therefore there is a probability that the Fundão tailings dam rupture occurred due to a seismic-induced cyclical liquefaction failure. Thus, it is noted that there is a need for a better understanding of the factors that may have led to the Fundão Tailings Dam, since this understanding can contribute significantly to an improvement in the practical engineering practices of mining dams in Brazil, making thus the most sustainable and safe Brazilian mining.

Keywords: Waste Dam of Fundão, liquefaction, earthquakes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Componentes de uma Barragem. | 14 |
| Figura 2: Barragem de Fundão - Mariana, Minas Gerais, Brasil..... | 15 |
| Figura 3: Processo de alteamento de uma barragem de rejeito pelo Método de Construção a Montante. | 16 |
| Figura 4: Componentes de uma Barragem Convencional de Rejeitos pelo Método de Construção a Montante. | 16 |
| Figura 5: Perfil da Barragem de Fundão..... | 18 |
| Figura 6: Barragem de Fundão antes e depois do colapso - 2015. | 19 |
| Figura 7: Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus da região de Bento Rodrigues – Mariana – Minas Gerais..... | 20 |
| Figura 8: Distrito de Bento Rodrigues após a passagem da onda de rejeitos..... | 20 |
| Figura 9: Altura em que a lama de rejeitos proveniente da Barragem de Fundão atingiu na cidade de Paracatu de Baixo..... | 21 |
| Figura 10: Destruição causada pelo colapso da Barragem de Fundão em Paracatu de Baixo. | 21 |
| Figura 11: Processos de Liquefação em uma Barragem de Rejeitos de Construção a Montante a partir do Rejeito ou do Barramento..... | 23 |
| Figura 12: Exemplo de Estrutura de uma Análise por Árvore de Falha. | 24 |
| Figura 13: Piping no Talude a Jusante - 2009..... | 30 |
| Figura 14: Recuo da Ombreira Esquerda da Barragem de Fundão..... | 31 |
| Figura 15: Saturação no Pé do Talude de Recuo da Ombreira Esquerda - 2014. | 32 |
| Figura 16: Trincas no Talude de Recuo da Ombreira Esquerda - 2014. | 32 |
| Figura 17: Localização das Testemunhas Oculares no momento da Ruptura da Barragem de Fundão. | 35 |
| Figura 18: Crista do Recuo da Ombreira Esquerda e Platô. | 36 |
| Figura 19: Árvore de Falha da Barragem de Fundão..... | 40 |
| Figura 20: Campo de Visão das Principais Testemunhas no Momento do Colapso. | 46 |
| Figura 21: Trincas observadas na Estrutura Interna das edificações da SAMARCO Mineração S.A. | 47 |
| Figura 22: Tapete drenante na elevação 826 metros. | 51 |
| Figura 23: Sequência de Eventos que supostamente levaram a Variação da Carga Estática e por sua vez, na Liquefação Estática. | 54 |
| Figura 24: Eventos que supostamente que poderiam resultar na Variação da Carga Estática e por sua vez na Liquefação Estática, mas foram descartados pelo Comitê. | 55 |
| Figura 25: Eventos Sísmicos como o causador dos fenômenos que levaram ao gatilho..... | 56 |
| Figura 26: Nova Árvore de Falhas para o Rompimento da Barragem de Fundão em 2015. | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1: Benefícios do Uso do Método de Árvore de Falhas. | 25 |
| TABELA 2: Funções de uma Árvore de Falhas..... | 26 |
| TABELA 3: Documentos Analisados pelo Comitê..... | 28 |
| TABELA 4: Abalos Sísmicos em 5 de Novembro de 2015..... | 34 |
| TABELA 5: Resumo dos acontecimentos que podem ter contribuído para a ruptura da Barragem de Fundão em 2015..... | 38 |
| TABELA 6: Modos Preliminares de Falhas da Barragem de Fundão..... | 39 |
| TABELA 7: Eventos que poderiam causar a Liquefação Estática na Barragem de Rejeitos de Fundão. | 53 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1) INTRODUÇÃO | 10 |
| 2) DESENVOLVIMENTO | 12 |
| 2.1. METODOLOGIA ADOTADA | 12 |
| 2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 2.2.1. Caracterização da Barragem de Fundão | 13 |
| 2.2.2. Liquefação | 22 |
| 2.2.2. Análise por Árvore de Falha | 24 |
| 2.3. ANÁLISE DO RELATÓRIO SOBRE AS CAUSAS IMEDIATAS DA RUPTURA DA BARRAGEM DE FUNDÃO – 2016 | 27 |
| 2.3.1. Considerações Iniciais | 27 |
| 2.3.2. Fatos Importantes da História da Barragem de Fundão. | 29 |
| 2.3.3. Conclusões do Comitê | 38 |
| 2.4. ANÁLISE DO COLAPSO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – 2019 | 43 |
| 2.4.1 Considerações Iniciais | 43 |
| 2.4.2 Possíveis modos de Falha da Barragem de Fundão. | 44 |
| 2.4.3 Localização do Início da Falha | 45 |
| 2.4.4 Eventos Sísmicos | 47 |
| 2.4.5 Análise por Árvore de Falha | 50 |
| 2.4.6 Conclusão apresentada por Terra (2019) | 57 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |

1) INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas construídas pelos humanos que objetivam armazenar água ou outros fluidos para diversos fins. Dentre eles, encontram-se o armazenamento de água para consumo humano, para geração de energia elétrica, para regularização de vazões e o armazenamento de rejeitos industriais.

Apesar dos benefícios que as barragens trazem aos seres humanos, impactos ambientais negativos também são associados à sua construção e operação. Embora seja pequena a possibilidade de falha de uma barragem, ela existe e representa um risco potencial para a população e para o meio ambiente a jusante, além de sua ruptura poder representar grandes perdas econômicas.

As barragens podem ser categorizadas em dois tipos principais, de acordo com os materiais que constituem seu barramento: de concreto e geotécnicas. Barragens de concreto utilizam como matéria prima o concreto, enquanto barragens geotécnicas podem ser de enrocamento e de terra (FERREIRA, 2017).

De acordo com Neto (2016), danos produzidos por ruptura de barragens tem consequências catastróficas devido ao aumento repentino de vazão, profundidade e velocidade de escoamento, tanto dentro da calha como na planície de inundação, principalmente se tratando de barragens próximas a regiões urbanizadas.

No Complexo Industrial de Germano, localizado no Município de Mariana – Minas Gerais, encontra-se um empreendimento minerário sob a gestão da SAMARCO Mineração S.A; empresa de mineração cuja composição acionária está igualmente dividida entre a Vale S.A (CVRD) e a *BHP Billiton* Brasil (SAMARCO, 2013).

Em 2015, a SAMARCO Mineração S.A era a terceira maior mineradora do Brasil, com um sistema produtivo que se estendia de Minas Gerais ao Espírito Santo. A mineradora iniciou suas atividades em 1977 para explorar minério itabirítico com baixo teor de ferro, além de processar e produzir pellet feed de minério de ferro. (PEPF, 2018). O empreendimento

consiste em um complexo minerário formado por duas minas, três unidades de beneficiamento, três minerodutos, quatro usinas pelotizadoras e um terminal portuário (JUSTIÇA GLOBAL, 2016).

Em 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão. O colapso da estrutura, situada na Bacia do Rio Gualaxo do Norte, afluente do Rio do Carmo, ocasionou o extravasamento de aproximadamente 55 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro (ANTUNES, 2015); que além de danos materiais causados em diversas cidades dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, resultou também em danos irreparáveis ao meio ambiente e à população atingida, além de vidas perdidas.

Após o acidente, inúmeros estudos e investigações foram realizadas nos âmbitos acadêmico, empresarial, ambiental e jurídico para tentar identificar qual foi possível gatilho e os eventos que possam ter causado e iniciado os processos que levaram a ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão.

Dessa forma, este trabalho de conclusão de curso teve como finalidade realizar uma análise comparativa entre o documento *“Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam issued by the Fundões Tailings Dam Review Panel on August 25, 2016”* e o trabalho investigativo, desenvolvido por Terra (2019), o qual teve o suporte do laudo pericial técnico da Perícia de Engenharia da Polícia Federal (2018).

Destaca-se que o propósito dessa pesquisa não foi afirmar ou responder o que e/ou como desencadeou-se o colapso da Barragem do Fundão, o seu processo de liquefação e quais os fatores que promoveram a sua ocorrência. Trata-se de um estudo de cunho comparativo entre dois trabalhos realizados por pessoas técnicas e capacitadas.

2) DESENVOLVIMENTO

2.1. METODOLOGIA ADOTADA

A fim de realizar-se uma análise comparativa entre duas publicações relevantes, que apresentaram discussões fundamentais sobre as causas que levaram a Barragem de Rejeitos de Fundão ao colapso, foram estudadas as bibliografias relacionadas a seguir.

- Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão - 2016, elaborado por um comitê composto por *Norbert R. Morgenstern* (Presidente), *Steven G. Vick*, *Cássio B. Viotti*, *Bryan D. Watts*, contratados pela *BHP Billiton Brasil LTDA.* e *Vale S.A.*;
- relatório denominado “Análise do Colapso da Barragem de Fundão - 2019” feito pelo Engenheiro de Minas *Kleber Luiz de Mendonça Terra*, que em 2015 ocupava o cargo de Diretor de Operações e Infraestrutura na *SAMARCO Mineração S.A.*

Os fatos apresentados no “Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão – 2016” foram confrontados de forma lógica e técnica no estudo “Análise do Colapso da Barragem de Fundão – 2019” apresentado no Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN da Universidade Federal de Ouro Preto em novembro de 2019.

Terra (2019) em sua análise, utilizou como referência o laudo pericial técnico realizado pela Perícia de Engenharia da Polícia Federal e confrontou em seu estudo onde a falha da Barragem de Rejeitos de Fundão teria se iniciado, o papel dos sismos ocorridos no dia 5 de novembro de 2015 e sua influência no colapso do barramento, e também a árvore de falhas elaborada pelo Comitê de especialista, que apresenta a sequência de eventos que se sucederam até a ruptura.

2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.1. Caracterização da Barragem de Fundão

2.2.1.1. Considerações Iniciais

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2016), barragens são estruturas construídas em um curso de água, permanente ou temporário, utilizada com o propósito de reter ou acumulação de água ou outras substâncias líquidas ou também é utilizada para contenção de misturas de líquidos e sólidos, como é o caso dos rejeitos de mineração.

A disposição dos subprodutos sem valor agregado de um minério advindos de uma usina de beneficiamento mineral, também conhecido pelo termo rejeito, é um desafio para mineração brasileira, levando-se em conta principalmente as questões ambientais e econômicas.

Por não possuir valor econômico, o rejeito precisa ser armazenado com uma maior economicidade. Contudo, deve-se também, minimizar os impactos ambientais resultantes dessa disposição.

Tendo em vista que, na maioria dos casos, a maior fração do minério lavrado torna-se rejeito, principalmente com o aumento da lavra de depósitos de baixo teor, o uso de barragens criteriosamente projetadas e com reaproveitamento da água recuperada, são utilizadas para comportar todo o volume de material que é produzido na forma de polpa (CVRD, 2003).

O barramento é um aterro homogêneo ou zoneado, construído transversalmente ao curso de água. A parte do barramento em contato com a água é chamada talude de montante, sendo o lado oposto denominado de talude de jusante. A crista liga transversalmente as duas margens. As margens do barramento são denominadas de ombreiras - margem direita designada de ombreira direita e margem esquerda de ombreira esquerda (Figura 1) (ANA, 2016).

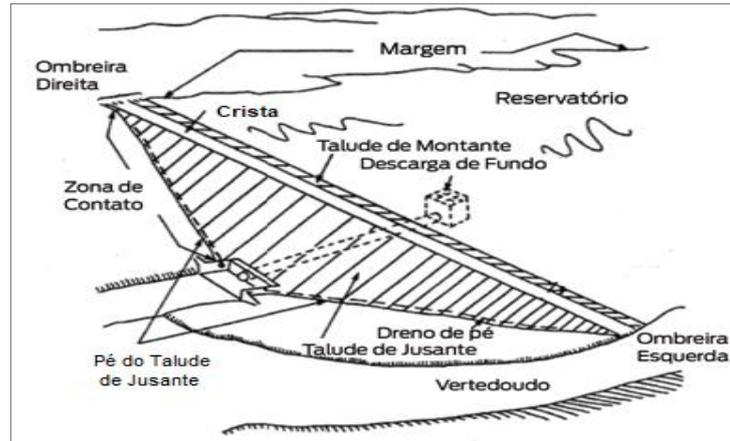


Figura 1: Componentes de uma Barragem.

Fonte: Adaptado de ANA, 2016.

Ressalta-se que as denominações usadas como ombreira esquerda e direita indicam direção, localização ou orientação do ponto de vista de um observador voltado com a fase para jusante da barragem (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

A seleção de uma área para a construção de barragem de rejeitos deve levar em consideração o local de beneficiamento do minério, a topografia, a hidrologia local, geologia e águas subterrâneas, fundação, sísmica do local e comunidades vizinhas (USEPA, 1994).

Da mesma forma, algumas características do rejeito devem ser conhecidas, observadas e levadas em consideração, uma vez que são parâmetros que interferem diretamente em índices estudados pela mecânica dos solos, como: a densidade *in situ* do material, índices de vazios, índices de compressão, permeabilidade e resistência ao cisalhamento (SOARES, 2010).

