



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

MARCUS NICHOLAS ESQUIVEL FONSECA

**ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS (FMEA) PARA AVALIAÇÃO
DE UM ACIDENTE EM BARRAGEM DE REJEITOS: UM EVENTO DE
MINERAÇÃO NO BRASIL**

Salvador

2018

MARCUS NICHOLAS ESQUIVEL FONSECA

**ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS (FMEA) PARA AVALIAÇÃO
DE UM ACIDENTE EM BARRAGEM DE REJEITOS: UM EVENTO DE
MINERAÇÃO NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Salvador Ávila Filho

Salvador

2018

Modelo de ficha catalográfica fornecido pelo Sistema Universitário de Bibliotecas da UFBA para ser confeccionada pelo autor

Fonseca, Marcus Nicholas Esquivel
Avaliação de um acidente de uma barragem de rejeitos utilizando
FMEA, evento de mineração no Brasil / Marcus Nicholas Esquivel Fonseca.
Salvador, 2018.
80 f.

Orientador: Prof. Salvador Êvila Filho.
Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) Universidade Federal
da Bahia, Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia, 2018.

1. Barragem de rejeitos. 2. Análise de risco. 3. FMEA. I. Filho,
Salvador Êvila. II. Título.

**AVALIAÇÃO DE UM ACIDENTE DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS
UTILIZANDO FMEA, UM EVENTO DE MINERAÇÃO NO BRASIL**


MARCUS NICHOLAS ESQUIVEL FONSECA

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Robson da Silva Magalhães 
Doutor em Engenharia Industrial, pela UFBA, Brasil, 2010.

Prof. Dr. Acires Dias 
Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Brasil, 1996.

Prof. Dr. Luís Alberto Dantas Barbosa 
Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela UFRJ, Brasil, 2001.

Prof. Dr. José Baptista de Oliveira Júnior 
Doutor em Engenharia Mineral, pela USP, Brasil, 2001.

Salvador, BA - BRASIL
Fevereiro de 2018

Aos meus pais, Laureano e Rosália,
À minha esposa, Janaína,
À minha filha Maria Clara,
Às minhas irmãs, Alana, Ayala e Lúcia,
Aos Espíritos de Luz e Sabedoria que sempre me acompanham,
À Deus.

AGRADECIMENTOS

Dedico este espaço aos amigos e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho. Obrigado.

Agradeço a meu amigo Michel Gagliano, por sempre estar ao meu lado nas horas difíceis, ajudando e muito na execução deste trabalho.

Agradeço a Deus todas as graças que tenho recebido ao longo da minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Salvador Ávila Filho, pelo acolhimento, orientação, a paciência e o constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à UFBA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

O acidente da barragem de rejeitos de minério de ferro de Fundão, no município de Mariana, Minas Gerais, foi considerado o maior desastre ambiental da história brasileira e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeito. Em todas as fases da vida útil da uma barragem estará presente o risco da ocorrência de falhas, mesmo quando as devidas medidas mitigadoras são adotadas. Nesse contexto, as atividades de gestão de risco compreenderão a utilização de resultados de análises de risco de forma a prover os recursos necessários à garantia da segurança de uma barragem. Este trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação da ferramenta de análise de risco *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), visando contribuir a identificação dos aspectos mais críticos da barragem e priorização de estudos complementares, identificando os comportamentos mais prováveis esperados para o atributo (modo de falha) e, os aspectos mais críticos da barragem, utilizando como exemplo, a barragem do Fundão. A metodologia consiste basicamente na análise do cenário do acidente através da ferramenta FMEA, identificando os modos de falha e suas conseqüências em subsistemas que compõem o cenário. O resultado demonstra que a técnica de análise de risco utilizada pode favorecer o processo de tomada de decisão em momentos de emergências em barragens, melhorando o tempo de resposta e a confiabilidade das ações, como se constata a partir da aplicabilidade dos requisitos e critérios desta técnica. Entende-se também que, a partir dos valores dos sistemas analisados, a estabilidade da Barragem de Rejeitos de Fundão (BRF) se encontraria sob um estado de alerta.

Palavras-chave: barragem de rejeitos, análise de risco, FMEA

Abstract of the Master Thesis presented to PEI/UFBA as part of the requirements needed to obtain the degree of Master in Science (M.Sc.).

The accident in tailings dam at Fundão, in the Mariana City, Minas Gerais, was considered the largest environmental disaster in Brazilian history and the largest in the world involving tailings dams. At all stages of the life of a tailings dam, there will be a risk of failure, even when due mitigation measures are taken. In this context, the risk management activities will comprise the use of risk analysis results in order to provide the necessary resources to guarantee the safety of a dam. This work aims to present the application of a risk analysis tool, "Failure Mode and Effect Analysis" (FMEA), aiming to contribute to the identification of the most critical aspects of the dam and prioritization of complementary studies, identifying the most probable behaviors expected for the phenomenon (failure mode), and the most critical aspects of the dam, using as an example, the dam of the Fundão. The methodology consists basically in the analysis of the accident scenario through the FMEA tool, identifying the failure mode and their consequences in subsystems that make up the scenario. The result shows that the risk analysis technique used can favor the decision-making process at times of dams emergencies, improving the response time and the reliability of the actions, as evidenced by the applicability of the requirements and criteria of this technique. It is also understood that, based on the values of the analyzed elements, the stability of the Fundão Tailings Dam would be under a state of alert.

Keywords: tailings dams; risk analysis; FMEA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de beneficiamento.	18
Figura 2 – Métodos de alteamento de barragens de rejeito em várias etapas – (A) Método de Montante, (B) Método de Jusante e (C) Método de Linha de Centro.	21
Figura 3 – Disposição de rejeitos através do método de aterro hidráulico em uma barragem de alteamento a jusante.	23
Figura 4 – Mecanismo clássico da variação da permeabilidade na disposição de rejeitos.	24
Figura 5- Localização da cidade de Mariana em Minas Gerais.	25
Figura 6 - Inventário de estruturas – Modelo Barragem de Fundão.	28
Figura 7- <i>Buttress</i> de Germano.	29
Figura 8 – Bloco Funcional de um Diagrama de Bloco Funcional.	35
Figura 9 – Matriz de análise de risco adotada na análise FMEA.	44
Figura 10 – Aplicação da FMEA para o corpo da barragem.	48
Figura 11a – Aplicação da FMEA para o sistema de drenagem interna.	51
Figura 11b – Aplicação da FMEA para o sistema de drenagem interna (continuação).	52
Figura 12– Aplicação da FMEA para o sistema de drenagem superficial.	53
Figura 13 – Aplicação da FMEA para a fundação.	54
Figura 14 – Aplicação da FMEA para o reservatório.	55
Figura 15 – Sistemas críticos da Barragem de Rejeitos do Fundão onde os valores de RPN foram maiores do que 120 (Risco Intolerável).	57
Figura 16 – Resultado da matriz de risco obtida com a aplicação da FMEA.	58
Figura 17 - Infográfico feito pela mídia no momento da tragédia.	60
Figura 18 - Mapa de alcance do rejeito da Barragem do Fundão.	61
Figura 19 - Distrito de Bento Rodrigues antes da ruptura da barragem.	62
Figura 20 - Distrito de Bento Rodrigues depois da ruptura da barragem.	63
Figura 21 - Relação entre risco e investimentos em projeto e construção.	64
Figura 22- Árvore de falhas para o desencadeamento da liquefação.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características adotadas para o corpo da Barragem do Fundão.	47
Quadro 2 – Características adotadas para o sistema de drenagem interna da Barragem do Fundão.	50
Quadro 3 – Características adotadas para o sistema de drenagem superficial da Barragem do Fundão.	53
Quadro 4 - Características adotadas para a fundação da Barragem do Fundão	54
Quadro 5 – Características adotadas para o reservatório da Barragem do Fundão.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de Severidade S, Ocorrência O e Detecção D.	38
Tabela 2 – Índice de Ocorrência (O).	42
Tabela 3 – Índice de Detecção.	42
Tabela 4 – Composição para definição do índice de Severidade (S).	43
Tabela 5 - Modos de falha da Barragem de Rejeitos do Fundão.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BRF	Barragem de Rejeitos de Fundão
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
MPF	Ministério Público Federal
NBR	Norma Brasileira
PIC	Procedimento Investigatório Criminal
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.3	ESTRUTURA DE ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	O MINÉRIO DE FERRO	17
2.2	PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO	17
2.3	MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS A CÉU ABERTO	19
2.3.1	Barragens de Rejeitos Através de Aterro Hidráulico	20
2.4	BARRAGEM DE REJEITOS DE FUNDÃO (MARIANA - MG)	25
2.4.1	Histórico	26
2.4.2	Fontes de informações e recursos utilizados	26
2.4.3	Considerações técnicas da Barragem de Fundão	27
2.5	ANÁLISE E GESTÃO DE RISCOS APLICADA A BARRAGENS DE REJEITO	29
2.5.1	Análises de riscos	30
2.5.2	Apreciação de riscos	31
2.6	MODOS DE FALHA DE BARRAGENS POR SEUS EFEITOS (FMEA)	32
2.6.1	Descrição dos Efeitos dos Modos de Ruptura de uma Barragem de Rejeitos	35
2.6.2	Métodos de Detecção e de Controle	36
2.6.3	Estimativas de Risco	37
2.6.4	Considerações finais	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	Identificação dos Modos de Falha	40
3.2	ANÁLISE DE RISCOS	41

4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
4.1	CORPO DA BARRAGEM	46
4.2	SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA	49
4.3	SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL.....	53
4.4	FUNDAÇÃO	54
4.5	RESERVATÓRIO	55
4.6	OS DETERMINANTES E AS CAUSAS DA TRAGÉDIA	59
4.6.1	Comparação com os dados levantados (FMEA) e sua relação com o acidente	64
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES COMPLEMENTARES	68
5.1	CONCLUSÕES.....	68
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	70

1 INTRODUÇÃO

A produção dos rejeitos tem aumentado bastante nos últimos tempos, devido à elevada demanda de minério de ferro, em face a tendência de lavar minérios de baixo teor, assim como a evolução tecnológica e econômica dos processos de separação desses minérios, além da necessidade de alta produção para cobrir os custos fixos de mineração. (ESPÓSITO; CALDEIRA, 2010).

Estes rejeitos, produzidos em paralelo à geração do produto de interesse, necessitam de processos sistemáticos de deposição. Dessa forma, as empresas de mineração tem a necessidade de minimizar os impactos ambientais, assim como os custos associados aos processos de deposição e de contenção desses materiais, sendo verificada uma preferência das mineradoras brasileiras pela deposição desses rejeitos em superfície, através de barragens para a contenção de rejeitos finos.

A construção das barragens de contenção de rejeitos de minério de ferro pode ser feita com material compactado trazido de áreas de empréstimo ou com o próprio rejeito. O uso do próprio rejeito nas estruturas sobre o sistema de barramento de rejeitos, constitui uma prática comum em empreendimentos de mineração, particularmente no caso de barragens alteadas para montante.

A utilização do próprio rejeito na construção de barragens, permite que elas comportem-se como aterros hidráulicos, que são estruturas construídas pelo transporte e deposição de solo em meio aquoso. Deve-se considerar que o lançamento hidráulico de rejeitos, pode provocar o fenômeno da segregação hidráulica - processo fundamental na construção de aterros hidráulicos, afetando diretamente a distribuição granulométrica do rejeito disposto e, as condições de fluxo ao longo da praia da barragem, permitindo a formação de potenciais focos de liquefação aumentando, assim o risco de ruptura. (ESPÓSITO; CALDEIRA, 2010).

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação da ferramenta de análise de risco *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), visando contribuir na identificação dos aspectos mais críticos da barragem e priorização de estudos complementares, identificando os comportamentos mais prováveis esperados para os fenômenos característicos de sistema de barragem (modo de falha) e, os aspectos mais críticos da barragem, utilizando como exemplo, a Barragem de Rejeitos de Fundão (BRF).

Embora se tenha a cultura de aplicação das técnicas de análises de riscos às obras geotécnicas, entende-se a relevância da ferramenta FMEA, principalmente na avaliação do rompimento da BRF, em Mariana, sendo um dos objetivos deste trabalho contribuir para a propagação dessa prática no âmbito de aplicação nas barragens de rejeitos de mineração.

Como anunciado pelo Jornal Globo-Minas, em 5 de novembro de 2015 a mineradora Samarco ganhou destaque após o desastre do rompimento da BRF, localizada no distrito de Bento Rodrigues. O rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração de ferro no município de Mariana foi o maior desastre ambiental ocorrido no Brasil, e maior desastre ambiental na área da mineração ocorrido no Mundo, provocando a morte de 17 pessoas no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana, estado de Minas Gerais, além de causar crise no abastecimento de água de cidades do vale do rio Doce e uma catástrofe ambiental sem precedentes na bacia do rio, ao longo de uma faixa de 800 km (desde Mariana até a foz do rio, no Oceano Atlântico), com grandes danos aos ecossistemas e particularmente aos maiores refúgios da Mata Atlântica do estado, entre eles o Parque Estadual do Rio Doce. A catástrofe atingiu também cidades do Espírito Santo, até a foz do Rio Doce.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Falhas em barragens de contenção de rejeitos causam danos ambientais e econômicos consideráveis, além de constituírem fontes críticas de perdas de vidas humanas.

Acidentes graves, como o caso da BRF, resultam em grandes volumes de rejeitos descarregados nos vales a jusante; desta forma, tem aumentado e muito a pressão sobre as minerações por parte das agências regulamentadoras, dos órgãos públicos e das comunidades locais, no sentido de tornar mais seguros e controlados os sistemas de disposição de rejeitos. Assim, as mineradoras têm sido obrigadas a aplicar técnicas de segurança e gestão na operação de suas cavas, plantas industriais e, principalmente, estruturas de estocagem dos rejeitos, de forma a garantir a mitigação dos riscos submetidos às comunidades, indústrias e ao meio ambiente a jusante destas estruturas.