Devido a tamanha complexidade de construção e manutenção de uma barragem de rejeitos, e em virtude também das rigorosas leis vigentes, além do risco que a população a jusante da barragem é exposta, algumas empresas mineradoras optaram por utilizar o rejeito para preenchimento de áreas já lavradas, enquanto outras submetem o rejeito ao processo de separação sólido-líquido a fim de se retirar o excesso de água para que, dessa forma, o mesmo possa ser empilhado e/ou depositado com uma maior segurança e um menor impacto ambiental.

2.2.1.2 Método de Construção a Montante

O método de construção a montante foi utilizado para edificação dos alteamentos da Barragem de Rejeitos de Fundão, alvo deste estudo (Figura 2). Por isso, é conveniente destacar as características desse método de estruturação de uma barragem e ressaltar que essa técnica de alteamento foi aplicada na grande maioria das barragens construídas no passado (ICOLD, 2001).



Figura 2: Barragem de Fundão - Mariana, Minas Gerais, Brasil.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.

Na forma de alteamento em questão, a estrutura de contenção inicia-se a partir de um barramento inicial, chamado dique de partida. Neste tipo de alteamento a linha central da crista da barragem é deslocada em direção ao reservatório (LOZANO, 2006).

Na estrutura inicial devem estar presentes todos os sistemas necessários para se garantir a segurança e estabilidade da barragem de rejeitos. Dessa forma, uma vez construído o dique de partida, novos rejeitos são depositados a montante da crista sobre aqueles dispostos anteriormente, formando assim novos diques na sequência (FARIA, 2018).

Durante este processo é formada uma “praia” de rejeitos arenosos já sedimentados, que servirá de base para construção do próximo alteamento (FARIA, 2018). O dique subsequente será construído sobre o topo do dique anterior na praia, conforme visualizado nas figuras 3 e 4.

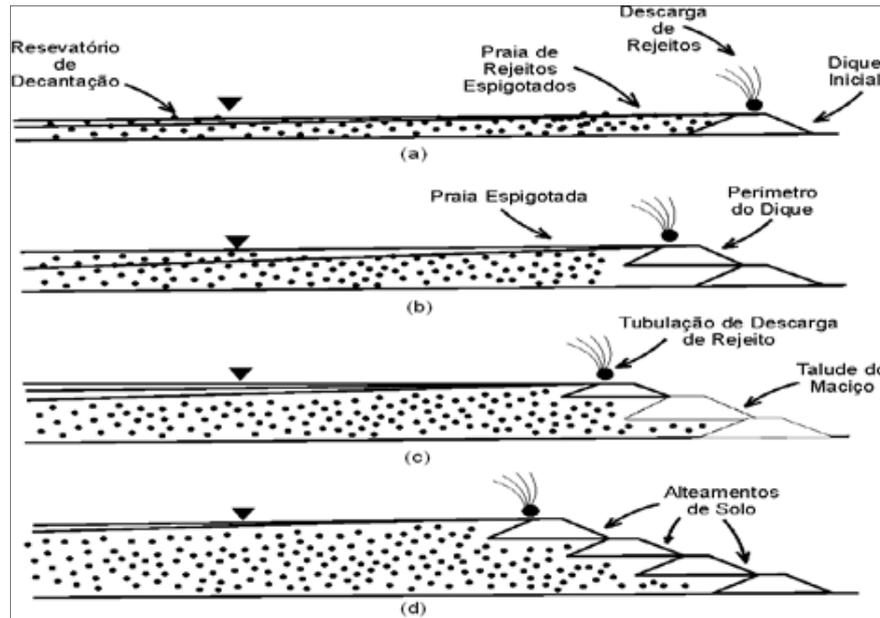


Figura 3: Processo de alteamento de uma barragem de rejeito pelo Método de Construção a Montante.

Fonte: Vick, 1983 *apud* Soares, 2010.

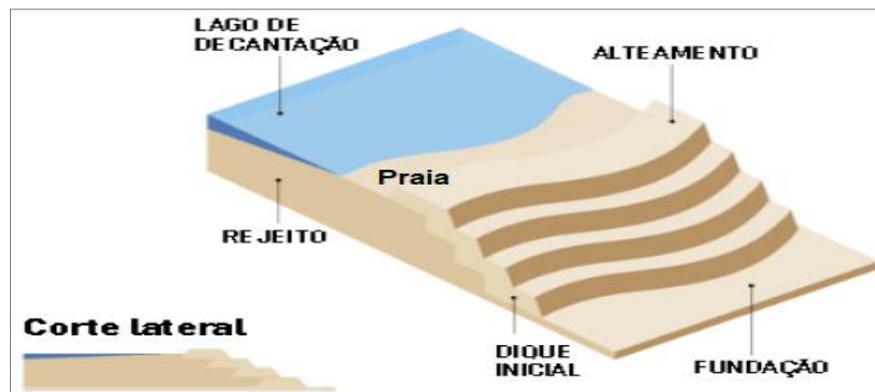


Figura 4: Componentes de uma Barragem Convencional de Rejeitos pelo Método de Construção a Montante.

Fonte: Adaptado de Moraes, 2019.

Segundo Faria (2018), durante o lançamento dos rejeitos, ocorre uma segregação granulométrica, ficando a fração mais grosseira depositada próxima ao maciço, formando assim a “praia”. Para que o material lançado sirva de base para um novo alteamento, exige-se algumas características granulométricas como, por exemplo, que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, para que favoreça a segregação granulométrica. Já as frações mais finas fluem em direção ao lago de decantação ou são lançadas no mesmo.

Chambers & Higman (2011) afirmam que, geotecnicamente, este é o método menos seguro tendo em vista que as estruturas de alteamento estão sobre o próprio rejeito e, quando esse chega da usina de tratamento, pode permanecer saturado por longos períodos.

“A construção dos alteamentos deve observar, entre outros fatores, a sedimentação, para redução dos riscos de acidentes. Entretanto, o aumento da produção de minério e consequentemente maior geração de detritos levam à necessidade de construção de novos alteamentos, realizados muitas vezes sem a observância da sedimentação necessária para tal. Caso não ocorra a sedimentação adequada, poderão surgir problemas de subpressão no reservatório, causadas pela variação da percolação de água ali armazenada. O excesso de subpressão afetará a fundação da barragem, podendo ocasionar alterações nas condições geológico-geotécnicas consideradas para o projeto” (FARIA, 2018, p.02).

De acordo com Cardozo *et al.* (2016) e Rodrigues (2017), como vantagens do método tem-se o menor custo, maior velocidade de construção e um volume de material usado para seu alteamento menor por usar o próprio rejeito com base em sua construção.

As desvantagens são baixa segurança devido a suscetibilidade à liquefação e ao *piping*, dificuldade de implementação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível de água dentro da barragem – o que se torna um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura – e, se houver presença de rejeitos não compactados adequadamente, a superfície crítica de deslizamento pode passar pelos rejeitos sedimentados. (CARDOZO *et al.*, 2016, e RODRIGUES, 2017).

2.2.1.3. A Barragem de Rejeitos de Fundão

A Barragem de Fundão era uma barragem de rejeitos de minério de ferro com cerca de 110 m de altura e de aproximadamente 77 milhões de m³ de volume armazenado, localizada na cidade de Mariana, Minas Gerais, Brasil. Nos dias anteriores à falha, a crista da barragem estava aproximadamente na elevação de 900 m (MACHADO, 2017). A figura 5 apresenta o perfil da Barragem de Fundão.

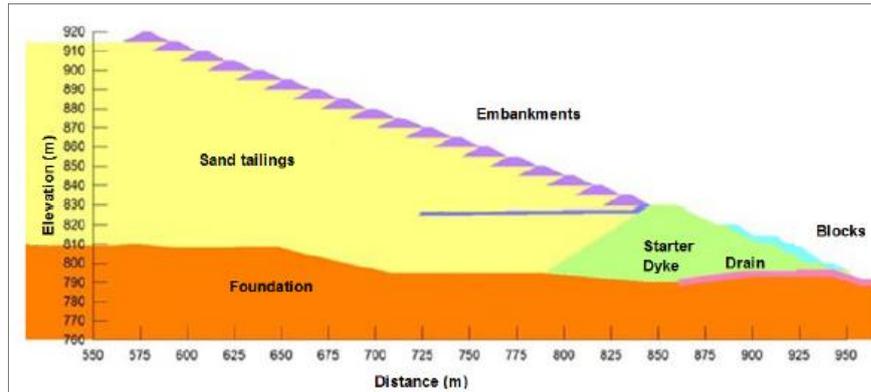


Figura 5: Perfil da Barragem de Fundão.

Fonte: Palu, *apud* Rezende, 2013.

A estrutura foi projetada para armazenar rejeitos oriundos dessa atividade minerária, compostos, primordialmente, por quartzo, de tamanho areia e silte e limos, que são grãos de tamanhos finos e argilosos (PALU, 2019 *apud* MORGENSTERN *et al.*, 2016).

O rompimento da barragem aconteceu em 5 de novembro de 2015 e liberou de imediato aproximadamente 32 milhões de m³ de rejeitos, causando o galgamento da barragem de água Santarém, imediatamente à jusante, a destruição da cidade distrital de Bento Rodrigues, danos substanciais nas cidades seguintes além do impacto ao meio ambiente a jusante. O acidente causou também 17 vítimas fatais e 2 desaparecidos, além de continuar escoando rejeitos de forma constante, durante um período de tempo, totalizando 23 milhões de m³ de rejeitos escoados (PALU, 2019).

“Às 15:45 do dia 5 de novembro de 2015 gritos vieram pelo rádio de que a barragem estava desabando. Uma nuvem de poeira se formou sobre a ombreira esquerda, e aqueles mais próximos da área designada como "recuo" poderiam ver rachaduras se formando na manta de drenagem construída recentemente. A encosta acima deles estava começando a ondular “como uma onda” como se estivesse “derretendo”, derrubando a crista da barragem depois dela. Os rejeitos que tiveram sido solo sólido poucos minutos antes, se transformaram em um rio turbulento...”. Depoimento de uma testemunha ocular (PALU 2019 *apud* MACHADO, 2017, p.36).

A figura 6(a) mostra a Barragem de Fundão e seu reservatório antes e depois do rompimento; e a Figura 6(b) os danos causados.



Figura 6: Barragem de Fundão antes e depois do colapso - 2015.

Fonte: Palu 2019, *apud* Morgenstern *et al.*, 2016.

Após a ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão, a Barragem de Santarém, construída para armazenamento de água e rejeitos, localizada imediatamente a jusante, sofreu galgamento sem colapsar. Dessa forma, o material liberado fluiu pelo córrego Santarém, seguindo pelo Rio Gualaxo do Norte, que deságua no Rio do Carmo a aproximadamente 73 km a jusante, que, por sua vez, é um dos formadores do Rio Doce.

Solos, vegetação e outros materiais foram arrastados neste percurso, resultando em uma mistura de rejeitos, solos e detritos vegetais e antrópicos, como pontes e construções, que foram se depositando ao longo das planícies de inundação, das margens e calhas dos cursos de água na medida em que as velocidades de escoamento permitiram (MACHADO, 2017).

A figura 7 retrata o antes e após o rompimento da barragem através de imagem de satélite do distrito de Bento Rodrigues, pertencente a cidade de Mariana – Minas Gerais. A figura 8 evidencia o mesmo distrito, porém com uma visão em solo após a passagem da onda de lama proveniente da Barragem de Rejeitos de Fundão



Figura 7: Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus da região de Bento Rodrigues – Mariana – Minas Gerais.

Fonte: Machado 2017, *apud* CBH Doce 2016.



Figura 8: Distrito de Bento Rodrigues após a passagem da onda de rejeitos.

Fonte: PEPF, 2018.

As figuras 9 e 10 retratam a destruição e altura da lama de rejeitos ao passar pelo distrito de Paracatu de Baixo também pertencente a cidade de Mariana – Minas Gerais, tendo sido a segunda área povoada a ser atingida pela lama de rejeitos.



Figura 9: Altura em que a lama de rejeitos proveniente da Barragem de Fundão atingiu na cidade de Paracatu de Baixo.

Fonte: Próprio autor, agosto de 2017.



Figura 10: Destruição causada pelo colapso da Barragem de Fundão em Paracatu de Baixo.

Fonte: Próprio autor, agosto de 2017.

2.2.2. Liquefação

A materialização dos cenários de ruptura de uma barragem de terra e enrocamento, com a finalidade de contenção de rejeitos, podem ser produzidos pela ação isolada ou combinação de diferentes fatores, tais como: erosão interna (*piping*), galgamento, terremoto, instabilidade de taludes, falhas na fundação e falhas estruturais, como também pelo efeito de liquefação (ICOLD, 2001).

A liquefação pode ser entendida como sendo o fenômeno da perda da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões, sob solicitações não drenadas, ou seja, um evento em que uma massa de solo passa a se comportar como um líquido. Isso ocorre devido às vibrações no terreno ou sobrecarga estática em solos saturados, onde todos os seus poros estão preenchidos com água (SILVA, 2010). Este fato pode ocorrer tipicamente em solos finos, com baixa coesão, saturados e que apresentam tendência à contração sob esforços de cisalhamento. Silva, 2010 aponta que para acontecer o fenômeno da liquefação é uma tendência que a faixa granulométrica do solo deve estar situada situada, normalmente, entre siltes grossos e areias finas.