É neste contexto que se enquadra o objeto do estudo desta dissertação, ou seja, a aplicação da ferramenta *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), que é um método utilizado para prevenir falhas e analisar os riscos de um processo comum, aplicado na análise do acidente da BRF, de forma a antecipar, prevenir e mitigar as consequências de possíveis rupturas em outras barragens que, uma vez concretizada, tenderá a causar outras perdas econômicas, ambientais e perda devidas.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como principal objetivo identificar, através da ferramenta FMEA, os modos de falha mais relevantes do acidente da BRF, apontando quais as possibilidades de ruptura catastróficas e críticas para o seu funcionamento, de modo a, aplicado em outras barragens de rejeito, eliminá-las (prevenir a ocorrência) ou controlá-las (limitar os seus efeitos), o mais cedo possível, através de ações corretivas.

A utilização da ferramenta FMEA permite ainda orientar os órgãos de defesa civil, comunidade e demais interessados quanto ao que fazer durante a ocorrência da falha. Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Revisar as metodologias de análise e de gestão de riscos aplicadas à barragens de contenção de rejeitos;
- Aplicar e efetuar calibração da metodologia do FMEA, por meio dos métodos da matriz de riscos e Número de Risco de Prioridade (RPN), verificando a eficácia e aplicabilidade da ferramenta para gestão de riscos em barragens de contenção de rejeitos;
- Apresentar uma discussão sobre o acidente da BRF, com os pontos críticos, obtidos com a ferramenta FMEA.

1.3 ESTRUTURA DE ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação, além da exposição geral do tema e dos objetivos da pesquisa expressos nesta Introdução, é composta pelos seguintes capítulos e assuntos:

Capítulo 2 – Revisão de Literatura: apresenta breves considerações teóricas sobre minério de ferro, suas formas de concentração e geração de rejeitos, conceituações sobre barragens – visão panorâmica (tipos e finalidades), a apresentação da Barragem de Rejeitos do Fundão, e sobre a análise dos modos de ruptura de barragens por seus efeitos (FMEA).

Capítulo 3 – Metodologia: contém os principais aspectos metodológicos da pesquisa;

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados: é composto pela apresentação e discussão dos resultados obtidos, de forma detalhada, com algumas análises críticas ao longo do capítulo.

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para pesquisas complementares: encerrando a dissertação apresentando as conclusões obtidas e apresentando recomendações para pesquisas futuras sobre o assunto tratado no foco da pesquisa.

No anexo I está contido o formulário base para aplicação da metodologia do FMEA utilizando o Número Potencial de Risco, utilizando a sigla em inglês, RPN.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura, compreendendo breves considerações sobre o minério de ferro, suas etapas de concentração de minério de ferro e geração de rejeitos, definições sobre barragens de rejeitos, e a aplicação da análise dos modos de ruptura de barragens por seus efeitos (FMEA).

2.1 O MINÉRIO DE FERRO

O ferro (representação química, Fe) ocupa a quarta colocação no ranking dos elementos químicos mais abundante da crosta terrestre, cuja presença está associada com outros elementos. Takehara (2004) explica que essa abundância e sua diversidade são devido ao seu alto poder de oxidação. Assim, a extração do ferro metálico é realizada em rochas denominadas de minério de ferro onde são encontradas suas variadas formas – hematita, magnetita, pirita etc.

No entanto, a classificação de materiais como “minério de ferro” leva em consideração não só a presença dos compostos de ferro no agregado de minerais, mas também se deve considerara questão da existência da vantagem econômica no processo de extração (MAPA, 2006). Nesse sentido, Takehara (2004), além de utilizar esses aspectos, acrescenta as circunstâncias de mercado e enfatiza a necessidade de se conter um alto teor de ferro e baixos teores de impurezas como o silício, o alumínio, o magnésio, entre outros.

A principal motivação para extração e produção do ferro encontra-se na fabricação do aço e ferro fundido. Quase a totalidade da produção de ferro é destinada para este fim (DNPM, 2015).

2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

O processo de beneficiamento do minério de ferro mais empregado inicia com a passagem do mineral pelos processos de britagem e moagem seguindo para a classificação granulométrica e concentração, conforme mostra a Figura 1. Esse processo visa reduzir e realizar a regularização da granulometria, remover a parte do minério com baixo valor econômico e aumentar a qualidade do produto final.

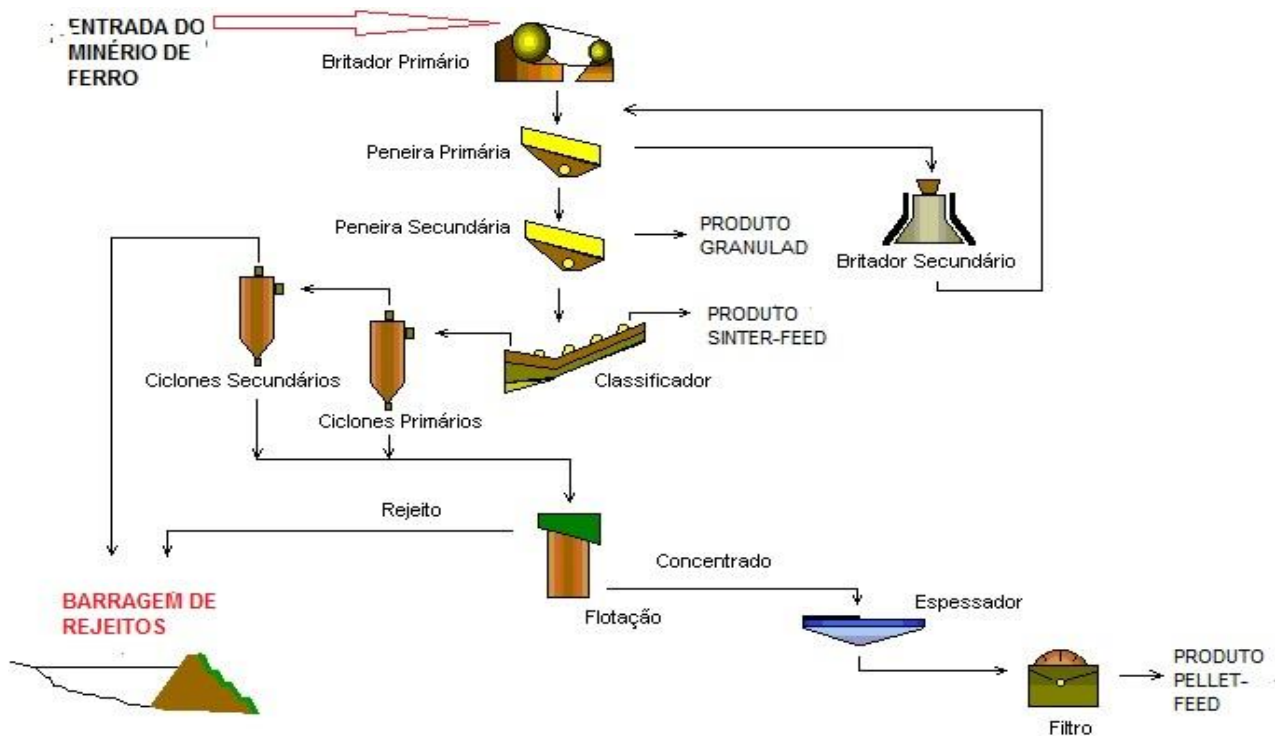


Figura 1 – Etapas do processo de beneficiamento.
Fonte: Autoria Própria.

Os três produtos gerados nesse tipo de processo de beneficiamento, são classificados pela sua granulometria e apresentam as seguintes classificações e faixas granulométricas (GUIMARÃES, 2011): produto granulado, com granulometria $6,3 < \varnothing < 31,5\text{mm}$; produto com granulometria que varia no intervalo $0,15 < \varnothing < 6,3\text{mm}$ - são os denominados *sinter feed*; e o produto *pellet feed*, com granulometria abaixo de $0,15\text{mm}$. Segundo Gomes (2009a), esse processo de beneficiamento, que é muito usado no Brasil, possibilita que grande parte do produto seja gerada nas fases iniciais, antes mesmos da etapa de concentração. A etapa da concentração, no entanto, apresenta duas finalidades: concentração do material que no processo de separação por tamanho não apresentou um teor de ferro desejável, e também para a redução de contaminantes presentes (GUIMARÃES, 2011).

Difícilmente os minerais são encontrados em sua forma pura na natureza. Na verdade, é cada vez mais comum encontrar os minerais em pequenas concentrações no minério bruto. Sendo assim, o processo de beneficiamento, a depender da qualidade do minério bruto, tem um potencial de gerar grandes resíduos que são denominados de "rejeitos de mineração".

Uma forma utilizada para retirar as impurezas é através do emprego de grandes quantidades de água. Desse processo, resulta na formação de uma espécie de lama. Da lama produzida, existem processos físico-químicos que podem ser utilizados para separar o produto final da parte com baixo atrativo econômico (MILONAS, 2006). Segundo Gomes e Pereira (2002), os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro podem gerar um volume de rejeitos de 40 % do minério de ferro. Milonas (2006) afirma que, por se tratar de um subproduto das atividades de extração, a produção de rejeito está intrinsecamente relacionada com o minério itabirítico lavrado com teores abaixo de 36% de ferro.

Os rejeitos de minério de ferro são classificados em finos e granulares. Segundo Portes (2013), a fração granular é que controla as características geotécnicas do rejeito. Entretanto, a autora chama a atenção ao fato de que "não se pode afirmar que os rejeitos de minério de ferro apresentarão comportamento de areia dada sua granulometria, pois os parâmetros geotécnicos serão também afetados". Espósito (2000) em seu trabalho realizou uma caracterização dos minérios de ferro encontrados no rejeito, onde afirma que a maior parte do rejeito de minério de ferro é composta por quartzo, e uma pequena parte (10 a 15 % dos sólidos) composta por hematita.

2.3 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS A CÉU ABERTO

A disposição de rejeitos em forma de polpa ainda é a técnica comumente usada no Brasil e requer grandes estruturas de terra (barragens) para sua disposição. Além disso, sabe-se que esse tipo de disposição tem um grande potencial de impactar o meio ambiente no caso de ocorrência de algum sinistro.

A NBR 13.028 (ABNT, 2006) define o que vem a ser uma barragem: "qualquer estrutura que forme uma parede de contenção de rejeitos, para sedimentos e/ou para formação do reservatório de água". Outra definição pode ser encontrada na Lei Federal de nº 12.334 (BRASIL, 2010), a qual diz que barragem é "qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas".

2.3.1 Barragens de Rejeitos Através de Aterro Hidráulico

A barragem de rejeito por aterro hidráulico emprega o próprio rejeito resultante do processo de lavra e beneficiamento como material de construção, através da técnica de hidromecanização. Na grande maioria dos casos as barragens de rejeitos são projetadas para sofrer alteamentos periódicos, com a possibilidade de acréscimos de volumes de modo a minimizar custos de investimentos antecipados.

O modelo adotado para a construção da Barragem de Rejeitos de Fundação (BRF) possuía as seguintes estruturas:

- Fundação: estrutura responsável por suportar e transferir para o solo os carregamentos provenientes da barragem. Ou seja, é o local onde a barragem se assenta;
- Aterro/Maciço: denominação da própria estrutura da barragem, responsável por conter o material dentro do reservatório;
- Ombreiras: as superfícies laterais de contato com as margens do vale onde ela foi implantada;
- Drenagem Interna: sistema interno à barragem, constituído por materiais que conduzem de forma ordenada o fluxo das águas no interior da estrutura;
- Crista: superfície plana e horizontal que delimita superiormente o corpo da barragem;
- Vertedouro: sistema externo responsável pela descarga de água durante e após a ocorrência de chuvas, para manter a cota operacional de nível de água do reservatório;
- Reservatório: área delimitada pela cota da barragem, onde fica acumulado o material que se quer guardar.

Em conformidade com os aspectos técnicos do local da barragem, que envolvem condições topográficas, disponibilidades de materiais terrosos de construção, condições das fundações e das propriedades de engenharia dos rejeitos, os alteamentos podem ser realizados com o posicionamento do eixo pelos processos de montante, centro e jusante. Os três métodos de alteamento de barragens de rejeitos podem ser visualizados na Figura 2.

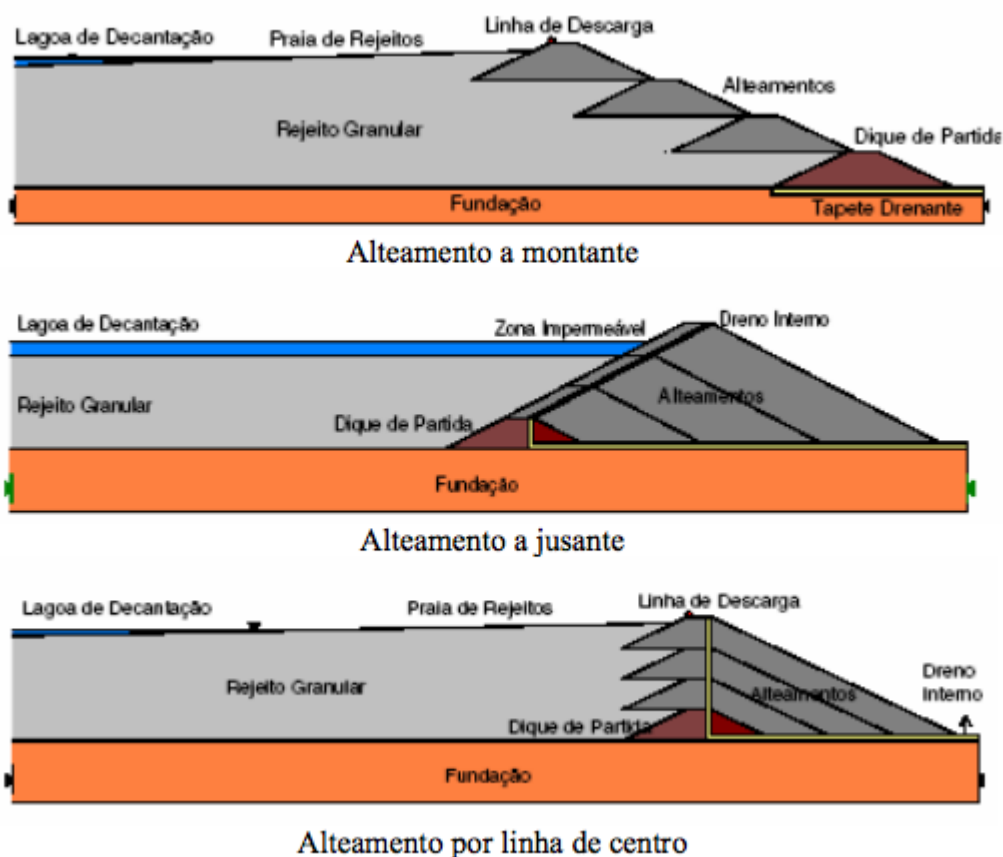


Figura 2 – Métodos de alteamento de barragens de rejeito em várias etapas – (A) Método de Montante, (B) Método de Jusante e (C) Método de Linha de Centro.

Fonte – adaptado de Vick (1983).

A modalidade de alteamento pelo procedimento de deslocamento do eixo para jusante corresponde à solução clássica para barragens de rejeitos, em razão da maior facilidade de construção, uma vez que toda a obra é executada por jusante, portanto não envolve obras de aterros dentro do reservatório.

Entretanto, a solução exige a construção de aterros mais volumosos, exigindo explorações de jazidas de materiais terrosos, ou ainda disponibilidades de solos provenientes de escavações obrigatórias para implantação de estruturas hidráulicas de vertedores, canais, ou ainda volumes de rejeitos suficientes para o alteamento, caso este material seja usado como material de construção.

Já a modalidade do alteamento pelo processo de eixo central é vantajosa nos casos em que as disponibilidades de materiais terrosos são insuficientes, ou ainda quando as propriedades geotécnicas destes materiais são inadequadas para atender as necessidades volumétricas das barragens. Uma vez que a solução exige

menor volume de aterros compactados, a solução apresenta menor custo em comparação aos alteamentos pelo deslocamento do eixo por jusante.

Entretanto, o alteamento de barragens pelo procedimento de eixo central implica na construção de parte da barragem (zona de montante) apoiada sobre o rejeito. Neste caso os aterros exercem pressões de compressão e de cisalhamento sobre os depósitos de rejeitos, de modo que os materiais sedimentados deverão apresentar propriedades de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade suficientes para assegurar a estabilidade da barragem.

Por este motivo os alteamentos pelo procedimento de eixo central precisam ser de pequena altura (em geral não superior a 3 m). Da mesma forma, para a garantia das propriedades de engenharia dos depósitos de rejeitos, é obrigatória a adoção de procedimentos de disposição de rejeitos que possibilitem melhorias das propriedades geotécnicas como, por exemplo, a disposição de rejeitos pelo método do espigotamento a partir da crista da barragem e formação de praia, com esgotamento das águas para jusante.

Por sua vez, o alteamento por montante, por utilizar o próprio rejeito para executar alteamentos é vantajosa nos casos em que não existem disponibilidades de materiais terrosos para construção de aterros. Desta forma, os alteamentos são construídos sobre o rejeito depositado dentro do reservatório, procedendo a disposição dos rejeitos com uso de ciclones apoiados sobre diques de pequena altura, de modo a separar a fração grossa necessária, para formar o talude de jusante do aterro, com maior resistência ao cisalhamento e maior coeficiente de permeabilidade. A fração fina será encaminhada para o interior do reservatório.

Embora a solução apresente menor custo que as demais, ela resulta em depósitos de menor coeficiente de segurança, com relação aos outros métodos de alteamento, sujeito a ruptura pelo fenômeno de liquefação, de difícil antecipação e ocorrência súbita (sem aviso prévio). A Figura 3 ilustra a técnica de aterro hidráulico em uma barragem de alteamento a jusante.



Figura 3 – Disposição de rejeitos através do método de aterro hidráulico em uma barragem de alteamento a jusante.

Fonte – Espósito (2000).

O lançamento do rejeito é realizado por canhões ou ciclones. O tipo de equipamento utilizado depende das características do rejeito. Os ciclones geralmente são utilizados para retirar a água da polpa, reaproveitar essa água no processo industrial, e separar as frações finas e granulares.

No que diz respeito ao comportamento do rejeito de minério de ferro, a técnica de aterro hidráulico por meio de ciclones ocasiona uma segregação hidráulica distinta do mecanismo clássico. O mecanismo clássico é descrito por Kealy e Busch (1971, apud VICK 1983) e consiste na formação de zonas de permeabilidades, conforme Figura 4.

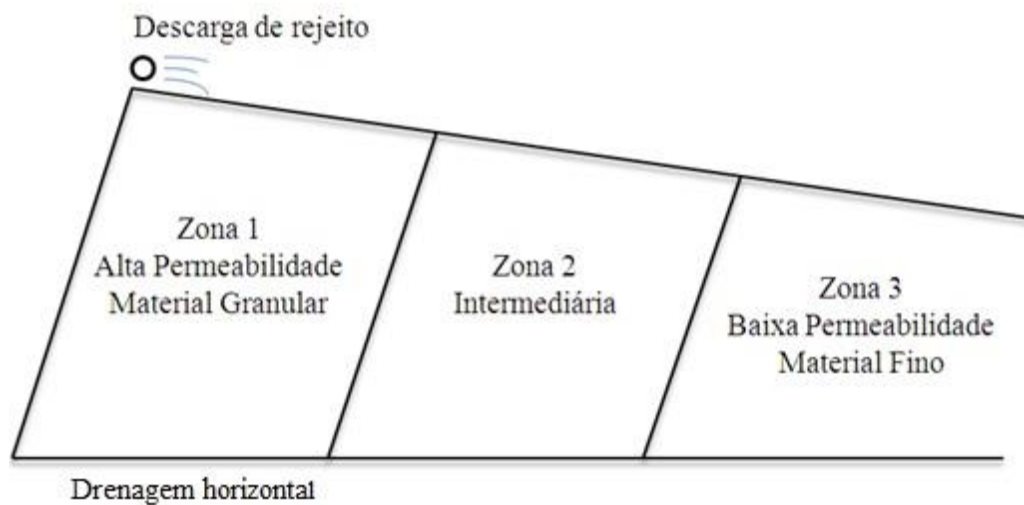


Figura 4 – Mecanismo clássico da variação da permeabilidade na disposição de rejeitos.

Fonte: adaptado de Kealy e Busch (1971).

Devido ao fato da segregação hidráulica selecionar as partículas de acordo com seu peso, próximo ao ponto de descarga, forma-se uma zona de alta permeabilidade (material granular) e distante do ponto de descarga é formada uma zona de baixa permeabilidade (material fino). Uma zona de permeabilidade intermediária é formada entre as duas zonas supracitadas. Esta afirmação é válida para uma massa específica dos grãos constante.

Como relatado anteriormente, os rejeitos de minério de ferro são formados em sua maioria por quartzo (compostos leves e de maior diâmetro) e uma pequena fração de hematita (formado por partículas de maior peso e menor diâmetro). Sendo assim, as regiões próximas ponto de lançamento do rejeito haverá uma predominância da hematita. Em contrapartida, o material depositado distante do ponto de lançamento terá sua composição majoritariamente composta de quartzo (ESPÓSITO, 2000).

Esta forma de segregação do material disposto faz com que a permeabilidade junto ao maciço diminua, uma vez que a fração mais fina irá compor o barramento. Este comportamento poderá elevar a linha freática no maciço, reduzindo a estabilidade do barramento. Segundo Lima (2006), as lamas podem permanecer saturadas por anos, caso não haja evaporação e/ou drenagem da água resultante do processo de sedimentação e de adensamento.

Segundo Espósito (2000) e Milonas (2006), embora haja vantagem econômica, o método de alteamento de barragem à montante, associado à técnica

de disposição hidráulica sujeita a estrutura a riscos como elevação da linha freática, liquefação, e *piping*, principalmente pelo fato dos alteamentos serem dispostos sobre fundação composta por camadas fofas de rejeito dificultando a implantação de tapetes drenantes para a drenagem interna. No aspecto de segurança, o método alteamento a jusante oferece menores riscos, pois permite o controle da linha de saturação, permitindo o correto desempenho geotécnico da barragem.

A disposição hidráulica de rejeitos em barragens alteadas para montante e seu gerenciamento em função da segurança, sugere preocupações para o aumento da segurança desse tipo de barragem (SILVA, 2010). Segundo Espósito (2000) e Figueiredo (2007), a ocorrência de acidentes aliada à falta de controle do método de lançamento da polpa de rejeito e, conseqüentemente, a dificuldade em se prever o comportamento geotécnico deste tipo de estrutura, resultam em maiores fatores de riscos de acidentes.

2.4 BARRAGEM DE REJEITOS DE FUNDÃO (MARIANA - MG)

A Barragem de Rejeitos de Fundão faz parte do Complexo de Germano da Samarco, localizada em Mariana, no interior de Minas Gerais, Brasil, de acordo com o mapa apresentado na Figura 5.



Figura 5- Localização da cidade de Mariana em Minas Gerais.

Fonte: Abreu (2006).

2.4.1 Histórico

No dia 5/11/2015, aproximadamente às 15:45 h, a Barragem de Rejeitos de Fundão pertencente á SAMARCO MINERAÇÃO S/A, localizada no município de Mariana-MG, rompeu provocando a liberação de mais de 34 Mm³ (trinta e quatro milhões de metros cúbicos) de rejeitos. No dia do rompimento, mais de 600 (seiscentas) pessoas, dentre empregados e terceirizados trabalharam no local. Treze trabalhadores faleceram (MORGENSTERN et al., 2016).

A lama de rejeitos que se espalhou pelo vale do Córrego do Fundão galgou a Barragem de Santarém e alcançou o distrito de Bento Rodrigues, matando cinco moradores, sendo atingidos mais de 600 km de cursos d'água e comprometidos quase 1600 ha de vegetação.

A lama, que aumentou a turbidez da água, provocou a morte de milhares de peixes e outros animais e, segundo o IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - das 80 espécies de peixes nativas, 11 são classificadas como ameaçadas de extinção e 12 existiam apenas nos rios que foram atingidos. Em duas semanas a lama percorreu toda a extensão do Rio Doce até desaguar em sua foz no município de Linhares, no Espírito Santo.

Os fatos históricos e circunstâncias consideradas como mais relevantes na bibliografia estudada para a compreensão da ruptura possui histórico completo é muito extenso, não cabendo nessa dissertação. Nenhuma tentativa é feita aqui para analisá-lo em sua totalidade.

2.4.2 Fontes de informações e recursos utilizados

A análise do acidente foi realizada durante os meses de agosto de 2016 a abril de 2017. Foram analisados os seguintes documentos:

- Relatório de Análise do Acidente, elaborado pelo Ministério do Trabalho, em abril de 2016;
- Laudo Técnico em resposta ao Parecer Único do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Nº 257/2017, com a Análise Técnica Referente à Revalidação da Licença Operacional da BRF;

- Procedimento Investigatório Criminal (PIC) MPF n.º1.22.000.000003/2016-04 do Ministério Público Federal dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo;
- Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão, elaborado em 25 de agosto de 2016, pelo Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão;
- Recortes de revistas e jornais de impacto nacional, e citados nas referências desta dissertação, com entrevistas de gerentes responsáveis pelas áreas de segurança do trabalho, de projeto e de operação da barragem, trabalhadores que estavam no local no momento do ocorrido, engenheiro projetista responsável pelo projeto original da barragem (Pimenta de Ávila Consultoria LTDA) e técnicos da empresa responsável por laudos de monitoramento e segurança da barragem.

2.4.3 Considerações técnicas da Barragem de Fundão

O beneficiamento de minério de ferro no Complexo de Germano da Samarco resultava em dois tipos distintos de rejeitos, produzidos e transportados em forma de polpa com fluxos separados. Areias, ou rejeitos arenosos, na verdade são compostos de areia e partículas com granulometria de silte em proporções aproximadamente iguais. Durante a deposição, eles formam uma praia levemente inclinada, através da qual a água de transporte escoava de forma bastante rápida. As lamas, por outro lado, são de granulação fina e argilosa por natureza. As partículas com granulometria de argila permanecem em suspensão e acabam por se assentar na água parada produzindo um material mais macio e de baixa permeabilidade. Na Figura 6 é apresentado Inventário de estruturas da Barragem de Fundão, considerando as seguintes estruturas:

- Dique principal ou barramento: estrutura construída por taludes com a função de conter rejeitos;
- Crista: local onde se inicia a disposição do rejeito arenoso e ponto mais alto da barragem;
- Reservatório de rejeito arenoso: local onde ocorre a disposição de rejeito arenoso gerado no processo de beneficiamento;

- Reservatório de rejeito fino (lama): local onde ocorre a disposição de rejeito fino gerado no processo de beneficiamento;
- Diques auxiliares: estruturas que servem para delimitar as áreas de disposição de rejeito e permitir um manejo adequado;
- Ombreira: terreno natural onde a barragem se encaixa;
- Vertedouro: estrutura que permite a saída de água do reservatório;
- Drenagem interna: estrutura que permite que a água seja drenada pelo sistema de drenos internos.