Assim, percebe-se que o processo de liquefação de solos ou rejeitos de uma barragem pode ocorrer de duas formas: a partir de fenômeno(s) que induza(am) a liquefação sob o carregamento de forças estáticas ou através carregamentos que induzam as forças cíclicas.

No carregamento estático, os deslocamentos de massas tendem a ocorrer em apenas uma direção. Por outro lado, com relação aos carregamentos cíclicos, as forças de tensões reversas são induzidas. Essas tensões reversas resultam em um crescimento de poropressões no solo ou no rejeito e causam assim o fenômeno da liquefação (SILVA, 2010).

Segundo Aubertin *et al.* (2003), a liquefação pode ocorrer mesmo em condições de solos não saturados, mas que apresentem um grau de saturação suficiente para que a contração resulte em expulsão de água ao invés de ar. Ensaios de laboratório confirmaram a possibilidade de ocorrência da liquefação em materiais com grau de saturação da ordem de 70% a 80% (SILVA 2010, *apud* MARTIN, 1999).

A liquefação é um fenômeno potencialmente crítico no caso de depósitos de rejeitos de mineração. Com efeito, a construção de diques ou aterros sobre uma fundação contendo rejeitos fofos e saturados pode induzir aumentos rápidos nos níveis de tensões em condições não drenadas.

O evento liquefação ocorre a partir do rejeito depositado no reservatório ou do talude do maciço da barragem. No rejeito, o material antes sólido começa a se comportar como um fluido e escoar, empurrando a estrutura de contenção que, com isso, pode vir a se colapsar. No talude da barragem, ao sofrer a liquefação, a área afetada perde a resistência, tornando-se um ponto vulnerável na estrutura, podendo levar a barragem como um todo ao rompimento a partir desse ponto, como pode ser visto na figura 11.

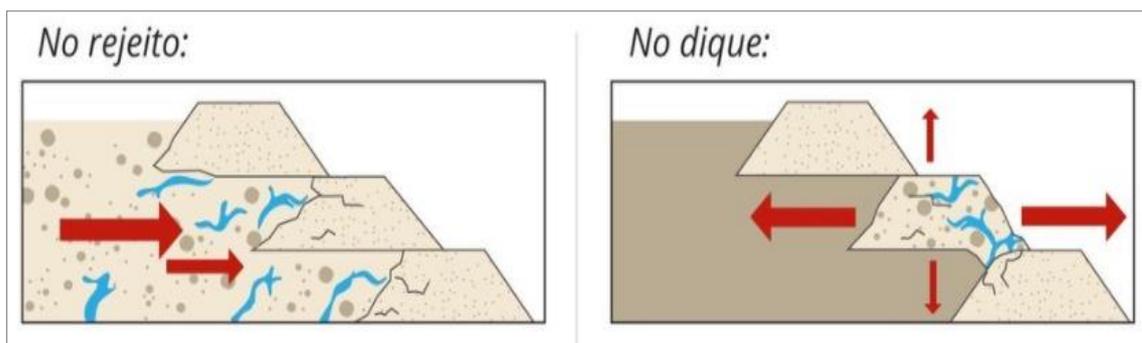


Figura 11: Processos de Liquefação em uma Barragem de Rejeitos de Construção a Montante a partir do Rejeito ou do Barramento.

Fonte: Adaptado G1.com, 2019.

2.2.2. Análise por Árvore de Falha

O método de análise por árvore de falha, também conhecida pela sigla FTA (*“fault-tree analysis”*), é um diagrama que reúne uma sequência de eventos através de uma técnica dedutiva formalizada, que permite a investigação das possíveis causas da ocorrência de estados pré-identificados indesejados do sistema. Esse estado, referido como evento de topo, está associado com o comportamento anormal do sistema, causado por uma falha de equipamentos, por erros humanos ou por perturbações externas (SAKURADA, 2001 *apud* CONTINI, 1995).

Segundo Sakurada, 2001 *apud* O'Connor (1985), trata-se de uma técnica de análise de projeto de confiabilidade e segurança que parte da consideração dos efeitos de falha do sistema, referido como “evento de topo”. Os eventos são organizados em uma estrutura lógica que utiliza “portas lógicas” para identificar a relação causal entre os eventos imediatamente abaixo da “porta lógica”.

Após a escolha do evento de topo é feita a determinação de como os eventos de níveis inferiores, individuais ou combinados, podem causar a falha do sistema (figura 12) (NASA, 2000).

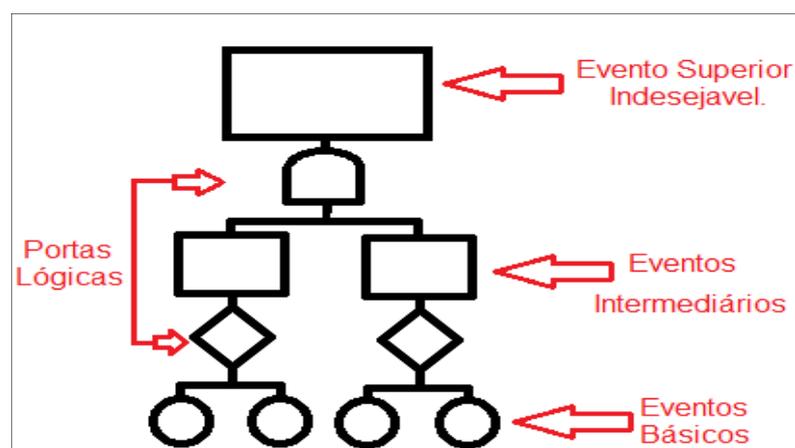


Figura 12: Exemplo de Estrutura de uma Análise por Árvore de Falha.

Fonte: Adaptado de Manual de Árvore de Falhas com aplicação Aeroespaciais, NASA (2002)

Sakurada, 2001 *apud* Billinton & Allan (1985), afirmam que técnica é usada como um método de avaliação qualitativa, servindo para auxiliar a compreensão de como um sistema pode falhar, e que medidas podem ser usadas para superar as causas da falha. O método também pode ser usado para uma avaliação quantitativa, em que as causas da falha do sistema são gradualmente separadas em um aumento do nível hierárquico até alcançar um nível no qual os dados de confiabilidade são suficientes ou precisos para ser feita uma avaliação quantitativa (SAKURADA, 2001).

Sakurada, 2001 *apud* Henley & Kumamoto (1981) afirmam que os benefícios da técnica ou método de análise por árvore de falha são os seguintes de acordo com a TABELA 1.

TABELA 1: Benefícios do Uso do Método de Árvore de Falhas.

| Benefícios de uma Análise por Árvore de Falhas. |
|--|
| Auxiliar a identificação dos modos de falha; |
| Apontar os aspectos importantes do sistema para a falha de interesse; |
| Facilitar o entendimento do comportamento do sistema; |
| Fornecer auxílio gráfico para dar visibilidade às mudanças necessárias; |
| Fornecer opções para análise de confiabilidade quantitativa e qualitativa; |
| Permitir ao analista se concentrar em uma falha do sistema por vez. |

Fonte: Modificado de Sakurada, 2001 *apud* Henley & Kumamoto, 1981, p.38.

Outro fator importante, destacado por Hellman & Andery (1995) e citado por Vollert (1996) e Sakurada (2001) organizados na TABELA 2, foram as funções de uma análise por árvore de falhas.

TABELA 2: Funções de uma Árvore de Falhas.

| Funções de uma Análise por Árvore de Falhas. |
|---|
| Analisar a confiabilidade de um produto ou processo; |
| Analisar e projetar sistemas de segurança ou sistemas alternativos em produtos; |
| Compilar informações para treinamento na operação de equipamentos; |
| Compilar informações para planejamento de testes e inspeção; |
| Compilar informações para manutenção de sistemas e elaboração de procedimentos de manutenção; |
| Compreender os modos de falha de um sistema; |
| Estabelecer um método padronizado de análise de falhas ou problemas, para verificar como ocorrem em um produto ou processo; |
| Indicar componentes mais críticos ou condições críticas de operação; |
| Priorizar as ações corretivas a serem tomadas; |
| Simplificar e melhorar equipamentos. |

Fonte: Modificado de Sakurada, 2001 *apud* Hellman & Andery (1995), *apud* Vollert (1996) e Sakurada (2001),

p.38.

2.3. ANÁLISE DO RELATÓRIO SOBRE AS CAUSAS IMEDIATAS DA RUPTURA DA BARRAGEM DE FUNDÃO – 2016

2.3.1. Considerações Iniciais

O documento analisado neste tópico é intitulado de “Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão” (2016) e foi elaborado pelo “Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão”, composto por engenheiros geotécnicos especialistas em barragens de água e rejeitos, sendo eles: *Norbert R. Morgenstern (Presidente); Steven G. Vick; Cássio B. Viotti; Bryan D. Watts*. O Comitê e o Relatório em questão foram contratados pela *BHP Billiton Brasil Ltda* e *Vale S.A.* para analisar as causas do colapso da Barragem de Fundão.

Contudo, os membros foram instruídos a promover um entendimento profissional, independente, especializado e, sobretudo, imparcial para determinar a(s) causa(s) do colapso da barragem. Orientou-se também a “não atribuir culpa ou responsabilidade a qualquer pessoa ou entidade, e não avaliar danos ambientais ou outros efeitos ambientais a jusante.” (MORGENSTERN *et al.*, 2016.)

O Comitê teve como ponto de partida o pressuposto que a Barragem de Rejeitos de Fundão, colapsada em 5 de novembro de 2015, rompeu-se através de um processo de deslizamento de fluidos provocados por um fenômeno conhecido como extrusão lateral e que este resultou em um processo de liquefação, que teria se iniciado na ombreira esquerda do barramento.

A partir deste ponto, os especialistas avaliaram múltiplas hipóteses de eventualidade e, afim de tornar mais fundamentado os resultados, adotaram também como método investigativo o “Teste de Hipótese”, que através deste, o processo de ruptura mais aceito deveria ser viável de explicar a três perguntas abaixo (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

1. “Por que ocorreu um deslizamento fluido por liquefação?
2. Por que ocorreu o deslizamento fluido naquele local?
3. Por que ocorreu o deslizamento fluido naquele instante?” (MORGENSTERN *et al.*, 2016, p.02).

A linha de raciocínio e os métodos investigativos adotados pelo Comitê abrangeram variadas diretrizes de evidência, tais como ensaios de laboratório; modelagem computacional; relatos de testemunhas oculares; dados e imagens do sistema de informação geográfica (SIG) e testemunhos de exploração do subsolo. Assim, foi colocado à disposição do Comitê para análise os documentos listados na TABELA 3.

TABELA 3: Documentos Analisados pelo Comitê.

| Documentos Analisados pelo Comitê. |
|---|
| 1. Projetos geotécnicos da Barragem de Rejeitos de Fundão e estruturas associadas à barragem, incluindo tanto o maciço intacto quanto o rompido, e incluindo também o projeto original e todos os alteamentos da estrutura do maciço; |
| 2. Interpretação dos resultados das investigações geotécnicas e ensaios de laboratório realizados para a Barragem de Rejeitos de Fundão; |
| 3. Padrões, tendências e relações no comportamento da instrumentação da Barragem de Rejeitos de Fundão; |
| 4. Interpretação dos dados de instrumentação e de desempenho em relação ao comportamento da Barragem de Fundão; |
| 5. Materiais, métodos, procedimentos e práticas de controle de qualidade/garantia de qualidade para a construção e modificação da Barragem de Fundão; |
| 6. Balanço hídrico e qualidade da água no que diz respeito ao incidente; |
| 7. Atividade sísmica na região no dia do incidente; |
| 8. Procedimentos operacionais e de planejamento para a deposição de rejeitos e gestão da água na Barragem de Fundão; |
| 9. Procedimentos de inspeção e vigilância e execução, incluindo relatórios emitidos pelo <i>Independent Tailings Review Board (ITRB)</i> e outros auditores externos; |
| 10. Inspeções de campo do Responsável Técnico; |
| 11. Questões identificadas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e as agências ambientais federais e estaduais brasileiras no decurso da sua fiscalização; |
| 12. Projeto e estrutura de outras barragens de rejeito similares na vizinhança. |

Fonte: Modificado de Morgenstern *et al.*, 2016, p.02.

Para realizar a análise do Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão (2016), esta monografia seguiu os tópicos adotados para elaboração do Relatório e aqueles de relevância comparativa com o capítulo seguinte.

Ressalta-se que a sequência escolhida para este estudo foi a mesma utilizada pelo Comitê, uma vez que os fatos técnicos foram explanados de forma lógica e didática para a conclusão final do Relatório. Salienta-se também que todas análises técnicas, informações e imagens contidas neste tópico foram retiradas do Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão – 2016.

2.3.2. Fatos Importantes da História da Barragem de Fundão.

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), a análise dos fatos históricos ocorridos na Barragem de Fundão faz-se necessário para o entendimento dos acontecimentos que levaram a ruptura. Vale ressaltar que os fatos ocorridos não foram abordados de forma detalhada e minuciosa, uma vez que não é o propósito desta monografia. Foram brevemente explicitados para que haja um entendimento lógico e sequencial dos fatos que possam ter levado a instabilidade do barramento e sua consequente ruptura.