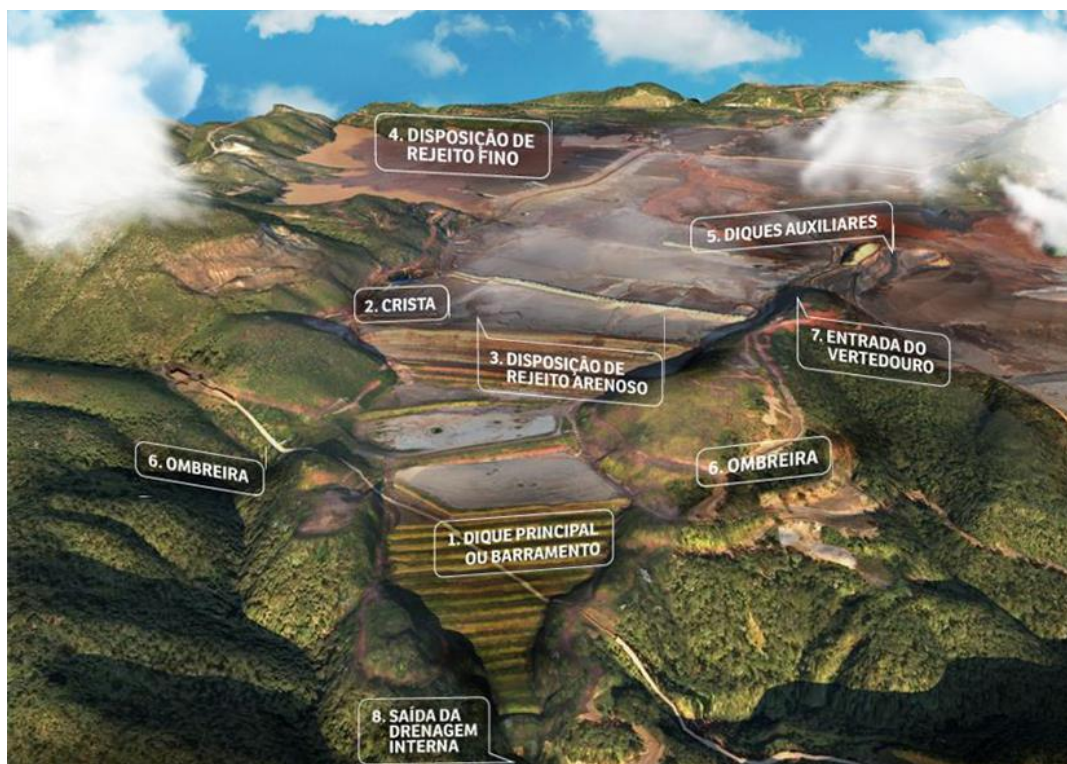


Figura 6 - Inventário de estruturas – Modelo Barragem de Fundão.

Fonte: Morgenstern et al. (2016)

No Complexo da Mina de Germano, um modo foi concebido para usar esses dois tipos de rejeitos e suas características diferentes para melhor proveito. As areias foram depositadas para formar um reforço (*buttress*) ou “pilha” que retinha a lama descarregada separadamente por detrás dela. As areias, por sua vez, eram retidas por um dique de partida em aterro ou enrocamento no pé de jusante da pilha, como ilustrado na Figura 7 para o *buttress* de Germano. Ao longo do tempo, o dique de partida de Germano foi alteado de acordo com o método de montante. Com este procedimento, a crista da barragem se movimentava progressivamente para

montante sobre rejeitos previamente depositados à medida que a barragem era alteada.

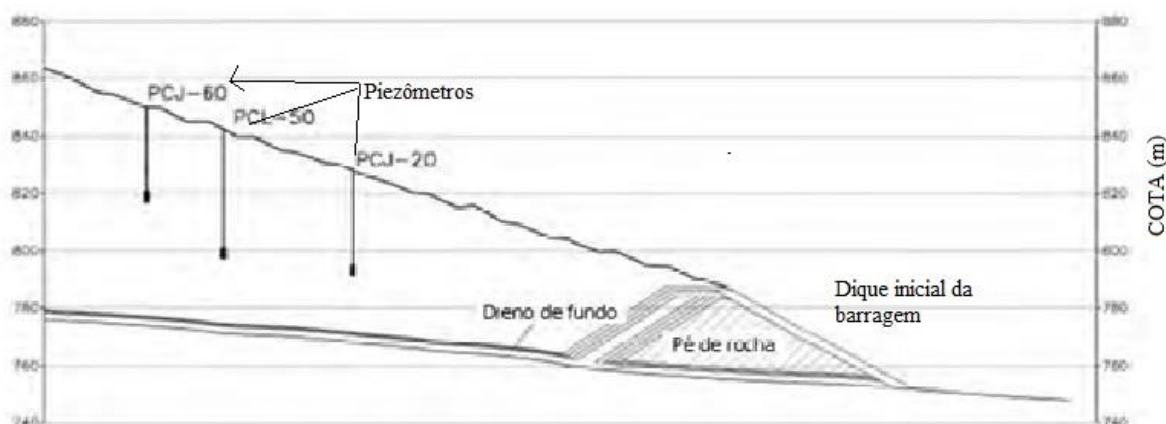


Figura 7- Buttress de Germano.

Fonte: Pimenta de Ávila (2011).

Uma drenagem adequada para o material arenoso era a chave para este conceito. A Figura 7 mostra que o sistema de drenagem que era composto de fundo altamente permeável subjacente à areia e que se estendiam até o dique de partida para evitar acumulação de água e saturação do depósito. A ausência de qualquer pressão de água significativa seria confirmada com os piezômetros mostrados na Figura 7. Desde que não houvesse lama para impedir a drenagem descendente e que as areias permanecessem insaturadas, a resistência à liquefação, que é uma vulnerabilidade conhecida do método de montante, poderia ser assegurada.

2.5 ANÁLISE E GESTÃO DE RISCOS APLICADA A BARRAGENS DE REJEITO

As incertezas do comportamento dos solos sob cargas constituem uma das principais características da Engenharia Geotécnica e, assim, a motivação para efetuar uma análise de riscos resulta de receios por parte de qualquer uma das entidades envolvidas num dado projeto, em termos dos impactos devido a problemas que podem não ter sido adequadamente avaliados, particularmente no caso de adoção de soluções técnicas não convencionais.

Uma análise de riscos consiste basicamente na verificação da forma como os diferentes componentes de um dado sistema interagem, quais os cenários que podem resultar desta interação e quais prejuízos ou danos esses cenários podem provocar (NEVES, 2002). Permite também que sejam expressos e reconhecidos

todos os riscos envolvidos no processo e, conseqüentemente, obriga que os proprietários e os engenheiros responsáveis pela obra tenham de lidar efetivamente com as conseqüências de eventos indesejáveis.

Neste sentido, um processo de gestão de riscos é inicializado pela percepção de eventuais anomalias associadas à segurança ou à funcionalidade de uma determinada estrutura geotécnica; em seguida, uma análise de riscos é realizada para se determinar quais são as decisões ou as recomendações a serem adotadas e, assim, implantar uma gestão de riscos (BOWLES et al., 1998).

2.5.1 Análises de riscos

Risco é uma medida da probabilidade e das conseqüências de um acontecimento inesperado para a vida, para a saúde, para os bens materiais ou para o meio ambiente (ICOLD, 1998). Cristo (2002) destaca que, apesar da ampla utilização de diferentes conceituações propostas pela comunidade científica, a terminologia oficial relativa ao estudo de áreas de risco no Brasil é aquela proposta pelo Ministério do Planejamento e apresentada no Plano Nacional de Defesa Civil (PNDC, 2000), onde são definidos os seguintes termos:

- Risco: Medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidades estatísticas de ocorrência e de intensidades ou grandezas das conseqüências previsíveis;
- Desastre: Resultados de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais, com conseqüentes prejuízos econômicos e sociais;
- Dano: Medida que define a intensidade ou severidade da lesão resultante de um acidente ou evento adverso; se for perdido o controle sobre o risco, pode resultar em perda humana, material ou ambiental, física ou funcional;
- Vulnerabilidade: Condição intrínseca ao corpo ou sistema receptor que, em interação com a magnitude do evento ou acidente, caracteriza os efeitos adversos, medidos em termos de intensidade dos danos prováveis;
- Ameaça: Estimativa de ocorrência e magnitude de um evento adverso, expresso em termos da probabilidade estatística de concretização do evento e da provável magnitude de sua manifestação.

Em geotecnia existe ainda a necessidade de introdução do conceito de ruptura, uma vez que, em geral, os riscos estão associados a rupturas de estruturas geotécnicas; neste contexto, Pimenta (2008) e Santos (2007) definem a ruptura como sendo a perda da capacidade de uma estrutura, ou parte dela, de funcionar como previsto.

Uma análise de riscos consiste na utilização de um conjunto de informações disponíveis para estimar os riscos apresentados devido à presença de incertezas. Os riscos podem ser classificados em riscos potenciais, que somente quantificam as consequências de um evento inesperado, e riscos efetivos, expressos pelo produto do risco potencial pela probabilidade de efetivação do evento.

A classificação dos riscos pode ser subdividida em função da sua origem, incidência, possibilidade de mensuração e probabilidade. Quanto à origem, os riscos podem ser imputados por fenômenos naturais, tecnológicos ou humanos de diferentes fontes e intensidades. Pode ainda incidir sobre um único indivíduo ou sobre uma comunidade (risco individual e risco social) e podem ter suas consequências passíveis ou não de mensuração (riscos tangíveis e intangíveis).

Uma análise de riscos consiste na identificação dos eventos indesejáveis que conduzem à materialização dos riscos, na análise dos mecanismos pelos quais esses eventos podem ocorrer e na estimação da extensão, da amplitude e da probabilidade de concretização dos efeitos dos perigos (ALMEIDA et al., 2000).

2.5.2 Apreciação de riscos

A apreciação de riscos engloba diversos aspectos como: objetivos da obra, valores sociais, a legislação vigente, os regulamentos e as orientações normativas. Os resultados da análise de riscos entram no processo de tomada de decisão, explicitamente ou implicitamente, formulando considerações sobre a importância relativa dos riscos calculados, assim como das respectivas consequências, com o objetivo de identificar e analisar as alternativas que se colocam no âmbito da gestão de risco (SANTOS, 2007).

Em uma análise de riscos, devem ser considerados os danos à imagem da organização responsável pela obra, as perdas econômicas, os impactos ambientais e, principalmente, a probabilidade de perda de vidas humanas. Existindo a possibilidade de perda de vidas, os limites de aceitabilidade são distintos em função

do tipo de risco em análise: risco individual ou risco coletivo. Desta forma, existe entre os proprietários e engenheiros responsáveis pela análise de riscos, dificuldades no entendimento do conceito e na aceitabilidade dos riscos, sendo esta uma das maiores dificuldades da avaliação de riscos.

2.6 MODOS DE FALHA DE BARRAGENS POR SEUS EFEITOS (FMEA)

A análise de modo de falhas e seus efeitos (sigla em inglês - FMEA) é uma técnica que considera modos de falha (ou falhas) de um determinado elemento e determina seus efeitos em outros componentes e no sistema global. É uma metodologia de análise iterativa, descritiva e qualitativa que promove, com base na disponibilidade de conhecimento e informação, a sistemática e raciocínio lógico como meio de melhorar significativamente a compreensão das fontes de risco e a justificativa para as decisões relativas à segurança de sistemas complexos, como por exemplo, as barragens. Sem exigir estruturas matemáticas ou estatísticas, pretende assegurar que qualquer falha potencial plausível seja considerada no estudo, utilizando questionamentos como: *o que pode dar errado? Como e em que medida pode dar errado? O que pode ser feito para prevenir ou mitigar isso?* (SANTOS et al. 2012).

É uma ferramenta versátil com potencial para aplicação à avaliação da segurança da barragem, especialmente para identificação de riscos e análise de risco qualitativa. Os resultados do uso da ferramenta FMEA são úteis para mapear os impactos de todos os eventos prejudiciais que podem ocorrer durante a construção ou operação de uma barragem e, em última instância, para identificar e priorizar as ações de detecção e mitigação.

Em 1994 a SAE (*Society of Automotive Engineers*) publicou a norma SAE J1739, que define a forma como a FMEA deve ser realizada. A aplicação da ferramenta FMEA neste trabalho baseou-se nos na norma SAE J1739, considerando os seguintes conceitos e definições:

- O FMEA é uma ferramenta onde se apresenta todos os componentes que podem afetar ou serem afetados por uma falha da estrutura em estudo. O sistema FMEA é dividido de forma sistemática em subsistemas sucessivos, até o componente de nível mais básico, para uma compreensão adequada de suas funções que devem estar disponíveis;

Um componente básico é um aparte mais simples de um sistema. As funções de um componente descrevem seu papel no sistema;

- Uma falha é a cessação, ou interrupção, da capacidade de um componente, um subsistema ou o sistema para realizar uma das funções para as quais foi projetado. O modo de falha é o modo pelo qual uma falha é observada em um componente do sistema; geralmente, ele descreve as formas em que a falha ocorreu;
- A causa da falha é o que indica a razão da falha ter ocorrido e detecção é a forma utilizada no controle do processo para evitar as falhas potenciais;
- A causa raiz da falha pode ser resultado de fenômenos tecnológicos, físicos, químicos ou processos biológicos, design ou deficiências construtivas, materiais inadequados ou de má qualidade, falhas operacionais ou mesmo ações humanas, como sabotagem ou atos de guerra;
- O efeito de falha é o impacto de um modo de falha em termos de desempenho do sistema e de seus componentes e consiste em um conjunto de resultados associado à perda de capacidade de um elemento para realizar uma função requerida.