2.3.2.1 Rejeitos, forma de deposição e gestão da água.

O primeiro aspecto evidenciado foi o fato de durante a operação do barramento de Fundão, o mesmo recebeu dois tipos diferentes de rejeitos - ambos produzidos em forma de polpa e transportados em tubulações separadas – sendo eles:

- I. Rejeitos arenosos - mistura de partículas com granulometria de areia a silte. Ressalta-se que a areia tem como característica o fato de serem relativamente drenantes, mas quando fofas e saturadas são mais susceptíveis ao processo de liquefação.
- II. Rejeitos lamas - finos e semelhantes a argila por natureza, tendo como características serem moles e compressíveis com baixa permeabilidade.

Via os estudos feitos pelo Comitê, percebeu-se que a deposição dos rejeitos foi influenciada por uma série de ocorrências não previstas durante a construção e operação da barragem, tendo em vista que no projeto de construção/ operação o rejeito arenoso seria depositado por detrás de um dique de partida em aterro compactado (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Essa forma original de deposição faria com que a lama ficasse retida na parte posterior do barramento de tal forma que os dois tipos de rejeitos não se misturariam, preservando assim as características drenantes das areias.

Com isso, uma praia de rejeitos com largura mínima de 200 m foi projetada com o propósito de impedir que as lamas se depositassem perto da crista, e dessa forma, o sistema de

drenagem na base do dique de partida não fosse prejudicado e a água escorreria das areias, reduzindo a saturação do barramento.

Contudo, em 2009 ocorreu o primeiro incidente por *piping* no barramento (figura 13), logo após o término do dique de partida relacionado e que foi relacionado a falhas de construção na base do dreno de fundo. O barramento sofreu sérias avarias e por isso o dique de partida construído passou por reparos.



Figura 13: *Piping* no Talude a Jusante - 2009.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.

O projeto revisado propôs a construção de um novo tapete drenante em uma elevação superior e com o objetivo de realizar a drenagem interna dos alteamentos acima desta elevação. Com os alteamentos subsequentes, houve um aumento de saturação nesta região do novo tapete, que segundo Morgenstern *et al.* (2016), pode ter sido um fator potencial para liquefação da areia.

Um segundo incidente relacionado a deposição da lama, foi com relação a necessidade de implementar manobras operacionais para realizar a gestão da água durante um período 2011 e 2012. Este fato, foi relacionado ao critério de largura de 200 m de praia de rejeitos previsto no projeto original, o qual muitas vezes não foi executado devido reparos estruturais na Galeria Principal iniciado no final de 2010 e início de 2011, uma vez que a água chegou próximo de 60 m da crista nestes anos Morgenstern *et al.* (2016). Tal acontecimento possibilitou que a

lama sedimentasse próximo da região da praia de rejeitos, local que deveria ter sido depositado apenas o rejeito arenoso.

No final de 2012, a Galeria Secundária localizada embaixo da ombreira esquerda da barragem de Fundão, foi considerada estruturalmente comprometida e incapaz de suportar a carga adicional dos próximos alteamentos. Dessa forma, a barragem não poderia ser alteada sobre a galeria de concreto pré-moldado até que este tivesse recebido todo o tratamento para o seu fechamento e abandono.

A fim de continuar as atividades de alteamento e operação, foi realizado então um recuo do alinhamento da barragem na ombreira esquerda com relação a sua posição anterior, como pode ser visto na figura 14. Tal fato fez com que o maciço ficasse sobre a lama depositada e, por isso, surgências de material lama em superfície começaram a aparecer em diversas cotas no recuo feito durante o ano de 2013.



Figura 14: Recuo da Ombreira Esquerda da Barragem de Fundão.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), em agosto de 2014, o tapete drenante atingiu sua capacidade máxima de vazão, uma vez que a massa de rejeitos arenosos saturados aumentou de forma considerável devido ao recuo realizado da ombreira esquerda.

Ao mesmo tempo, a lama reagiu ao aumento da carga que foi depositada pelo alteamento através de uma deformação lateral (processo conhecido como extrusão lateral). Isto fez com

que a lama se comprimisse e as areias por sua vez, sofressem uma redução na tensão horizontal confinante (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Tal fato permitiu que as areias ficassem separadas e no com isso, menos comprimidas e conseqüentemente saturadas (figura 15). Com isso, diversas trincas surgiram; essas se estendiam por detrás da crista da barragem, até o pé do recuo, como pode ser visto pela figura 16.



Figura 15: Saturação no Pé do Talude de Recuo da Ombreira Esquerda - 2014.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.



Figura 16: Trincas no Talude de Recuo da Ombreira Esquerda - 2014.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.

Desta forma, as condições necessárias para desencadear a liquefação do tipo estática estavam presentes e esses fatos associados forneceram condições necessárias que possam ter contribuído para que o colapso da Barragem de Fundão acontecesse.

Portanto, os eventos resultantes decorridos da alteração do projeto inicial e do incidente por *piping* em 2009, na Barragem de Rejeitos de Fundão, podem ser simplificados como sendo:

1. Danos ao dique de partida que resultou no aumento da saturação;
2. Deposição de lama em áreas onde isso não estava previsto;
3. Problemas estruturais na galeria de concreto que fez com que a ombreira esquerda fosse recuada e a barragem fosse alteada sobre lama.

2.3.2.2. Sismicidade ocorrida em 5 de novembro de 2015.

Outro acontecimento que pode ter cooperado para que houvesse o colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão foram as sismicidades que ocorreram na tarde do dia 5 de novembro de 2015, cerca de 90 minutos antes da ruptura.

Estudos sismológicos realizados desde a década de 70 evidenciam que as atividades sísmicas no Brasil estão em constante manifestações, mesmo o país se encontrando no centro da placa tectônica Sul-Americana. Sismos de leve a moderada magnitude vêm ocorrendo em várias regiões do Brasil, de forma natural, ou induzida (RIBEIRO, 2006).

Segundo *Assumpção e Neto* (2000) ocorrem a cada ano no Brasil, em média, cerca de vinte sismos naturais com magnitude maior que 3; dois sismos com magnitude maior que 4; 0,2 sismos com magnitude maior que 5 (um a cada 5 anos, por exemplo); 0,02 sismos com magnitude maior que 6. Isso revela que, embora pouco frequente, sismos com magnitudes importantes podem ocorrer no país.

Operações de desmonte de rochas que usam explosivos acontecem diariamente nas minerações. Por isso eventos sísmicos de pequenas magnitudes causados por esses

desmontes não são incomuns. Abalos sísmicos naturais de maior magnitude são raros no Brasil enquanto pequenos abalos em Minas Gerais são relativamente comuns.

No dia 5 de novembro de 2015, de acordo com relatos e registros, sentiu-se na área onde se localiza a planta de beneficiamento, a cerca de 2 km da Barragem de Rejeitos de Fundão, um tremor forte o suficiente para fazer com que um computador caísse de uma mesa, mas não forte o bastante para produzir danos estruturais além de pequenas trincas (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Por esse motivo, o Comitê realizou uma análise dos eventos registrados por instrumentos e também por registros internos da mineradora. Essa mostrou que: “em 05 de novembro de 2015, duas detonações ocorreram em uma mina próxima com a diferença de segundos uma da outra, logo após 13:00 horas (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Por volta de 14:15 horas do mesmo dia, outros três abalos de pequena magnitude ocorreram durante um período de quatro minutos. Estes sismos antecederam a ruptura cerca de 90 minutos. A TABELA 4 mostra os registros de hora, magnitude, distância até a barragem e identificação do que provocou o abalo.

TABELA 4: Abalos Sísmicos em 5 de Novembro de 2015.

| Hora local | Magnitude de Momento M_w | Distância de Fundão | Identificação |
|------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 13:01:49 | 2.1 | 2.6 km | Detonação na mina |
| 13:06:06 | 2.3 | 2.6 km | Detonação na mina |
| 14:12:15 | 2.2 | < 2 km | Abalo precursor |
| 14:13:51 | 2.6 | < 2 km | Abalo principal |
| 14:16:03 | 1.8 | < 2 km | Abalo secundário |
| 15:45 | | | Ruptura da Barragem |

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016, *apud* Atkinson 2016.

De acordo com o relatório e análises feitas pelo Comitê, a ombreira esquerda da barragem no ano de 2015, encontrava-se em um estado precário de estabilidade como foi comprovado por uma modelagem realizada por computador. Essa “mostrou que as forças dos abalos sísmicos

podem ter produzido um incremento adicional de movimentação horizontal na lama que afetou as areias sobrepostas”, segundo Morgenstern *et al.* (2016).

Embora as sismicidades terem sido de baixa magnitude “é provável que essa movimentação adicional tenha acelerado o processo da ruptura que já estava bem avançado” (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

2.3.2.3 Relatos de testemunhas oculares sobre a ruptura.

Na tarde do dia 05 de novembro de 2015, as atividades que estavam sendo realizadas na Barragem de Rejeitos de Fundão aconteciam perto ou na ombreira direita do barramento. Drenos estavam sendo construídos em sua estrutura o que permitia a vários trabalhadores enxergar toda crista da barragem. Na ombreira esquerda, material de aterro estava sendo colocado na bancada do recuo como preparação para o início da colocação de areia.

Para melhor entendimento dos fatos relatados, a figura 17 retrata a localização das nove testemunhas oculares no momento da ruptura.



Figura 17: Localização das Testemunhas Oculares no momento da Ruptura da Barragem de Fundão.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.

O primeiro fato foi percebido pelos trabalhadores 4 e 6, os quais relataram “uma nuvem de poeira subindo no lado esquerdo”. Além disso, o funcionário na posição 4 também observou “ondas se formando na porção central do reservatório, acompanhada de trincas se formando

no lado esquerdo e blocos de areia movendo-se para cima e para baixo no recuo da ombreira esquerda” (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Em sequência, o funcionário da posição 5 relatou que presenciou a surgência de uma trinca ao longo da crista do recuo da ombreira esquerda, a qual em seguida se propagou em ambos os sentidos. Esta trinca teria surgido perto da ombreira esquerda, atingindo-a, e depois avançou para a ombreira direita.

No pé da barragem, posição 9 na figura, testemunhas oculares relataram uma queda de rejeitos de lamosos que eram provenientes da ombreira esquerda e nenhuma movimentação do dique de partida.

Os trabalhadores nas posições 1 e 2, devido a posição que se encontravam, foram os primeiros a observar o início do colapso do barramento, o qual se deu perto do dreno da ombreira esquerda. Eles relataram que um jato de água suja “explodiu” para fora do dreno e logo em seguida ocorreu uma movimentação do talude e a surgência de rachaduras no dreno e ao longo da borda do platô adjacente.

A figura 18 representa a localização do platô citado em relação ao recuo no barramento da ombreira esquerda.



Figura 18: Crista do Recuo da Ombreira Esquerda e Platô.

Fonte: Modificada de Morgenstern *et al.*, 2016.

Em sequência, a parte inferior do talude do recuo movimentou-se e avançou vagarosamente para a frente “como uma cobra”, contudo permaneceu intacto. Ele então avolumou-se e distorceu-se à medida que seu movimento acelerava, descendo como se estivesse “derretendo”. Posteriormente, a testemunha na posição 3 caracterizou a onda de rejeitos como turbulenta e violenta em direção a jusante (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

O colapso tornou-se evidente para os observadores nos pontos 4, 5 e 6 à medida que avançava e para dentro do reservatório. Após este fato, os lados direito e central da barragem começaram a se dissolver.

Estas observações relatadas, tomadas em conjunto, estabeleceram uma sequência de eventos referentes ao início da ruptura. Percebeu-se então que o colapso originou no recuo da ombreira esquerda e o dique de partida não participou ativamente do mecanismo de ruptura.

Entretanto, os trabalhadores localizados na crista da barragem foram “incapazes de ver exatamente como e onde começou a ruptura, pois no momento que fizeram essas observações os primeiros estágios da ruptura já estavam bem avançados.” (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

2.3.3. Conclusões do Comitê

Recorda-se que as instruções repassadas ao Comitê foram para investigar sobre a(s) causa(s) que levaram a Barragem de Rejeitos de Fundão se romper em 5 de novembro de 2015. A fim de cumprir esta determinação, o Comitê ao final dos trabalhos deveria apresentar o seu julgamento profissional, independente e imparcial para determinar a(s) causa(s) imediata(s) juntamente com um relatório.

2.3.3.1 Prováveis Gatilhos e Falhas.

Em vista disso, constatou-se que o colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão ocorreu através do deslizamento fluidos provocado por liquefação e, o mesmo, foi consequência de uma cadeia de eventos e condições citadas, em sequência de fatos, na TABELA 5.

TABELA 5: Resumo dos acontecimentos que podem ter contribuído para a ruptura da Barragem de Fundão em 2015.

Eventos e Condições que possam ter colaborado para o Rompimento da Barragem de Fundão - 2015

Mudança no projeto do sistema de drenagem interna original provocou um aumento na saturação;

Lamas moles alcançaram áreas não previstas na ombreira esquerda da barragem;

Recuo da ombreira esquerda do barramento;

Lama sob o aterro submetida à carga imposta pelo alteamento;

Extrusão da lama e separação das areias à medida que a barragem era alteada;

Incremento adicional de carga produzida pelos tremores de terra;

Desencadeamento do fenômeno de liquefação acelerou-se.