Para cada modo de falha, os efeitos sobre o componente em si (efeitos diretos), em outros componentes ou subsistemas (efeitos intermediários) e, em geral o sistema (efeitos finais) é avaliado. Com base na sequência de eventos da falha, o método de detecção, de controle e as medidas de mitigação podem ser identificados e recomendados. As medidas de detecção são os meios ou métodos pelo qual um modo de falha pode ser descoberto sob condições normais de operação.

As medidas de controle envolvem os trabalhos de reparação que devem ser realizados após ocorrida a falha, para controlar a sequência de seus efeitos, paralisando-os ou atrasando-os. As medidas de mitigação pretendem reduzir os efeitos finais e as suas consequências.

A análise do modo de falha e seus efeitos é um método indutivo que permite: (1) a avaliação dos efeitos e da sequência de eventos induzida por cada modo de falha dos componentes de um sistema em relação às suas várias funções e / ou operacional, manutenção ou requisitos ambientais; (2) a determinação da importância relativa de cada modo de falha nas condições de desempenho normais

do sistema; (3) a avaliação do impacto sobre a confiabilidade e segurança do sistema; e (4) a classificação dos modos de falha estudados de acordo com a realidade associada à sua detecção e controle.

A análise do processo é hierárquico e sequencial, então os modos de falha são definidos em função de seus níveis na hierarquia do sistema. Os efeitos de falha do nível inferior tornam-se os modos de falha do próximo nível, e assim por diante, até que o nível mais alto do sistema seja alcançado. Esses efeitos podem resultar em um ou mais modos de falha de um ou mais subsistemas ou de um ou mais componentes.

O valor e a eficácia do processo FMEA depende do grau de experiência adquirida no processo de identificação e análise do modo de falha. O envolvimento de uma equipe multidisciplinar é, portanto, essencial para a sua aplicação, ao longo de análises detalhadas de todos os elementos relacionados no projeto, construção e operação do sistema.

A interação entre modos de falha de diferentes componentes devem ser considerados, devido à sua contribuição provada para acidentes e incidentes e porque um componente pode compensar pela falha funcional de outro componente, resultando em efeitos não visíveis no sistema (HARTFORD; BAECHER, 2004). Ambos os aspectos são importantes no processo FMEA para evitar que alguns modos importantes de falha sejam negligenciados e ou considerado como um risco irrelevante.

Aplicando o uso da ferramenta, o método do FMEA segue uma estrutura básica perfeitamente definida que contempla seis etapas indispensáveis apresentadas abaixo:

1. Estruturação do sistema;
2. Definição das funções de cada componente do sistema;
3. Identificação dos modos potenciais de ruptura associados a cada função de cada componente;
4. Identificação das causas potenciais;
5. Descrição dos efeitos diretos, nas demais componentes e no sistema;
6. Levantamento das medidas disponíveis para detecção dos modos de ruptura ou das suas causas e controle ou mitigação dos seus efeitos.

Segundo Pimenta et al. (2006), a aplicação desse método deve ser ilustrada por planilhas, fluxogramas, diagramas de blocos, diagramas esboços para ilustrar os modos de falha e diagramas de causa e efeitos, destacando a importância da utilização de diagramas de blocos funcionais. Estes diagramas descrevem, de modo gráfico, a sequência e a relação entre as funções das componentes básicas de um dado subsistema em análise.

Na Figura 8 está representado um “bloco funcional”, onde o fluxo ocorre da esquerda para a direita, apresentando as funcionalidades de componentes do mesmo subsistema (funções anteriores) e/ou de subsistemas exteriores (inputs/outputs).

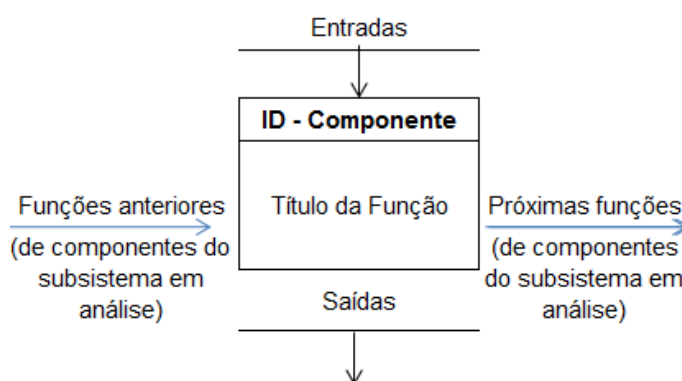


Figura 8 – Bloco Funcional de um Diagrama de Bloco Funcional.

Fonte: Pimenta et al. (2006).

2.6.1 Descrição dos Efeitos dos Modos de Ruptura de uma Barragem de Rejeitos

Os efeitos dos modos de ruptura traduzem as consequências, em termos do desempenho ou da operacionalidade das componentes, dos subsistemas e do sistema global. Um efeito pode resultar de um ou de vários modos de falha como, por exemplo, a ruptura por liquefação ou por efeito *piping*, e estar associado a vários componentes (ou subsistemas). Para melhor sistematização de análise, todos os efeitos de cada modo de ruptura devem ser registrados.

Se o sistema em análise é uma barragem, estes efeitos não devem ser confundidos com os efeitos remotos (consequências no vale à jusante), os quais podem também resultar da mesma ruptura, tais como perdas de vidas e danos materiais associados à propagação da onda de inundação, resultante do colapso estrutural da barragem.

De uma forma geral, os efeitos de modos de ruptura podem ser subdivididos em dois grandes grupos: os efeitos diretos e os efeitos indiretos. Os primeiros podem ainda ser subdivididos em efeitos imediatos e em efeitos próximos. Os segundos podem também ser designados por efeitos finais ou globais. Os efeitos imediatos são aqueles relativos às consequências no componente em análise, enquanto os efeitos próximos devem relatar os efeitos em outros componentes ou subsistemas adjacentes de nível inferior. À medida que se persegue a sequência de efeitos, progride-se nos níveis de detalhe na cadeia hierárquica, alcançando-se, por fim, os efeitos finais no sistema como um todo.

A decisão da forma como se apresentam, no FMEA, os resultados dos efeitos dos modos potenciais de ruptura cabem aos responsáveis pela análise. Quanto maior for o detalhe na apresentação dos resultados, mais completa será a análise, porém, mais difícil e demorada a sua execução. A descrição do modo como os efeitos de uma componente básica são propagados a outras componentes de outros subsistemas de níveis inferiores têm uma importância significativa, dado que o FMEA inclui na análise as medidas de detecção e de controle dos modos de ruptura (CVRD, 2005).

2.6.2 Métodos de Detecção e de Controle

Uma vez identificados os modos de falha de cada componente do sistema, com suas causas potenciais e os seus efeitos, a análise poderá ser complementada com a descrição dos métodos e procedimentos disponíveis na obra que permitam, em primeira análise, detectar as causas iniciadoras dos modos de ruptura e, caso estes iniciem, controlar seus efeitos no sistema. Tipicamente, os métodos de detecção incluem a observação de fenômenos físicos, químicos ou biológicos, seja por procedimentos de auscultação por meio de inspeções visuais ou pela instrumentação de seções típicas ou pela execução de ensaios periódicos.

As medidas de controle estabelecem procedimentos que permitem, em tempo útil, interromper as cadeias de sucessivos modos de ruptura ou atenuar os seus efeitos no sistema (BSI, 1991). De um modo geral, a utilização da FMEA em sistemas tem como ponto chave a avaliação da vulnerabilidade da estrutura na sua fase de serviço.

2.6.3 Estimativas de Risco

Comumente adotado para se determinar e classificar quantitativamente o risco consiste no cálculo do chamado Número de Risco de Prioridade (*Risk Priority Number* - RPN). O RPN é o produto dos índices atribuídos à severidade, à probabilidade de ocorrência e à probabilidade de detecção dos modos potenciais de ruptura de acordo com critérios previamente definidos, tal que:

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.1)$$

Onde,

RPN = Número de Prioridade de Risco;

S = Índice de severidade;

O = Probabilidade de ocorrência;

D = Probabilidade de detecção.

O índice de severidade pretende avaliar o impacto dos efeitos dos modos de ruptura sobre o funcionamento do sistema em análise; o índice de probabilidade visa traduzir a frequência ou a probabilidade de aparecimento de cada modo de falha e o índice de detecção pretende traduzir a probabilidade de não detecção, pelos dispositivos de controle, das causas ou efeitos dos modos de ruptura.

A Tabela 1 apresenta exemplos de índices de severidade, índices de probabilidade de ocorrência e índices de probabilidade de detecção, respectivamente, (SAE, 1994) para uma análise de satisfação do cliente.

Tabela 1- Índices de Severidade Si, Ocorrência Oi e Detecção Di.

Si		Oi		Di	
Si	Efeito	Oi	Prob.	Di	Prob.
1	Muito Baixo	1	Improvável (0,1 %)	1	Quase certa
2,3	Baixo	2,3	Remoto (0,1 % a 1 %)	2	Muito Alta
4,5	Médio	4,5,6	Ocasional (1 % a 10 %)	3	Alta
6,7,8	Severo	7,8,9	Provável (10 % a 20 %)	4	Moderadamente Alta
9	Muito Severo	10	Frequente (>20 %)	5	Moderada
10	Catastrófico			6	Baixa
				7	Muito Baixa
				8	Remota
				9	Muito Remota
				10	Quase Impossível

Fonte: norma SAE J1739 (1994).

Os valores de RPN mais altos devem ser tratados prioritariamente, mas é necessário também se atentar para valores parciais dos índices. De acordo com Silva et al. (2006), uma boa prática é a consideração do par de valores Índice de Criticidade e RPN de cada modo de falha, para melhor consistência na tomada de decisões. O Anexo I deste trabalho apresenta um formulário utilizado como base para aplicação da metodologia do FMEA utilizando o RPN como forma de quantificação dos riscos

2.6.4 Considerações finais

É preciso ter presente que os métodos FMEA não podem ser utilizados com o intuito único de conhecer em absoluto todos os riscos de uma estrutura geotécnica. De fato, de acordo a todas as incertezas associadas às obras geotécnicas e às próprias limitações do método, este não tem essa capacidade.

No entanto, é inegável o benefício da sua utilização uma vez que possibilita que a maior parte, e certamente a mais importante, dos perigos e das vulnerabilidades das obras sejam encontradas, estudadas e sintetizadas e, além disso, indica a maneira de detectar as suas causas e de conhecer os seus efeitos. Ajuda também à tomada de ações no sentido de mitigar os riscos determinados com base na avaliação, mesmo que preliminar, das respectivas severidades.

De fato, a análise FMEA é uma técnica que deve ser analisada em todos os instantes relevantes e significativos, ao longo do período de vida da obra em que o estudo refere-se, no sentido de buscar melhorias ou atualizações, quer nos níveis dos modos de ruptura identificados, em suas causas e seus efeitos, quer no nível de sua severidade. A reavaliação da análise deve ser efetuada e documentada sempre que:

- For conhecida documentação ou informação adicional relevante, anteriormente desconhecida ou negligenciada;
- Ocorra uma modificação de determinados aspectos evidenciados através do comportamento da obra;
- Forem alteradas as condições de manutenção da obra;
- Existirem acontecimentos que comprometam ou alterem determinados aspectos assumidos na análise;
- Forem implantadas medidas de mitigação de riscos identificados na análise.

Enquanto método de análise de riscos, o FMEA pode ser considerado como precursor para análises de árvore de falhas e para análises de árvores de eventos mais completa e detalhada.

Pode iniciar-se uma análise de riscos a um sistema utilizando um FMEA através de um método de análise qualitativo, para obter uma visão global do sistema, das suas componentes, das suas funcionalidades, da forma como estas se inter-relacionam e dos seus modos potenciais de ruptura, seus efeitos e as suas respectivas causas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o estudo de análise de riscos da Barragem de Rejeitos de Fundão (BRF), através da ferramenta FMEA.

A metodologia foi desenvolvida em três etapas, citadas a seguir:

- Identificação dos modos de falha na literatura para o estudo de caso;
- Análise de risco da BRF com o uso da ferramenta FMEA;
- Discutir os cenários mais críticos apontados pela ferramenta, comparando com o acidente da BRF.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

A revisão de literatura consiste em evidenciar as publicações técnicas relacionadas ao tema FMEA, considerando um aspecto crítico. Então, a revisão de literatura aborda o mérito da exploração do minério de ferro para a economia brasileira, a tendência da diminuição de teores de ferro nas jazidas, o consequente crescimento da geração de rejeitos e as técnicas de acomodação desses materiais.

Dentre as metodologias abordadas para disposição de rejeito procurou-se aprofundar na técnica de disposição de rejeitos através de aterro hidráulico com alteamento a montante, método utilizado na Barragem de Fundão, devido ao baixo custo operacional. A revisão de literatura indicou que essa técnica apresenta vantagens e desvantagens, se tornando uma opção difundida na realidade mineraria brasileira, considerando uma tendência crescente de produção de rejeitos e escassez de área de armazenamento de rejeitos.

A análise de riscos na barragem, utilizando o método análise do modo de falha e seus Efeitos - FMEA é importante para alimentação de banco de dados podendo servir inclusive como parâmetros de segurança em outros projetos de mineração.

A problemática do gerenciamento de risco para barragem de rejeitos é abordada na revisão de literatura, onde foi apresentada a ferramenta FMEA nessa dissertação.