Fonte: Modificado de Morgenstern *et al.*, 2016.

Ressalta-se que o Comitê julgou e classificou as características de projeto e o funcionamento da Barragem de Fundão como sendo algo de difícil compreensão devido as alterações feitas ao longo dos anos de construção, alteamento e operação.

Tal fato refletiu no número de potenciais hipóteses que desencadearam a falha da barragem e, conseqüentemente, na forma como estruturou-se o processo para avaliação. Assim, a

princípio foram considerados os seguintes potenciais modos de falha para a Barragem de Rejeitos de Fundão (TABELA 6).

TABELA 6: Modos Preliminares de Falhas da Barragem de Fundão.

Possíveis modos de Falha da Barragem de Fundão.

Galgamento;

Piping;

Deslizamento na fundação ou no dique de partida;

Liquefação.

Fonte: Modificado de Morgenstern *et al.*, 2016, p.24.

Estes possíveis modos de falha foram sendo avaliados e descartados um a um a medida que as investigações avançavam, seja por inconsistência com os dados analisados pelo Comitê, ou por suas características não encaixarem com os relatos das testemunhas oculares. Por fim, restou-se apenas o modo de falha por liquefação como possível causa da ruptura.

Portanto, tendo a liquefação como a causa mais provável da ruptura, adotou-se a formulação de hipóteses de processo de triagem. Usou-se então o método de análise por árvores de falhas para estruturar os mecanismos de desencadeamento que favoreciam o fenômeno da liquefação e também, os eventos e condições que fizeram ocorrer a liquefação.

Ressalta-se que a árvore de falhas foi aplicada nesta investigação como um suporte heurístico, ao invés de um aplicativo de confiabilidade e que a simbologia formal normalmente usada nas árvores de falhas não foi adotada pelo Comitê. A figura 19 representa a árvore de falhas produzida pelo Comitê para o gatilho da liquefação.

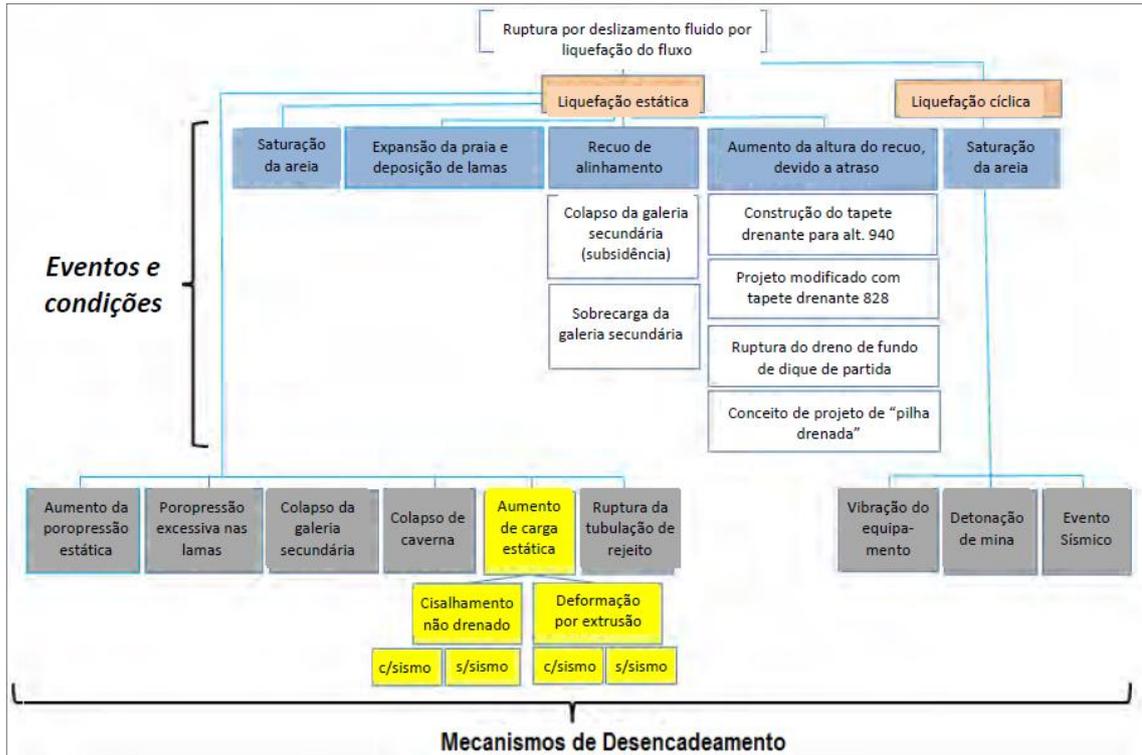


Figura 19: Árvore de Falha da Barragem de Fundão.

Fonte: Morgenstern *et al.*, 2016.

O evento principal, localizado na parte superior da figura 19 é a ruptura por liquefação do fluxo. O nível seguinte representa os dois eventos de processos de liquefação: estático e cíclico. Nota-se que ambos poderiam ter sido ativados e causados o colapso.

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), a camada inferior da árvore de falhas apresenta os potenciais mecanismos que podem ser gatilhos para um evento de liquefação estática ou cíclica. Neste caso, alocou-se o mecanismo que desencadeou a liquefação estática como sendo o “aumento da carga estática”, destacado em amarelo na figura 19, juntamente com os dois processos subordinados, o cisalhamento não drenado e a extrusão relacionada com deformação.

“Os eventos e condições antecedentes sombreados em azul que permitiram ou causaram liquefação estática na ombreira esquerda. Estes são: (1) saturação da areia; (2) invasão da água que permitiu que a lama se depositasse na praia de rejeitos; (3) recuo do alinhamento; e (4) aumento da altura do recuo, resultante do alteamento contínuo da barragem.”. (MORGENSTERN *et al.*, 2016, p.26).

2.3.3.2 Resposta do Comitê as Perguntas Iniciais.

De acordo com o Relatório, o Comitê respondeu as três perguntas base inicialmente propostas como linha investigativa sobre as causas do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão. As perguntas surgem novamente neste contexto e com o resumo de suas respectivas respostas.

Pergunta 1: Por que ocorreu um deslizamento fluido?

Tendo em vista que o projeto original para a Barragem de Rejeitos de Fundão sofreu alteração, devido as dificuldades encontradas para executar o projeto, permitiu-se então, como parte desta modificação, que condições saturadas pudessem se desenvolver na areia que foi depositada (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Desta forma, foram necessárias três condições para que o processo de liquefação ocorresse: a saturação da areia; a areia não ter sido compactada e com isso apresentou poros; e um mecanismo de gatilho para que o processo de liquefação iniciasse.

O lançamento de rejeitos arenosos, em forma de polpa, resultou em condições que a porosidade ficou presente quando decantou-se. Com isso, as condições para que a liquefação ocorresse estavam presentes, o que possibilitava a ocorrência de um deslizamento fluido, a partir de um gatilho desencadeador.

Pergunta 2: Por que ocorreu deslizamento fluido naquele local?

Os estudos feitos através do histórico de lançamento de rejeitos, correlacionado ao alteamento da Barragem de Rejeitos de Fundão revelaram que o rejeito de lama estava presente em uma área designada para a deposição de rejeitos arenosos. A lama nesta região criou uma barreira que diminuiu a drenagem descendente e uma área de fraqueza formou-se, o que afetou a estabilidade do barramento. Tal fato foi comprovado ao verificar que a ombreira direita da barragem não continha lama. Esta condição permitiu diferenciar a ombreira direita da ombreira esquerda e explicou o local onde o deslizamento teve início.

Os relatos das testemunhas oculares também comprovaram que o processo de liquefação se desencadeou no recuo da ombreira esquerda da Barragem de Fundão. Este foi implementado

em 2011, modificando assim o projeto inicial do barramento e instaurando uma zona de fragilidade no mesmo.

Pergunta 3: Por que o deslizamento fluido ocorreu naquele momento?

Para que ocorra o rompimento de uma barragem de rejeitos são necessários dois fatores, a presença de rejeitos contráteis saturados e um gatilho para iniciar o processo de liquefação.

Após a avaliação de possíveis mecanismos de gatilho, o Comitê concluiu que a extrusão lateral iniciou a ruptura. Essa desenvolveu-se à medida que a barragem foi sendo alteada em sua ombreira esquerda. Isto fez com que o carregamento vertical sobre este ponto aumentasse significativamente. Por se tratar de uma zona de rejeitos de lama em profundidade, esta se espalhou lateralmente. Tal processo resultou em variações de tensão nas areias subjacentes, o que reduziu o seu confinamento e provocou o colapso.

Este mecanismo de colapso foi estudado e modelado através de ensaios em laboratório e computacional que confirmou, com um grau aceitável de confiança, que o colapso poderia ocorrer quando a barragem atingisse a altura que foi alcançada em 5 de novembro de 2015. Os sismos ocorridos antes do colapso também foram investigados pelo Comitê como possíveis gatilhos.

“Os abalos eram de baixa magnitude e não seriam normalmente considerados como potencialmente danosos a uma barragem comum. A Barragem de Fundão foi submetida a extrusão lateral nos depósitos ricos em lama abaixo da ombreira esquerda e o acúmulo de tensões associado a este mecanismo estava levando a barragem a uma condição de colapso e liquefação.”. (MORGENSTERN *et al.*, 2016, p.79).

Segundo Morgenstern *et al.* (2016), cálculos revelaram que um deslocamento de aproximadamente 5 mm poderia ter sido induzido na lama devido as vibrações, causando assim a extrusão lateral. Devido a esses fatos, o Comitê concluiu que:

“Tendo em vista a iminência da barragem para entrar em colapso devido ao carregamento anterior imposto por atividades de construção, o processo de ruptura, que já estava bem avançado, provavelmente foi acelerado pelos tremores.”. (MORGENSTERN *et al.*, 2016, p.81).

2.4. ANÁLISE DO COLAPSO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – 2019

2.4.1 Considerações Iniciais

Esta monografia baseou o conteúdo deste tópico na apresentação de um estudo feito Terra (2019), no Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP em setembro de 2019. Na época do rompimento, o autor ocupava o cargo de Diretor de Operações e Infraestrutura na SAMARCO Mineração S.A.

O estudo intitulado de “Análise do Colapso da Barragem de Fundão.” foi baseado na localização de início da falha, gatilho que levou a barragem ao colapso e na árvore de falhas proposta pelo “Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão – 2016”.

Dessa forma, de acordo com Terra (2019), o propósito foi apresentar e questionar alguns fatos expostos para a construção da árvore de falhas produzida pelo Comitê de especialistas contratado pela Vale S.A e *BHP Billiton* Brasil, considerados contraditórios e não condizente com o que foi exposto ao longo de todo relatório. Salienta-se também que todas análises técnicas, informações e imagens contidas neste tópico foram retiradas do estudo intitulado de “Análise do Colapso da Barragem de Fundão.”

Da mesma forma, este novo estudo propôs ao final uma nova Árvore de Falhas para as possíveis causas e gatilhos que possam ter causado o colapso do barramento de Fundão em 2015. O estudo em questão, foi realizado seguindo os mesmos princípios ético e profissional, sem o propósito de apresentar uma entidade ou responsável pelo rompimento.

Vale ressaltar também, que os danos ambientais ou outros efeitos a jusante provocados pelo colapso da Barragem de Fundão, não foram levados em consideração no estudo (TERRA, 2019 *apud* MORGENSTERN *et al.*, 2016).

2.4.2 Possíveis modos de Falha da Barragem de Fundão.

Inicialmente, Terra (2019) analisou os possíveis modos de ruptura que poderiam ter ocorrido em Fundão, assim como foi feito também pelo Comitê, e apresentado na Tabela 6, já exposta no tópico 2.3.3.1.

A possível ruptura por galgamento foi descartada por Terra (2019) devido ao fato de, na página K-2 do anexo K do Relatório, MORGENSTERN *et al.*, (2016) ter afirmado que em 5 de novembro de 2015 a crista da barragem estava na elevação 901,1 m e o nível d'água na elevação 892,5 m, estando assim com uma borda livre de 8,6 m.

O colapso por *piping* ou erosão interna também foi descartado, pois duas testemunhas oculares que estavam no pé da barragem relataram que perceberam, nos momentos iniciais da ruptura, uma coloração escura ou avermelhada na água da saída do dreno de fundo. As mesmas informaram também que o dique de partida permaneceu intacto, mesmo quando rejeitos eram lançados sobre a estrutura e jorravam sobre o veículo em que estavam (MORGENSTERN *et al.*, 2016). De acordo com Terra (2019), tais relatos comprovam que o rompimento da barragem não se iniciou devido a erosão interna no dique de partida.

Um provável escorregamento da fundação ou do dique de partida foi outro modo de falha descartado por Terra (2019). As mesmas testemunhas que estavam no pé da barragem, relataram também que o dique de partida não se mexeu no início do processo do colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão, descartando assim este como mecanismo causador da ruptura.

Por fim, conclui-se que o modo de falha que provocou o rompimento do barramento foi o processo de liquefação.