3.2 ANÁLISE DE RISCOS

A análise de riscos utilizando-se a ferramenta FMEA foi realizada para avaliação do risco da alternativa de disposição através de aterro hidráulico com alteamento a montante.

A análise de riscos servirá, portanto, como ferramentas para identificar os modos de falha e suas consequências, para que seja possível conhecer o risco do cenário do acidente (rompimento) da BRF.

O uso da ferramenta FMEA, permite que sejam isolados os possíveis modos de falha e suas consequências. Com a aplicação da ferramenta FMEA, têm-se os modos potenciais de falha (ocorrência), suas causas e efeitos (severidade), lembrando que a interpretação é condicionada devido ao caráter qualitativo da análise (ESPÓSITO; CALDEIRA, 2010). De acordo com esses autores e Petronilho (2010), o uso de FMEA para sistemas de barragens pode ser realizada seguindo os passos abaixo apresentados:

- Definir e descrever o sistema a ser analisado, dividindo em sistema de componentes básicas;
- Identificar os modos potenciais de falha de cada componente do sistema e a função de cada componente do sistema em análise;
- Determinar as consequências locais ou globais para cada modo de falha;
- Apresentar os métodos de detecção dos modos de falha;
- Apresentar as medidas mitigadoras necessárias para prevenir a ocorrência da falha e/ou limitar os seus efeitos;
- Ordenar as falhas potenciais de acordo com os aspectos de segurança, custos e operacionalidade;
- Elaborar uma matriz de risco.

O uso da ferramenta FMEA para análise de risco foi composta nessa dissertação por três categorias, a saber:

- Categoria de ocorrências;
- Categoria de detecção;
- Categoria de severidades.

Para que fosse possível conferir índices para cada categoria, foram elaboradas as tabelas apresentadas a seguir.

Quanto maior o índice de ocorrência, maior será a probabilidade de ocorrência da falha, como é apresentado na Tabela 2. A categoria das ocorrências define frequência que as falhas podem ocorrer. O índice de ocorrência (O) varia numa escala de 1 a 10.

Tabela 2– Índice de Ocorrência (O).

Ocorrência	Probabilidade de Ocorrência (eventos por ano)
1	Improvável (ate 0,01 %)
2,3	Remota (0,01 a 0,1 %)
4,5	Ocasional (0,1 a 1 %)
6,7	Alto (1 a 10 %)
8,9	Esperado (10 a 20 %)
10	Provável (> 10 %)

Fonte: adaptada de norma SAE J1739 (1994).

Quanto maior o índice de detecção (D), menor a probabilidade de detecção, conforme Tabela 3. O índice de detecção (D) considera a possibilidade de serem detectados os motivos das falhas antes que elas ocorram e varia numa escala de 1 a 10. A inserção do índice de detecção (D) é de essencial importância, considerando que alguns mecanismos deflagradores de acidentes não demonstram alertas claros ou em tempo de evitar a falha. Em vista disso, deve-se considerar uma inspeção rigorosa da estrutura, um mecanismo de alto risco em curso pode não ser percebido.

Tabela 3– Índice de Detecção.

Detecção	Probabilidade
1	Quase certo
2	Elevado
3	Alto
4	Moderadamente alto
5	Moderado
6	Baixo
7	Muito Baixo
8	Remoto
9	Muito remoto
10	Quase impossível

Fonte: adaptada de norma SAE J1739 (1994).

O índice de severidade (S) varia numa escala de 1 a 10. Quanto maior o índice de severidade (S), mais grave será a consequência da falha, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Composição para definição do índice de Severidade (S).

Severidade	Impactos Ambientais
1	Não são esperados impactos
2	Prejuízo de baixa relevância
3	Prejuízos individuais, reversíveis a curto prazo
4	Prejuízos homogêneos, reversíveis a curto prazo
5	Prejuízos homogêneos, reversíveis a longo prazo
6	Prejuízos coletivos, reversíveis a curto prazo
7	Prejuízos coletivos, reversíveis a longo prazo
8	Prejuízos coletivos, reversíveis a longo prazo, de extensão patrimonial e moral
9	Prejuízos coletivos de grandes proporções, de difícil reparação
10	Prejuízos irreparáveis ao meio ambiente

Fonte: adaptada de norma SAE J1739 (1994).

Para uma avaliação do risco utilizando a ferramenta FMEA devem-se utilizar os índices de detecção (D), ocorrência (O) e severidade (S). Essas três categorias da análise de risco compõem o “Número de Potencial de Risco”, ou RPN (sigla em inglês, através da multiplicação desses três índices (O, D e S).

Seguindo a norma J1739, elaborada pela SAE, pode-se também obter como produto, uma relação entre a probabilidade de ocorrência e o impacto da falha, classificada nesta norma como risco, e graficamente representada como matriz de avaliação de risco. Consiste numa matriz bidimensional, que propõe uma considerando apenas as categorias de ocorrência e severidade, composta, por duas dimensões referentes a avaliação qualitativa. Utiliza-se um escala de cores para elaborar a matriz de avaliação de risco, visualizada na Figura 8, que significam níveis de riscos distintos, com a escala de cores variando entre cores quentes (vermelho escuro) a cores frias (azul claro).

Para a elaboração da matriz de risco, adotou-se a mesma classificação ponderada para o índice de severidade e ocorrência, utilizando os mesmos intervalos dos dois índices (Severidade e Ocorrência), sendo apenas diferenciados os índices 9, classificado como crítico, e 10, classificado como trágico. A matriz de risco, como mostrado na Figura 9, apresenta 6 linhas e 6 colunas.

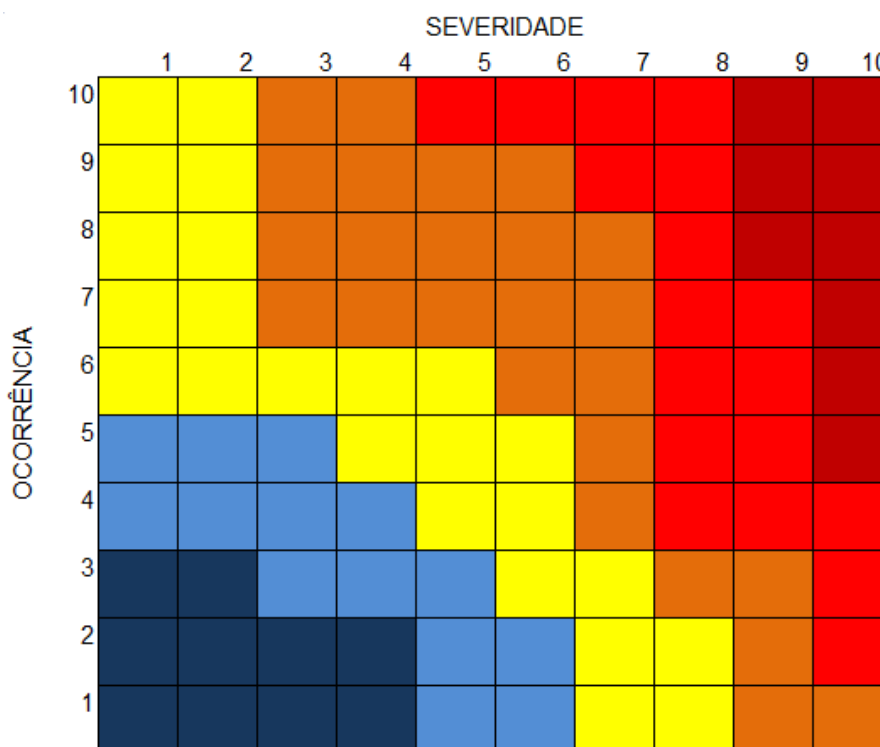


Figura 9 – Matriz de análise de risco adotada na análise FMEA

Fonte: adaptada de norma SAE J1739 (1994).

O benefício dessa forma de representação é a visualização dos modos de falha e os riscos, não passíveis de diferenciação apenas por intermédio da definição do RPN. A abordagem do risco, através do FMEA, foi apresentada nesse trabalho através das duas formas; através do uso do RPN e da matriz de análise de risco, em conformidade com a metodologia aqui apresentada.

No Capítulo 4, onde é feita a apresentação e discussão dos resultados, é apresentado os resultados obtidos desse estudo, correlacionando os resultados do uso da ferramenta FMEA, com o acidente da Barragem de Rejeitos do Fundão.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é descrito o sistema analisado, dividido em componentes básicas, identificado os modos potenciais de falha de cada componente e de cada função e apresentado a matriz de análise de riscos obtida através da aplicação do FMEA.

A etapa inicial para a aplicação da FMEA é a estruturação dos sistemas da barragem de rejeitos de minério. A escolha dos sistemas e subsistemas considerados é realizada em função da importância de cada elemento para a definição dos modos de falhas e seus efeitos.

Ainda, ao longo do capítulo são feitas análises a cerca dos relatórios apontados nas fontes de informações e recursos utilizados, conforme apresentado na revisão de literatura, comparando-os com os resultados obtidos com o estudo de FMEA.

Como guia de conformidade para um conjunto de restrições de separação de tarefas do sistema apresentado, utilizou-se a norma SAE J1739 da SAE (*Society of Automotive Engineers*) publicada em 1994, e os valores considerados neste trabalho foram validados seguindo esta norma e outros trabalhos científicos. (SANTOS et al. 2012); (ESPÓSITO; CALDEIRA, 2010).

Para a aplicação do FMEA neste estudo de caso foi elaborado o sistema para o cenário de disposição de rejeitos de minério de ferro da Barragem do Fundão, referindo-se à barragem de aterro hidráulico com alteamento para montante.

A seguir, são apresentadas as pontuações para o sistema de disposição de rejeitos. Dessa forma, facilita-se a compreensão da elaboração da matriz de risco. Os principais itens que compõem o sistema da barragem de rejeito do Fundão, apresentada na Figura 6, é composto pelos seguintes subsistemas:

- 1 Corpo da barragem:
 - 1.1 Crista;
 - 1.2 Núcleo;
 - 1.3 Talude de montante.
- 2 Sistema de drenagem interna:
 - 2.1 Filtro septo vertical/inclinado;
 - 2.2 Tapete drenante;

2.3 Saída do dreno de fundo.

3 Sistema de drenagem superficial:

3.1 Vertedouro.

4 Fundação;

5 Reservatório de acumulação de rejeitos.

4.1 CORPO DA BARRAGEM

Iniciando pelo sistema “CORPO DA BARRAGEM”, o Quadro 1 apresenta as principais características esperadas para o cenário estudado e a Figura 10 apresenta as pontuações definidas de forma qualitativa, nos seus subsistemas crista, núcleo e talude de montante. De uma forma geral, a pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- Para estruturas geotécnicas de grandes alturas, sabe-se que são esperadas grandes deformações, podendo ocasionar como efeito final a instabilidade global, caso a estrutura não seja monitorada ou bem dimensionada. Uma instabilidade global pode ser catastrófica para uma estrutura geotécnica. Para o quesito severidade, foram atribuídas notas distintas no modelo de barragem estudada (9 e 10, respectivamente). O critério de pontuação foi devido ao alcance dos rejeitos, após ruptura, ser maior caso haja ruptura em barragens.. Assumindo como premissa diferenças relevantes entre o projeto e construção, a prevenção e detecção desse modo de falha são consideradas baixas (nota 6). Para o controle de detecção, no caso dos recalques por colapso e/ou adensamento foi atribuída nota 5 (alto), assumindo-se falha no projeto de instrumentação e da necessidade do adequado monitoramento contínuo. No caso do controle da ineficiência da compactação, sua detecção pode ser facilmente obtida através de ensaios de campo durante a obra, sendo quase certa sua probabilidade de detecção (nota 1).
- No caso de um evento de instabilidade global foi mantido o mesmo critério em termos de severidade, conforme discutido anteriormente. Para instabilidades locais foi atribuída nota 7, em função dos possíveis impactos legais, tendo em vista que o alcance de uma ruptura local é de impacto regional. Tendo em vista a divergência da qualidade construtiva e de projeto, a prevenção e detecção desse modo de falha foram consideradas baixas (nota 6).

- No que diz respeito à probabilidade de ocorrência de determinado modo de falha, mais especificamente com relação aos dados de entrada para dimensionamento do projeto, foi atribuída nota 2 (remoto), assumindo um projeto concebido com uma boa campanha de investigação geológico-geotécnica e boa qualidade de dados hidrológicos. Para aspectos relacionados à inadequação construtiva e/ou de manutenção foi atribuída nota 4 (ocasional), tendo em vista que podem ocorrer dificuldades de manutenção efetiva na prática da mineração.

Quadro 1– Características adotadas para o corpo da Barragem do Fundão.

Barragem com alteamento a montante

A barragem construída com alteamento à **montante**, contou, inicialmente, com a construção de um dique inicial ou de partida, utilizando-se de aterro compactado. Os rejeitos são descarregados hidráulicamente, por meio de canhões ou hidrociclones, desde a crista (parte mais alta) do dique de partida, formando uma praia de rejeito que, com o tempo, será adensada e servirá como fundação e fornecendo material para diques de alteamento, que foram construídos com o próprio material do rejeito. O processo foi repetido até que o momento da falha. Esse método é o mais simples e de mais baixo custo de construção, porém está associado à maioria dos casos de ruptura de barragens de rejeitos em todo o mundo.