Segundo Terra (2019), chegou-se a essa conclusão, através da análise dos relatos das testemunhas oculares indicando que houve uma transformação do rejeito que estava em estado sólido para um estado fluido. Isto pode ser comprovado pelo fato das testemunhas afirmarem que a ombreira esquerda teria descido como “uma onda” ou como “se estivesse derretendo”. Outra testemunha afirmou que enquanto se segurava em uma árvore, foi preciso nadar nos rejeitos liquefeitos (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

2.4.3 Localização do Início da Falha

Outro questionamento feito por Terra (2019), foi com relação a localização do ponto onde houve a falha do sistema de rejeitos de Fundão.

De acordo com a conclusão feita por MORGENSTERN *et al.*, (2016), a Ombreira Esquerda foi o local onde se iniciou a ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão, uma vez que esse lugar continha todas as características necessárias para que, com o auxílio de um gatinho, o colapso da barragem tivesse início por um processo de liquefação estática.

Relatos coletados das testemunhas oculares que se encontravam na crista da barragem, foram descritos por Morgenstern *et al.* (2016), no relatório oficial e confirmam a teoria técnica elaborada pelo Comitê de que a Barragem de Fundão, que o processo de liquefação teria iniciado pela ombreira esquerda do barramento.

Contudo, Morgenstern *et al.* (2016), no relatório também menciona essas testemunhas localizadas na crista da barragem e que as mesmas não conseguiram ver com nitidez como e onde a falha teria se iniciado.

Ressalta-se também que no momento dessas observações, os primeiros estágios da falha já estavam bem avançados (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Terra (2019) ao analisar o Relatório do Comitê de Especialistas, em conjunto com o Relatório da Perícia de Engenharia da Polícia Federal do Brasil, sobre o caso do rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão, observou que três testemunhas foram consideradas principais, por se encontrarem em posição estratégica no momento do colapso.

A figura 20 retrata a posição destas três testemunhas através do uso de triângulos coloridos e, as linhas tracejadas, representam a linha de visão que cada uma delas tinha do barramento nos primeiros momentos da ruptura. Os retângulos amarelos indicam a cota altimétrica no local marcado.

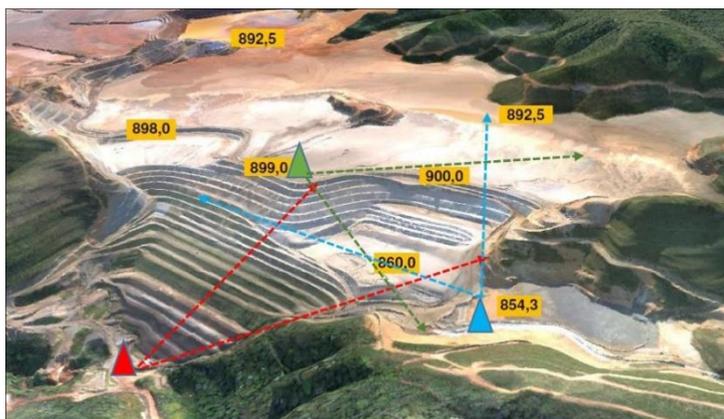


Figura 20: Campo de Visão das Principais Testemunhas no Momento do Colapso.

Fonte: Adaptado Terra (2019), *apud* Perícia De Engenharia Da Polícia Federal (PEPF), 2018.

Por meio da análise da figura 20, percebeu-se que os observadores principais do rompimento, que se encontravam no barramento, estavam voltados a ombreira esquerda e no momento de início da falha, tinham a visão apenas desta região da barragem.

Por este fato, observa-se que não seria possível para as testemunhas, no momento da ruptura, terem uma noção clara, do local onde o colapso da barragem pudesse ter começado tendo em vista que a ruptura completa da estrutura se desenvolveu de forma rápida e uma testemunha ocular teria dificuldades para indicar sua localização de origem no exato momento do início da falha (Terra, 2019).

Ressalta-se ainda que esses observadores podem ter sido influenciados, involuntariamente, em seus relatos a acreditarem que o rompimento da Barragem de Fundão tenha se propagado a partir da ombreira esquerda devido a posição em que se encontravam e o campo de visão que possuíam (Terra, 2019).

Além disso, a ausência de trabalhadores sobreviventes que se encontravam na ombreira direita do barramento, para Terra (2019), pode ser um indicativo de que a falha tenha começado na ombreira direita. Tendo em vista o fato que quanto mais próximo se estiver da origem da fonte de liberação de energia de um evento de grandes proporções, menor é a chance de uma pessoa sobreviver.

Outro fato observado por Terra (2019), foi com relação as análises de estabilidade feitas pelo Comitê e as quais indicam que, sujeitos às mesmas cargas, a ombreira direita provavelmente viria a falhar primeiro que a ombreira esquerda (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

2.4.4 Eventos Sísmicos

Um terceiro fato constatado no Relatório do Painel e o qual também foi questionado por Terra (2019) em sua apresentação, foi com relação aos abalos sísmicos registrados pela central de operações do Complexo de Germano 90 minutos antes do colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão.

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), quatro eventos sísmicos antecederam a falha e foram registrados na tarde de 5 de novembro de 2015 nas proximidades da Mina e da Barragem de Fundão.

Segundo relatos de funcionários, foi sentido um ou mais abalos sísmicos que fizeram com que um computador desktop caísse de uma mesa, além de causar trincas nas paredes, como pode ser visto pela figura 21 abaixo.

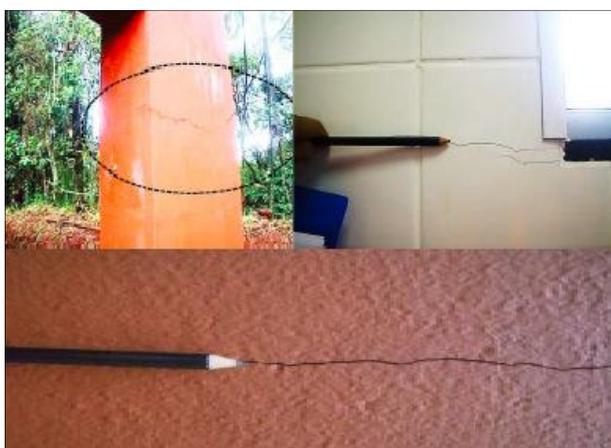


Figura 21: Trincas observadas na Estrutura Interna das edificações da SAMARCO Mineração S.A.

Fonte: Adaptado de Perícia De Engenharia Da Polícia Federal (PEPF), 2018.

Contudo, apesar das trincas que surgiram em consequência desses sismos, o relatório do sismólogo apresentado estima, que os tremores ocorrido em 5 de novembro de 2015, teve magnitude aproximada de apenas 2,6 e seu epicentro estava localizado a uma distância inferior a 2 km da Barragem de Rejeitos de Fundão (TERRA 2019 *apud* ATKINSON, 2016).

Segundo Terra (2019), *apud* Assumpção e Neto (2000) a intensidade sísmica de um tremor é uma medida qualitativa que descreve os efeitos produzidos pelos terremotos nos locais da superfície terrestre onde sucederam. A classificação da intensidade sísmica é feita a partir da observação "*in loco*" dos efeitos sentidos pelas pessoas, do comportamento dos objetos e construções (barulho e queda de objetos, trincas ou rachaduras em casas, etc.) e dos impactos na natureza (movimento de água, escorregamentos, liquefação de solos arenosos, mudanças na topografia, etc.).

Dessa forma, observou-se uma certa divergência entre a intensidade dos sismos e os efeitos provocados, trincas nas paredes e janelas, além de ter sido considerado pelo Comitê como o suposto gatilho para o colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão.

Assim, de acordo com Terra (2019), devido a essa divergência, Agurto-Detzet *et al.* (2016), calcularam a probabilidade real de ocorrência, por mero acaso e com certa proximidade da barragem, de um evento sísmico, com magnitude próxima de 2,6, ocorrer no mesmo dia em que sucedeu-se a ruptura e a menos de 10 km da área onde se localizava a Barragem de Rejeitos de Fundão.

Os cálculos foram realizados por Agurto-Detzet *et al.* (2016), levaram em consideração que os sismos e a ruptura da barragem acontecessem com uma diferença máxima de 24 horas. Assim, os cálculos resultaram em valor de aproximadamente 0,007% de chances, para a esse estudo em questão, da ocorrência simultânea dos dois eventos (TERRA 2019 *apud* AGURTO-DETZET *et al.*, 2016).

Com isso, Terra (2019) *apud* Agurto-Detzet *et al.* (2016), afirmaram a possibilidade da existência de duas hipóteses, para que o evento de 5 de novembro de 2015 viesse a ocorrer, sendo a primeira, devido aos sismos e ao tremor do solo, o colapso foi desencadeado ou, a segunda, os tremores desencadearam a liquefação do rejeito e, conseqüentemente isso levou ao rompimento da barragem.

A primeira hipótese foi explanada devido as intensidades dos sismos que foram relatadas pelos trabalhadores da mina e também, levando em consideração que o epicentro dos tremores foram próximos a superfície.

Com essas características, os autores perceberam que os tremores poderiam ter causado danos estruturais que contribuiriam para o colapso 1,5 horas depois. Contudo, Terra (2019) *apud* Agurto-Detzet *et al.* (2016), afirmam que os casos semelhantes já documentados descrevem que as falhas de barragens, aconteceram simultaneamente ou imediatamente após o tremor dos terremotos)

De acordo com Terra (2019) *apud* Agurto-Detzet *et al.* (2016), a segunda hipótese desenvolvida foi com relação a necessidade de investigar a possibilidade de um terremoto, com de magnitude 2,6 e uma distância de 2 km do barramento, desencadear a liquefação do rejeito.

2.4.5 Análise por Árvore de Falha

Uma vez que ambos estudos concluíram que o fenômeno da liquefação foi o fator que levou a Barragem de Rejeitos de Fundão a colapsar em 2015, Terra (2019) analisou a Árvore de Falha elaborada pelo Comitê para alocar e estruturar os mecanismos que favoreceram o surgimento do processo de liquefação e também, os eventos e condições que fizeram ocorrer a liquefação da barragem.

Contudo, a árvore de falha elaborada pelo Terra (2019) difere da árvore de falha elaborada pelo Morgenstern *et al.* (2016) em alguns aspectos, uma vez que em sua análise ainda permaneceram dúvidas em relação aos dados matemáticos e a alguns dos argumentos utilizados por Morgenstern *et al.* (2016).

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), três condições eram necessárias para que o deslizamento de fluidos acontecesse: Saturação; material solto e não compactado; e o gatilho.

2.4.5.1 Saturação.

Ao longo da história da barragem, alterações foram realizadas no projeto original que não estavam previstas anteriormente. No projeto original, um dreno de fundo de alta capacidade se estendia por debaixo da barragem e atrás deste dreno havia rejeitos arenosos. O objetivo deste dreno era conduzir o fluxo da drenagem interna da barragem e da sua fundação, controlando a saturação do maciço e os efeitos resultantes sobre o barramento.

Em 2009, ocorreu um incidente de *piping* no dique de partida da barragem o que tornou o dreno de fundo inoperante, uma vez que a areia o havia preenchido e por isso, o controle de saturação que se tinha no projeto original não pode ser restaurado (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Desta forma, houve a necessidade de fazer uma alteração no projeto original, onde um tapete drenante foi adicionado na elevação 826 m. Essa solução foi implementada com o objetivo de continuar com o conceito de empilhamento drenado. Contudo, o rejeito arenoso abaixo desse

tapete drenante, juntamente com os rejeitos por detrás dele continuavam saturados (Figura 22) (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

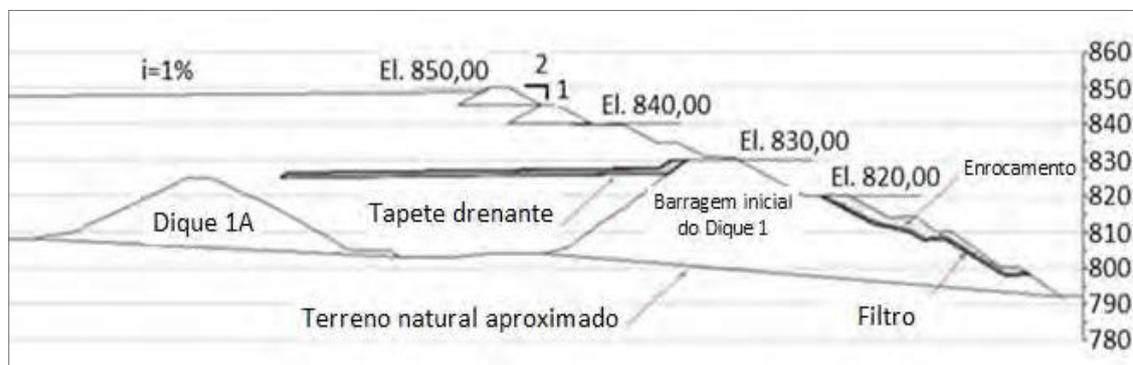


Figura 22: Tapete drenante na elevação 826 metros.

Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.*, 2016.