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
1 Corpo da barragem									
Conter os rejeitos	Insuficiente capacidade de conter os rejeitos	Instabilidade Global da Barragem	10	Inadequação do Projeto / construção	2	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	3	60
1.1 Crista									
Conter os rejeitos	Liquefação	Rompimento da crista da barragem	10	Inadequação do Projeto / construção	2	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	7	140
Permitir acesso a barragem	Não permitir acesso a barragem	Impossibilidade de realizar inspeções	4	Inadequação do Projeto / construção	2	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	1	8
1.2 Núcleo									
Redução da condutividade de hidráulica	Redução de percolação	Liquefação	10	Dissolução de materiais	3	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	7	210
1.3 Talude de montante									
Reter rejeitos	Instabilização devido aos movimentos de massa de solo (durante a fase de enchimento do lago)	Redução do volume do maciço - Perda de estanqueidade do sistema - ruptura da barragem	6	Alteração físico-química dos solos, deficiente ligação ente as camadas de compactação etc	3	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	3	54
Prover estabilidade mecânica à barragem	Deformação excessiva (fase de enchimento do lago)	Redução do Fator de Segurança - Erosão superficial	6	Deficiente ligação ente as camadas de compactação, deficiência de projeto	3	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	3	54

Figura 10 – Aplicação da FMEA para o corpo da barragem.

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

4.2 SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA

Para o subsistema “sistema de drenagem interna”, o Quadro 2 apresenta as principais características esperadas para o cenário e a Figura 11 apresenta as pontuações definidas de forma qualitativa. A pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- Para os eventos de instabilidade global e local foi mantido o mesmo critério para as estruturas no que diz respeito à nota atribuída ao índice de severidade;
- A nota atribuída ao índice de ocorrência foi nota 2, (índice de ocorrência remoto), seguindo os mesmos critérios adotados anteriormente. Tendo em vista que conceitualmente a causa da falha do sistema de drenagem interna está mais relacionado ao projeto e a construção, não à manutenção;
- No que diz respeito ao tipo de controle, foi atribuída nota 2 (detecção elevada) para os métodos preventivos, tendo em vista a qualidade prevista para elaboração do projeto e construção. Para o controle do tipo detecção, foi atribuída a nota 6. A nota 6 (detecção baixa) foi assinalada para modos de falha relacionadas ao aumento da poropressão, assumindo inadequado projeto de instrumentação dessas estruturas. Já para o modo de falha relacionado à erosão interna, foi atribuída nota 6 (detecção baixa) devido às dificuldades de constatação de um processo de *piping* registrado em 2010 na Barragem do Fundão.

Quadro 2– Características adotadas para o sistema de drenagem interna da Barragem do Fundão.

Cenário	Características Esperadas
Barragem de aterro hidráulico com alteamento a montante	Drenagem interna composta por filtro septo e dreno horizontal. A função da drenagem interna é principalmente a de captar contribuições do reservatório, da fundação e da infiltração de água pela chuva, conduzindo com segurança para fora do maciço.

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
2 Sistema de drenagem interna									
Drenar e filtrar a água (fundação e da chuva).	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	8	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	2	32
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	48
		Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	2	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	8	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	2	32
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	96
		Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	2	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120

Figura 11a – Aplicação da FMEA para o sistema de drenagem interna.

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
2.1 Filtro septo vertical/inclinado									
Interceptar, drenar e filtrar a água do reservatório.	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes construtivos Inspeção visual e monitoramento	Prevenção	1	20
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes construtivos Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
2.2 Tapete drenante									
Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro septo.	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	8	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	16
		Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	48
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
		Instabilidade local	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
		Instabilidade local	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
		Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	7	140
2.3 Saída do dreno de fundo									
Promover a função de filtro.	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	8	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	16
		Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	48

Figura 12b – Aplicação da FMEA para o sistema de drenagem interna (continuação).

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

4.3 SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL

Para o subsistema “sistema de drenagem superficial”, a Quadro 3 apresenta as principais características esperadas para o cenário e a Figura 13 apresenta as pontuações definidas de forma qualitativa, segundo os seguintes critérios:

- A incapacidade de conduzir a vazão pode ocorrer devido ao aumento da alimentação de polpa de rejeito, variando os dados que alimentam os dimensionamentos hidráulicos ou obstrução da estrutura hidráulica. Dessa forma, admitiu-se índice de ocorrência igual a 5 (ocasional);
- Para o método de controle preventivo foi atribuída nota 1 (detecção quase certa), tendo em vista a qualidade prevista para elaboração projeto e da execução em campo. Para o controle do tipo detecção também foi atribuída nota 2, pois entende-se que qualquer obstrução das estruturas hidráulicas seriam facilmente identificadas durante uma inspeção visual.

Quadro 3 – Características adotadas para o sistema de drenagem superficial da Barragem do Fundão.

Cenário	Características Esperadas
Barragem de aterro hidráulico com alteamento a montante	Drenagem superficial composta principalmente por canaletas, descidas d’água e vertedouro.

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
3. Sistema de drenagem superficial									
Disciplinar as águas da chuva, direcionando-as para o exterior do maciço	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Surgimento de processos erosivos	4	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	8
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	8
3.1 Vertedouro									
Impedir a passagem da água sobre a barragem	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	20

Figura 13– Aplicação da FMEA para o sistema de drenagem superficial.

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

4.4 FUNDAÇÃO

Para o subsistema “fundação”, a pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- A ocorrência de falha da fundação é considerada remota (nota 2), sendo relacionada apenas a aspectos construtivos ou de projeto. Deve-se considerar também que estruturas desse porte não são executadas em uma única fase, sendo que a própria estrutura serve de fundação para os alteamentos seguintes;
- Para o método de controle preventivo foi atribuída nota 1 (detecção quase certa), tendo em vista a qualidade prevista para elaboração projeto e da execução em campo. Para o controle do tipo detecção foi atribuída nota 3, devido à necessidade de instrumentos de monitoramento para identificação dessa falha, assumindo adequado projeto de instrumentação.

O Quadro 4 apresenta as principais características esperadas para o cenário da Barragem do Fundão e a Figura 14 apresenta as pontuações definidas de forma qualitativa.

Quadro 4 - Características adotadas para a fundação da Barragem do Fundão.

Cenário	Características Esperadas
Barragem de aterro hidráulico com alteamento a montante	A fundação em um alteamento é composta por rejeito ou rejeito compactado.

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNI
4. Fundação									
Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	2	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	4	80
Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Execução de poços de alívio	Prevenção	2	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	4	80

Figura 14 – Aplicação da FMEA para a fundação.

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

4.5 RESERVATÓRIO

A pontuação qualitativa do subsistema reservatório obedeceu aos seguintes critérios:

- O término da vida útil (incapacidade de conter rejeitos) não apresentaria impactos no empreendimento como um todo, uma vez que foi assumido a existência de controle e planejamento efetivo da mina, sendo atribuída nota 1 para a severidade;
- Para os relatos sobre trincas na barragem, o critério foi diferenciado para as estruturas no que diz respeito à nota atribuída ao índice de severidade. Para aspectos relacionados à inadequação construtiva e/ou de manutenção foi atribuída nota 4 (ocasional), tendo em vista as dificuldades de manutenção na prática da mineração;
- Assumindo como premissa a boa qualidade do projeto e construção, a prevenção e detecção desse modo de falha é quase certa (nota 1). Para o controle de detecção foi atribuída nota 3 (alto), assumindo-se um bom projeto de instrumentação.

O Quadro 5 apresenta as principais características e a Figura 15 apresenta as pontuações definidas de forma qualitativa.

Quadro 5– Características adotadas para o reservatório da Barragem do Fundão.

Cenário	Características Esperadas
Barragem de aterro hidráulico com alteamento a montante	Reservatório composto por rejeito total saturado e água

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
5. Reservatório									
Acumular rejeitos totais	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	Ineficiência do reservatório	5	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	20
Amortecimento de cheia	Não amortecer cheia	Instabilidade global	10	Inadequação de projeto ou construção	2	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60

Figura 15 – Aplicação da FMEA para o reservatório.

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

Nesse trabalho as análises foram realizadas através das observações levantadas na literatura técnica. É bem factível, entretanto, que outros engenheiros possam atribuir pontuações distintas para os sistemas avaliados, baseados inclusive em suas experiências. Contudo, nesse procurou padronizar o critério de pontuação da melhor forma possível para que não houvesse prejuízo na análise de determinada estrutura, se comparada às demais. A seguir encontra-se resumido o critério de pontuação para cada índice.

Foram critérios de pontuação para a severidade (S):

- Instabilidade global da pilha de rejeito filtrado: S = 9 (Filtro: Saúde e Segurança);
- Instabilidade global ou galgamento das barragens: S = 10 (Filtro: Saúde e Segurança);
- Instabilidade local: S = 7 (Filtro: Impactos legais);
- Surgimento de processos erosivos: S = 4 (Filtro: Impactos Financeiros);
- Impacto ambiental: S = 9 (Filtro: Impactos Ambientais);
- Término da vida útil: S = 1 (Não são esperados impactos).

Foram critérios de pontuação para a ocorrência (O):

- Inadequação construtiva e/ou de manutenção: O = 4 (ocasional, cerca de 0,1 % de eventos por ano);
- Inadequação de projeto e/ou construção: O = 2 (remoto, cerca de 0,01 % de eventos por ano), exceto para a barragem ciclizada: O = 3 (ocasional, cerca de 0,1 % de eventos por ano) devido ao rejeito depositado servir como fundação para os alteamentos;
- Eventos inesperados, que dependem das características dos materiais e dados hidrológicos: O = 2 (remoto, cerca de 0,01 % de eventos por ano).

Foram critérios de pontuação para a detecção (D):

- Ajustes de projeto, construção e/ou operação: D = 1 (detecção quase certa);
- Inspeção visual e monitoramento: D = 3 (detecção alta), exceto para constatação de *piping* com D = 6 (detecção baixa).

O próximo passo é definir a classificação do risco. Conforme já mencionado, para que fosse possível a classificação em termos de risco foram utilizadas duas formas distintas: obtenção do RPN e obtenção da matriz de risco. Para o método baseado no RPN, que leva em conta as categorias ocorrência, severidade e detecção, quanto maior o valor de RPN maior é o risco para determinado modo de falha.

Na análise do sistema da barragem de rejeitos do fundão obteve-se resultados na faixa de variação para os valores RPN entre 4 a 140. Espósito e Palmier (2013) propuseram um critério com base nos valores RPN, ou seja:

- RPN < 50 Risco Aceitável ;
- 50 < RPN <120 Risco tolerável ;
- RPN ≥ 120 Risco Intolerável.

A Figura 16 mostra os locais no sistema estudado da barragem de rejeitos do Fundão onde os valores de RPN foram considerados críticos.

Função	Falha	Efeito Final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de Controle	Di	RPNi
1. Corpo da barragem									
Redução da condutividade de hidráulica	Redução de percolação	Liquefação	10	Dissolução de materiais	3	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	7	210
Conter os rejeitos	Liquefação	Rompimento da crista da barragem	10	Inadequação do Projeto / construção	2	Adequação de Projeto Inspeção Visual e Instrumentação	Prevenção Detecção	7	140
2. Sistema de drenagem interna									
Drenar e filtrar a água (fundação e da chuva).	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
Interceptar, drenar e filtrar a água do reservatório.	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	7	140
Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro septo.	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	7	140
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120

Figura 16 – Sistemas críticos da Barragem de Rejeitos do Fundão onde os valores de RPN foram maiores do que 120 (Risco Intolerável).

Fonte: adaptada de Santos et al. 2012

O segundo método adotado nesse trabalho consiste na obtenção da matriz de risco, que leva em conta os índices de severidade e ocorrência. A matriz obtida para o cenário estudado está apresentada na Figura 17 e o modo de falha na Tabela 1. Para cada modo de falha foi selecionada a pior pontuação possível.

Tabela 5 - Modos de falha da Barragem de Rejeitos do Fundão.

ID	Modo de Falha	Sev.	Ocor.
B1	Capacidade insuficiente de conter o rejeito antes do previsto	1	4
B2	Excesso de deformação	10	4
B3	Perda de estabilidade mecânica	10	4
B4	Localização de bermas ineficiente	4	4
B5	Aumento das poropressões no maciço	10	2
B6	ocorrência de erosão	7	2
B7	Chuva inesperada	10	2
B8	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	10	2
B9	Perda de estabilidade mecânica da fundação	10	2
B10	Gerar subpressões elevadas na fundação	10	2
B11	Não amortecer cheia	10	2

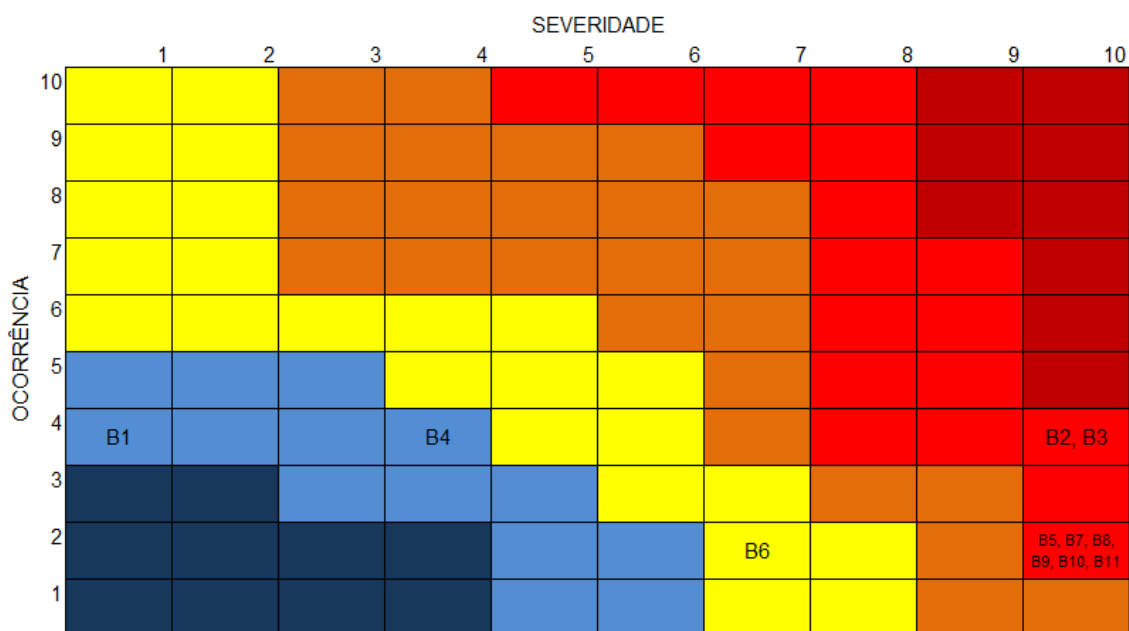


Figura 17 – Resultado da matriz de risco obtida com a aplicação da FMEA.