Com o passar do tempo, o tapete drenante passou a exercer sua função com menos capacidade e isto fez com que o volume de rejeitos saturados se expandisse. Inicialmente, uma largura mínima de 200 m de praia de rejeitos tinha sido especificada. Toda via, o critério de largura de praia não foi frequentemente notado e em 2011 e 2012, como registrado anteriormente, a largura mínima de praia chegou, por algumas vezes, a até 60 metros da crista da barragem (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

2.4.5.2 Material Solto e não Compactado.

Quando uma tensão cisalhante é aplicada ao material que compõe o solo, relata-se que nesse material está ocorrendo o fenômeno conhecido como cisalhamento. De forma simplificada, ao sofrer essa tensão, os materiais que formam o solo devem se afastar para que em seguida se movam em relação às demais. Isto resulta em um aumento do volume da massa de solo (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

O cisalhamento quando ocorre em partículas soltas, como por exemplo areias fofas ou argilas moles, faz com que as partículas se agrupem e, conseqüentemente, que a massa de solo se comprima. Solos que apresentam a predisposição de diminuição de volume são chamados solos contráteis. São materiais hidráulicamente colocados e não compactados, como é o exemplo dos rejeitos.

O Relatório elaborado pelo Comitê afirma que:

“Quando a massa de solo está saturada, os espaços entre as partículas, ou vazios, ficam preenchidos com água. Se o solo é contrátil e ocorre o cisalhamento, a água pode inibir as partículas de moverem-se em conjunto, de modo que a própria água carrega uma parte da carga. Isto produz uma pressão na água, ou poropressão. Como a água não tem resistência, a resistência da massa de solo saturado pode ser reduzida. Se isto ocorre ou não, vai depender se a água escapa ou não dos vazios. E isto, por sua vez, depende ainda de outra condição necessária para o deslizamento fluido por liquefação – a taxa de cisalhamento.” (MORGENSTERN *et al.*, 2016, p.27).

Com isso, e ainda de acordo com Morgenstern *et al.* (2016), cerca de 75% dos rejeitos arenosos depositados, os quais estavam localizados em até 75 m da crista da barragem e 95% dos rejeitos arenosos localizados a uma distância de até 180 m da crista foram indicados como sendo contráteis.

Tal fato indica que grande parte dos rejeitos arenosos hidráulicamente descarregados na Barragem de Rejeitos de Fundão satisfaziam o requisito de contratibilidade para deslizamento fluido por liquefação (MORGENSTERN *et al.*, 2016.)

Por isso, Terra (2019) concluiu que a utilização da afirmação feita por Morgenstern *et al.* (2016), de que havia material solto e não compactado na estrutura da ombreira esquerda entre as elevação 862 m e 864 m, está tecnicamente errônea, tendo em vista que o próprio Morgenstern *et al.* (2016) afirma que usou-se a técnica de empilhamento hidráulico para realizar o alteamento a montante.

2.4.5.4 Gatilho.

De acordo com a Árvore de Falhas apresentada por Morgenstern *et al.*, (2016). em seu Relatório, a liquefação estática foi a causadora do colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão devido a alguns eventos que já vinham ocorrendo a no barramento e foram acelerados devido

aos sismos que haviam ocorridos no dia em questão. Os eventos que poderiam causar o fenômeno da liquefação estática e analisados pelo Comitê foram dispostos na TABELA 7.

TABELA 7: Eventos que poderiam causar a Liquefação Estática na Barragem de Rejeitos de Fundão.

| Eventos que poderiam causar a Liquefação Estática. |
|---|
| Aumento da poropressão estática; |
| Poropressão excessiva na lama; |
| Desmoronamento da galeria secundária; |
| Colapso de caverna (originada por dissolução da rocha); |
| Aumento da carga estática; |
| Rompimento da tubulação de rejeitos. |

Fonte: Modificado de Morgenstern *et al.*, 2016, p.25 e p.26.

Morgenstern *et al.*, (2016). analisou cada uma das possíveis situações listadas na tabela 7 e, através de registros e análise de imagens de satélite, restou-se apenas o “Aumento da carga estática” como sendo a provável causa que levou a liquefação estática da barragem.

O aumento da carga estática pode ser subdividido em dois mecanismos possíveis, cisalhamento não drenado ou extrusão lateral por deformação. Dessa forma, Terra (2019) analisou a possível ocorrência destes dois mecanismos que justificariam a ocorrência da liquefação do tipo estática.

Segundo Morgenstern *et al.* (2016), a deformação causada pela extrusão lateral ocorreu devido a deposição de lama em locais que não estavam previstos inicialmente. Portanto, devido o recuo construído na ombreira esquerda, o tapete drenante na elevação 826 m, com a função de substituir o dreno de fundo, comprometido pelo *piping* em 2009, e aos alteamentos a montante realizado na ombreira esquerda, houve um aumento de pressão sobre essa camada de lama em profundidade. Essa sequência de acontecimentos é representada pela figura 23.

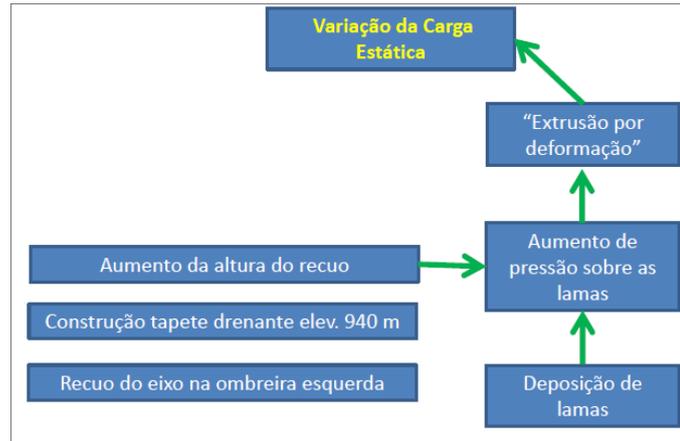


Figura 23: Sequência de Eventos que supostamente levaram a Variação da Carga Estática e por sua vez, na Liquefação Estática.

Fonte: Adaptado de Terra, 2019.

Contudo, Mendes (2019) afirma que:

“De acordo com os métodos de Olson (2001) e Sadrekarimi (2014), o amolecimento só será disparado caso a solicitação do gatilho exceder a resistência de pico, isto é, se $FS_{pico} < 1$. Além disso, os mesmos métodos preconizam que a ruptura por fluxo de liquefação só ocorrerá caso a solicitação do gatilho exceda a resistência liquefeita nos solos já mobilizados pela resistência de pico, ou seja, se $FS_{liq} < 1$ para os solos que já apresentam $FS_{pico} < 1$.” (MENDES, 2019, p.57 e p.58).

Com isso, Terra (2019) concluiu que a liquefação estática só se iniciaria caso o fator de segurança (FS) da ombreira esquerda do barramento atingisse um valor inferior a 1. Entretanto, segundo os cálculos apresentados por Morgenstern et al., 2016, os fatores de segurança da ombreira esquerda, para diferentes condições, estavam acima de 1, ou seja, “Não havia no dia do rompimento $FS_{pico} < 1$ na Ombreira Esquerda.” (TERRA, 2019).

Desta forma, a teoria da variação da carga estática por aumento de pressão sobre as lamas não foi considerada válida e aceitável por Terra (2019). Contudo, a variação da carga estática pode vir também a acontecer devido ao cisalhamento não drenado, caso esteja presente, sendo este acionado por um evento sísmico ou não, conforme exemplificado por Terra (2019) na figura 24.



Figura 24: Eventos que supostamente que poderiam resultar na Variação da Carga Estática e por sua vez na Liquefação Estática, mas foram descartados pelo Comitê.

Fonte: Modificado de Terra, 2019.

O cisalhamento não drenado ocorre quando o cisalhamento acontece de forma muito rápida, isso faz com que a poropressão se dissipe e o fenômeno aconteça. De acordo com Morgenstern *et al.*, (2016), a ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão aconteceu em questão de minutos e sob condições não drenadas. Dessa forma, a variação da carga estática poderia ter ocorrido e provocado o colapso do barramento por meio da liquefação estática.

Morgenstern *et al.*, (2016) em sua Árvore de Falhas descartou a possibilidade de ter ocorrido a liquefação do tipo cíclica por meio de sismos, uma vez que os mesmos concluíram que os sismos não teriam tido intensidade suficiente para desencadear esse processo.

Contudo, Morgenstern *et al.*, (2016) considerou na mesma árvore de falhas que tanto o processo de cisalhamento não drenado quanto a extrusão por deformação poderiam ter sido iniciados por meio dos sismos. Porém, como foi visto no tópico “2.4.4 Eventos Sísmicos”, a intensidade dos tremores foram relevantes e, de certo modo, com uma maior intensidade que a registrada devido aos danos causados por elas.

Com isso, em sua Árvore de Falha, Terra (2019) não descarta a possibilidade de os eventos sísmicos terem desencadeado uma liquefação do tipo cíclica, que por sua vez pode ter sido o gatilho que levou ao colapso a Barragem de Rejeitos de Fundão em 2015, (Figura 25).

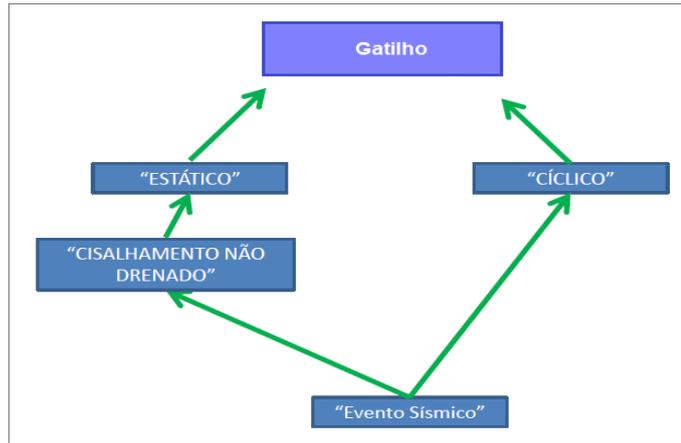


Figura 25: Eventos Sísmicos como o causador dos fenômenos que levaram ao gatilho.

Fonte: Terra, 2019.

Portanto, a nova Árvore de Falha apresentada por Terra (2019) para tentar explicar as causas do rompimento da Barragem de Fundão em 5 de novembro de 2015 é representada na figura 26.

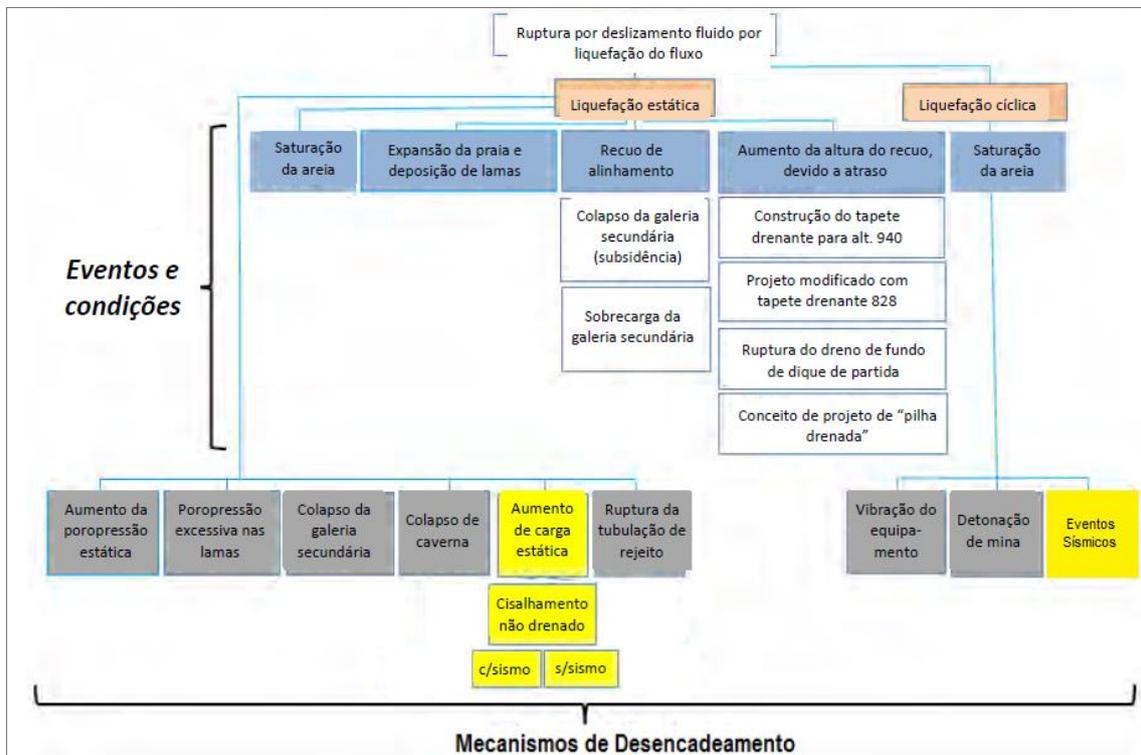


Figura 26: Nova Árvore de Falhas para o Rompimento da Barragem de Fundão em 2015.

Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.*, 2016.

2.4.6 Conclusão apresentada por Terra (2019)

Ao observar as evidências e relatos em torno dos eventos registrados do dia 5 de novembro de 2015, e contidos no Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão ou em outros documentos oficiais sobre o ocorrido, Terra (2019) concluiu que há incertezas aceitáveis sobre a localização de origem da falha no barramento e sobre qual foi o mecanismo que desencadeou o colapso.

Essas incoerências foram notadas através da análise dos relatos das testemunhas oculares sobre o ocorrido e também, através do uso de ensaios de simulação em laboratório que utilizaram métodos matemáticos e estatísticos.

Alguns dos resultados apresentados por esses métodos e simulações não condizem com os resultados apresentados por Morgenstern *et al.* (2016). Essas inconstâncias estão em divergência com outros relatórios ou até mesmo com os argumentos utilizados pelos próprios especialistas do painel durante a elaboração do Relatório.

2.4.6.1 Liquefação Induzida por Sismos.

Em sua apresentação e em consenso com Morgenstern *et al.* (2016), Terra (2019) também afirmou que a Barragem de Rejeitos de Fundão colapsou por efeito do processo de liquefação dos rejeitos ou solo. Contudo, o Relatório enuncia que há uma maior probabilidade da liquefação ter sido do tipo estática, uma vez que a ombreira esquerda foi alteada em um recuo e isso fez com que essa lama sofresse extrusão lateral devido a carga realizada pelo peso da ombreira esquerda.

Ressalta-se que essa justificativa utilizada por Morgenstern *et al.*, (2016) para afirmar que houve a ruptura da barragem devido a extrusão lateral, foi baseada apenas nos relatos das testemunhas oculares.

A liquefação do tipo estática ou cíclica está relacionada ao tipo de cargas de tensões que desencadearam esse processo na barragem. Embora existam em uma barragem cargas

estáticas e cíclicas suficientes para iniciar-se os fenômenos de liquefação, a ocorrência de carregamentos estáticos ou dinâmicos nestes depósitos podem gerar grandes deformações e rápidos acréscimos de poropressões e, conseqüentemente, perda substancial das tensões efetivas atuantes.

Para a Barragem de Rejeitos de Fundão, de acordo com Terra (2019), existem fundamentos matemáticos sobre a possibilidade dos sismos que antecederam o colapso do barramento terem sido os responsáveis por iniciar o processo de liquefação do tipo cíclica. Evidências sugerem que a intensidade dos tremores e os danos provocados foram maiores do que o esperado para sismo de magnitude 2,6.

Da mesma forma, relatos das testemunhas oculares e danos produzidos tremores contribuíram para a teoria de que os eventos sísmicos tiveram os elementos necessários para desencadear a liquefação dos rejeitos da Barragem de Fundão.

Portanto, há uma probabilidade de que o rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão em 2015 tenha acontecido devido a uma falha de liquefação cíclica induzida por sísmica.

2.4.6.2 Localização da Origem da Ruptura.

Outro fator questionado por Terra (2019) foi a possibilidade da ombreira direita ter sido o ponto de início da falha do barramento, tendo em vista que, como consta no Relatório apresentado por Morgenstern *et al.* (2016), esta apresentava um fator de segurança menor do que a ombreira esquerda quando submetida a cargas.

“Assim, com um fator de segurança menor que 1,0, uma ruptura rápida com deslizamento fluido associado deveria ter se iniciado na ombreira direita se condições não drenadas estivessem presentes.” (MORGENSTERN *et al.*, 2016, p.59).

Dessa forma, percebeu-se que com um fator de segurança abaixo de 1, a ombreira direita poderia ter iniciado uma falha, se sujeita a condições não drenadas, uma vez que este é inferior ao fator de segurança da ombreira esquerda.

Vale ressaltar que, de acordo com Morgenstern *et al.* (2016), o fato da ombreira esquerda ser sustentada por lamas e com isso, propiciar a extrusão lateral das lamas abaixo da ombreira esquerda, foi o motivo que desencadeou a liquefação estática. Contudo, isso foi concluído pelo fato do colapso ter se iniciado na ombreira esquerda e também, com base em relatos de testemunhas oculares.

Ao fazer esta suposição, Morgenstern *et al.* (2016) focou nos possíveis gatilhos para que a ruptura ocorresse primeiramente na ombreira esquerda, e concluiu que foi a extrusão lateral - um mecanismo que Morgenstern *et al.* (2016) observa não está incluído na lista de mecanismos desencadeadores de liquefação estática – a causadora do colapso da Barragem de Rejeitos de Fundão.

3) CONSIDERAÇÕES FINAIS

A data de 5 de novembro de 2015 entrou para a história do Brasil. Neste dia, por volta das 15:45 horas locais, a Barragem de Rejeitos de Fundão localizada na cidade de Mariana – Minas Gerais, pertencente a empresa de SAMARCO Mineração S.A entrou em colapso.

De imediato, a barragem liberou aproximadamente 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos em forma de lama fluida, atingindo os distritos de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo e a cidade de Barra longa, todas no estado de Minas Gerais. A lama de rejeitos também atingiu vários rios de Minas Gerais e do Espírito Santo até chegar ao mar.

Além disso, a lama de rejeitos trouxe inúmeros prejuízos socioeconômicos e ambientais. O colapso da barragem resultou também em 17 vítimas fatais e 2 desaparecidos. Na época, este foi considerado o maior acidente envolvendo barragens de rejeitos do país.

A ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão pode ser considerada única devido ao tamanho do volume de rejeitos contidos em seu reservatório, o recuo feito na ombreira esquerda do barramento e também, pelo fato de seu colapso ter sido antecedido por sismos tectônicos em uma região tectonicamente estável.

Dessa forma, muitos estudos foram realizados de imediato para concluir os eventos que levaram a ruptura e qual teria sido o gatilho desencadeador. Entretanto, como pode ser observado nessa monografia, há muitas inconsistências e diversas versões sobre o que aconteceu ao longo da história da Barragem de Rejeitos de Fundão e também como foram os eventos que se sucederam no dia 5 de novembro de 2015 e sua real magnitude.

Ressalta-se que o objetivo desta monografia de conclusão de curso não foi de afirmar que uma investigação realizada está mais certa que a outra, ou apontar uma entidade ou pessoa culpada pelo desastre. O autor reconhece a notável qualidade investigativa dos dois estudos realizados e frisa que este trabalho visa estabelecer e reconhecer que há dúvidas razoáveis e lógicas sobre o ocorrido, com base no raciocínio matemático, estatístico, geológico e geotécnicos.

O intuito desta monografia foi de realizar uma análise comparativa da versão oficial sobre as causas da ruptura da Barragem de Fundão levantada por um painel de especialistas contratados pelos acionistas da Samarco Mineração, *BHP Billiton* Brasil LTDA e Vale S.A, com o estudo técnico feito pelo Engenheiro de Minas Kleber Terra, tendo como base o Relatório oficial elaborado por Morgenstern *et al.* (2016) e o laudo pericial técnico da Perícia de Engenharia da Polícia Federal (2018), apresentado pelos peritos do núcleo de Perícia De Engenharia Da Polícia Federal.

Por fim, enfatiza-se também a necessidade de um melhor entendimento dos fatores que possam ter levado ao rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão, em 5 de novembro de 2015, pois, com isso, haverá uma contribuição significativa para uma melhora das práticas minerárias do Brasil, tornando assim a mineração brasileira mais sustentável e segura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional do Águas (Brasil). *Guia Prático de Pequenas Barragens. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - Volume VIII - Brasília, 2016.* Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=124737&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=68807&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0. Último acesso: fevereiro de 2021.

ANTUNES, M. *As Lições de uma Tragédia – Rompimento das Barragens da SAMARCO levanta o debate sobre novas tecnologias e processos que reduzam A necessidade de Barragens na Mineração.* Revista Mineração & Sustentabilidade, v. 25, n. 5, 2015. Disponível em: <http://www.youblisher.com/p/1362635-Revista-Mineracao-Sustentabilidade-Edicao-25/>. Último acesso: janeiro 2021.

ASSUMPÇÃO, M. S.; NETO, C. M. D. *Sismicidade e estrutura interna da terra.* In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. *Decifrando a Terra.* 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2000.

ATKINSON, G. M. *Analysis of ground motions from Nov. 5, 2015 earthquake sequence near Fundao Dam, Brazil.* 2016. Disponível em: www.fundaoinvestigation.com. Último acesso: Março de 2021.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIERE, B. & CHAPUIS, R.P. *A Model to Predict the Water Retention Curve from Basic Geotechnical Properties.* Canadian Geotechnical Journal. 2003.

AGURTO-DETZEL, H., BIANCHI, M., ASSUMPÇÃO, M., SCHIMMEL, M., COLLAÇO, B., CIARDELLI, C., CALHAU, J. *The Tailings Dam Failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence.* Geophysical Research Letters, 2016. 43(10), 4929-4936.

BILLINTON R, ALLAN, R. N. *Reliability Evaluation Of Engineering Systems: Concepts And Techniques.* New York and London: Plenum Press, 1987.

CARDOZO, F. A. C., PIMENTA, M. M. e ZINGANO, A. C. *Métodos Construtivos De Barragens De Rejeitos De Mineração – Uma Revisão.* Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.

CHAMBERS, M.; HIGMAN, B. *Long Term Risks Of Tailings Dam Failure.* Seldovia, USA: 2011.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. *Guia de Fechamento de Mina do Grupo CVRD.* Belo Horizonte. 2003.

CONTINI, S. *A new Hybrid Method for Fault Tree Analysis. Reliability Engineering and System Safety* 49, 1995.

FARIA M; BOTELHO M. *O Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, Brasil: a Incubação de um Acidente Organizacional*. Revista Portuguesa De Saúde Ocupacional – RPSO. Maio de 2018.

FERREIRA, L. R. *Efeito Sísmico Na Estabilidade De Barragens Geotécnicas*. Artigo Técnico – Universidade de Brasília, 2017

ICOLD. *Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences*. Bulletin 121, International Commission on Large Dams (ICOLD), France. 2001.

JUSTIÇA GLOBAL. *Inside the Vale of mud: a report on the tailings dam collapse in Brazil*. Rio de Janeiro: Justiça Global. 2016.

LOZANO, F. A. E. *Seleção De Locais Para Barragens de Rejeito Usando o Método de Análise Hierárquica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2006.

MACHADO, N.C. *Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MELO, L. *Entenda o que é a liquefação, fenômeno que pode levar barragens ao colapso*. G1. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/07/entenda-o-que-e-a-liquefacao-fenomeno-que-pode-levar-barragens-ao-colapso.ghtml>. Último acesso: janeiro de 2021.

MENDES, L.O. *Análise Probabilística do Potencial de Falha por Liquefação Estática e Dinâmica de Barragens*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-325/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. *Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*. p. 88. 2016. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com/>. Acesso em: janeiro 2021.

MPF - Ministério Público Federal – *Caso SAMARCO*. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/o-desastre>. Último acesso: dezembro de 2020.

NETO, L. V. *Estudo de Ruptura da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da Brecha do Acidente de 1954 e Ruptura Hipotética Nas Condições Atuais*. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

NASA, LEWIS RESEARCH CENTER, OSEMA. *Office of Safety, Environmental & Mission Assuranc.* 2000.

NASA, *Manual de Árvore de Falhas com Aplicações Aeroespaciais, Versão 1.1.* Agosto de 2002.

O'CONNOR, P. D. T. *Practical Reliability Engineering*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1985.

PALU, M.C. *Floodwave And Sediment Transport Assessment Along The Doce River After The Fundão Tailings Dam Collapse (Brazil)*. Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering - Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 2019.

PERÍCIA DE ENGENHARIA DA POLÍCIA FEDERAL (PEPF), OLIVEIRA, G. F.; SOUZA; L. M.; SILVA, M. V. T.; SANTOS, P. C. V.; BARBOSA, S. O.; SOUZA, T. E. F. *Caso do Rompimento da Barragem de Rejeitos da empresa SAMARCO em Mariana/MG*. XVII SINAOP – Obras Públicas, Planejamento, Controle e Efetividade João Pessoa, 2018. Disponível em: <http://www.ibraop.org.br/sinaop18/P2ApresentaCasoSAMARCOSidneyThalles.pdf>. Último acesso: Mar de 2021

RIBEIRO, P. M. V. *Uma Metodologia Analítica para a Avaliação do Campo de Tensões em Barragens de Concreto Durante Terremotos*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 003A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília - UNB, Brasília, 2006.

REZENDE, V. A. *Estudo do Comportamento de Barragem de Rejeito Arenoso Alteada por Montante*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. 2013

RODRIGUES, A. B. *Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição*. Monografia. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 2017.

SAKURADA, E. Y. *As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Arvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtor*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

SILVA, W. P. *Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)*. Dissertação. NUGEO - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto. 2010.

SAMARCO. *Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental (RADA). Barragem de Fundão*. Belo Horizonte. SAMARCO Mineração S.A. 2013.

SOARES, L. IN: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. (EDS). *Barragens de Rejeitos, Tratamento de Minérios*, 5ª Ed, Rio de Janeiro, p. 831 – 896, 2010.

TAILING MANAGEMENT. *Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry*. 2007.

TERRA, K. L. M. *Análise do Colapso da Barragem de Fundão*. Apresentação Técnica – Departamento de Engenharia de Minas – Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams*, Washington, p. 56, 1994.

VICK, S.G. *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. [S.1]: John Wiley & Sons, p. 369, 1983.