O segundo método adotado nesse trabalho consiste na obtenção da matriz de risco, que leva em conta os índices de severidade e ocorrência. A matriz obtida para o cenário estudado está apresentada.

4.6 OS DETERMINANTES E AS CAUSAS DA TRAGÉDIA

O caminho para se obter a determinação e causalidade do acidente ocupa essencial espaço teórico-metodológico, sem perspectivas de ser consensual e conclusivo; e em vários outros campos de conhecimento e disciplinas científicas. Optou-se por citar dois modelos de investigação: o modelo linear causal e o modelo explicativo complexo.

O modelo linear causal centra-se na resposta da previsibilidade, apresentando uma distribuição contínua até falha (rompimento), observando todos os aspectos que levaram ao acidente, de forma linear, ao longo do tempo. O modelo explicativo complexo ultrapassa a noção de precisão do objeto, determinado por processos causais analisáveis mediante métodos com a ação de afirmar antecipadamente o que poderá ocorrer num momento futuro; atua na perspectiva da análise histórica do acidente, sendo a diversidade de elementos, hierarquização, descontinuidade, emergência, catástrofes.

A compreensão da causalidade de um evento, através de ferramentas de análise de risco com FMEA ou árvore de falhas, pode abrir a perspectiva para proposta e a execução de intervenções corretivas e preventivas de futuros acidentes similares. A investigação deste acidente adquire complexidade maior ainda, uma vez que se trata de um acontecimento sem precedentes que mudança na perspectiva do índice de severidade. Nos primeiros instantes da tragédia, foi feita pela mídia, a leitura de severidade apenas no local do rompimento, como mostrado na Figura 18.

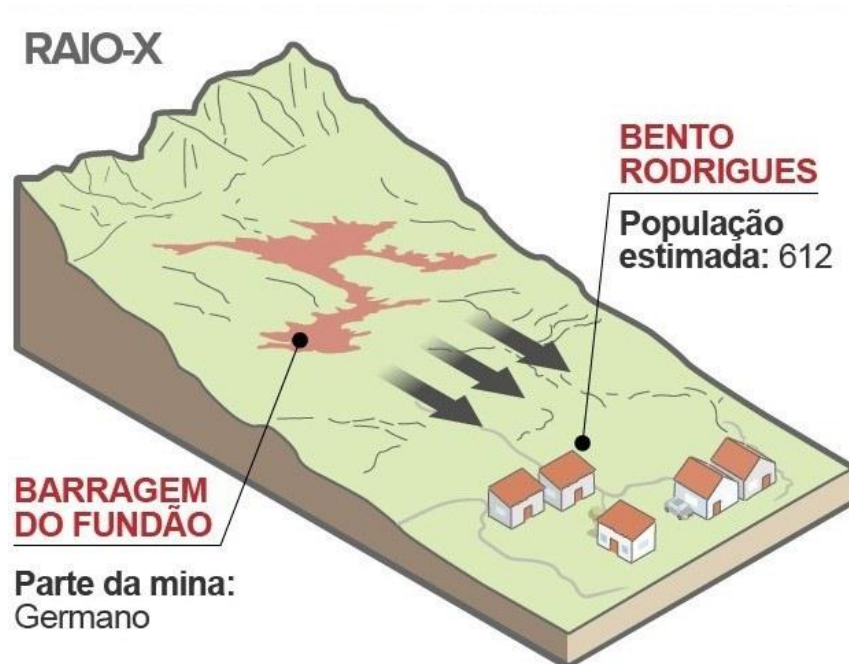


Figura 18 - Infográfico feito pela mídia no momento da tragédia.

Fonte: Jornal Globo (2015).

Passado 24 horas do acidente, o Serviço Geológico do Brasil, apresentou o mapa da tragédia, com o percurso do rejeito da Barragem do Fundão. Nessa nova divulgação do acidente, a percepção da severidade do ocorrido alcançou níveis de grandes proporções, apresentando um discurso de danos irreparáveis ao meio ambiente e a comunidade local, como apresentado na Figura 19.

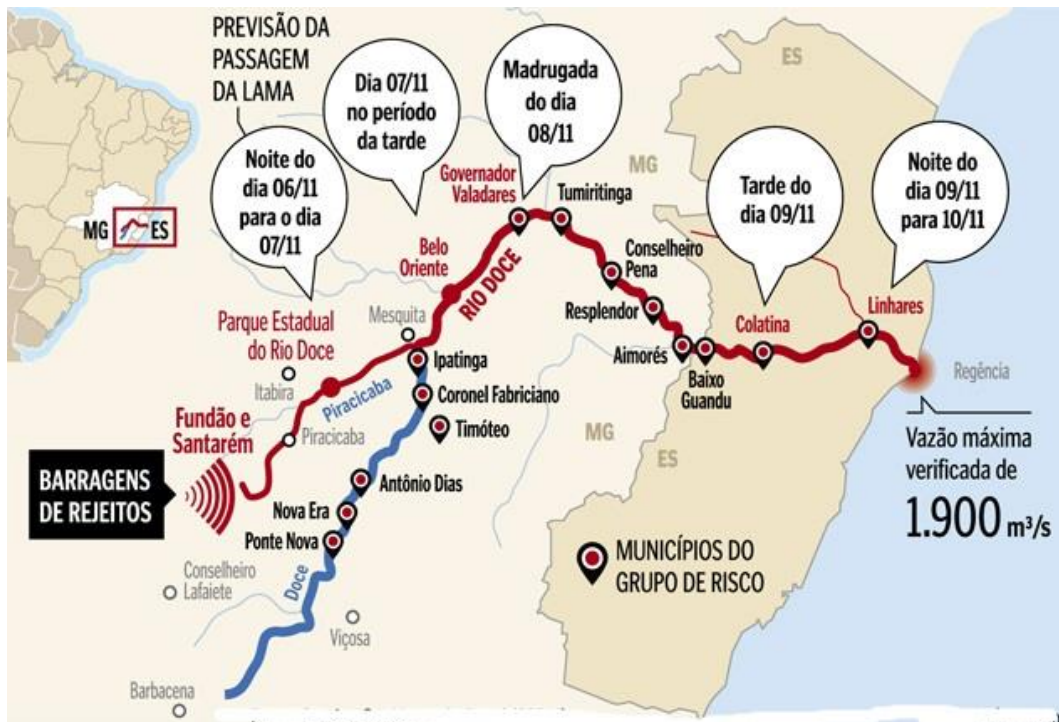


Figura 19 - Mapa de alcance do rejeito da Barragem do Fundão.

Fonte: Jornal Globo (2015).

Sabe-se que todo evento trágico tem sua história, ainda que sejam diversas as causas diretas desses acidentes, envolvendo não apenas questões técnicas e humanas, mas também de igual importância os aspectos organizacionais. O fato de que não haja um acidente grave, e que as boas performances no dia a dia, podem mascarar condições latentes existentes. A Figura 20 mostra a cena do satélite do distrito de Bento Rodrigues, antes do rompimento da BRF.



Figura 20- Distrito de Bento Rodrigues antes da ruptura da barragem.

Fonte: Jornal Globo (2015)

A construção da Barragem de Rejeitos do Fundão iniciou-se em 2007, entrando em operação em dezembro de 2008, quando recebeu os primeiros rejeitos de minério de ferro. Seu rompimento, de acordo com o laudo pericial da Polícia Civil de Minas Gerais, teve como causa principal liquefação dos rejeitos arenosos que sustentavam os alteamentos (elevações) da barragem. O fenômeno da liquefação consiste em um processo no qual o sedimento sólido tem repentina redução na resistência ao cisalhamento, pelo acréscimo da pressão intersticial e passa a comportar-se como se fosse líquido. A Figura 21 mostra a cena do satélite do distrito de Bento Rodrigues, depois do rompimento da BRF.



Figura 21 - Distrito de Bento Rodrigues depois da ruptura da barragem.

Fonte: G1 (2015).

Como os resultados apresentados neste capítulo, deve-se lembrar da importância que todas essas etapas do gerenciamento de segurança de barragens sejam acompanhadas por equipes multidisciplinares compostas por profissionais devidamente habilitados e capacitados.

Na Figura 22 é apresentada uma relação entre riscos de acidente imposto por uma barragem de rejeitos, aonde o valor econômico do empreendimento e os investimentos realizados nas fases de projeto e construção, conclui-se que o risco diminui à medida que os gastos em projeto, construção e detecção aumentam, até um determinado ponto onde o valor do risco torna-se aceitável. O ponto aonde o risco se torna aceitável, pode ser considerado a condição ótima em relação aos gastos financeiros nas etapas de projeto e construção, sendo que o risco remanescente é controlado por meio da identificação das falhas, através da detecção (inspeções de campo / análise de instrumentação), adotando ações de resposta em situações críticas.

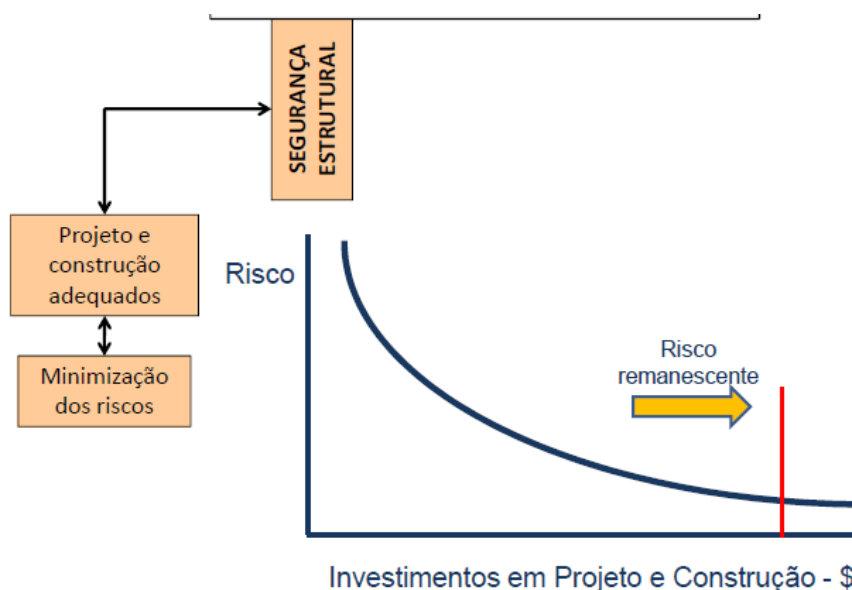


Figura 22 - Relação entre risco e investimentos em projeto e construção.

Fonte: Fusaro (2012).

4.6.1 Comparação com os dados levantados (FMEA) e sua relação com o acidente

Após a pesquisa de todos os aspectos fornecidos pela revisão da literatura, pode-se considerar que a evolução das características e de mudanças de projeto e funcionamento, fez com que a Barragem de Fundão fosse extraordinariamente complexa, refletindo no grande número de potenciais modos de falha que, por sua vez, tornam obrigatório um processo estruturado para a sua avaliação.

Uma grande quantidade de dados utilizados no uso FMEA é descrito em um sistema de análise de riscos. A preparação de uma tabela de "frases chaves" - contendo descrições de componentes comumente usados sem barragens de aterro, os modos de falha, as causas, os efeitos e medidas de ação, torna possível para acelerar a aplicação FMEA. Estas "listas de verificação" podem ser personalizadas, revisada e atualizada para se adequar requisitos particulares de outros sistemas de barragens.

A apresentação neste capítulo dos resultados do uso da ferramenta FMEA, detalha como foi implementada a abordagem para formulação de sistemas, como foi calculado os valores do RNP de cada sistema da barragem, além da apresentação da Figura 16, onde são mostrados os locais no sistema

no qual os valores de RPN foram considerados críticos e na Figura 17, onde é apresentada a matriz de análise de risco obtida com a aplicação da FMEA.

Inicialmente, foram considerados os seguintes potenciais modos de falha:

- Redução da percolação por saturação hidráulica;
- Erosão interna por dificuldade de drenagem;
- Escorregamento na fundação ou aterro do dique de partida por recuo do alinhamento;
- Liquefação.

Todos, exceto liquefação, foram descartados como sendo inconsistentes com as evidências físicas e/ou relatos de testemunhas oculares.

De acordo com o Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da BRF, grupo de investigação sobre a ruptura da BRF contratada pela BHP Billiton Brasil Ltda., Vale S.A. e Samarco Mineração S.A, e auditada pela empresa Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP (CGSH), o principal evento causador da falha é a ruptura por fluxo de liquefação estática, causada um conjunto de eventos apresentados abaixo.

- Saturação da areia;
- Expansão da praia e deposição de lamas;
- Recuo de alinhamento;
- Aumento da altura do recuo, devido a atraso.

Este comitê apresentou a árvore de falhas para o desencadeamento da liquefação apresentada na Figura 23.

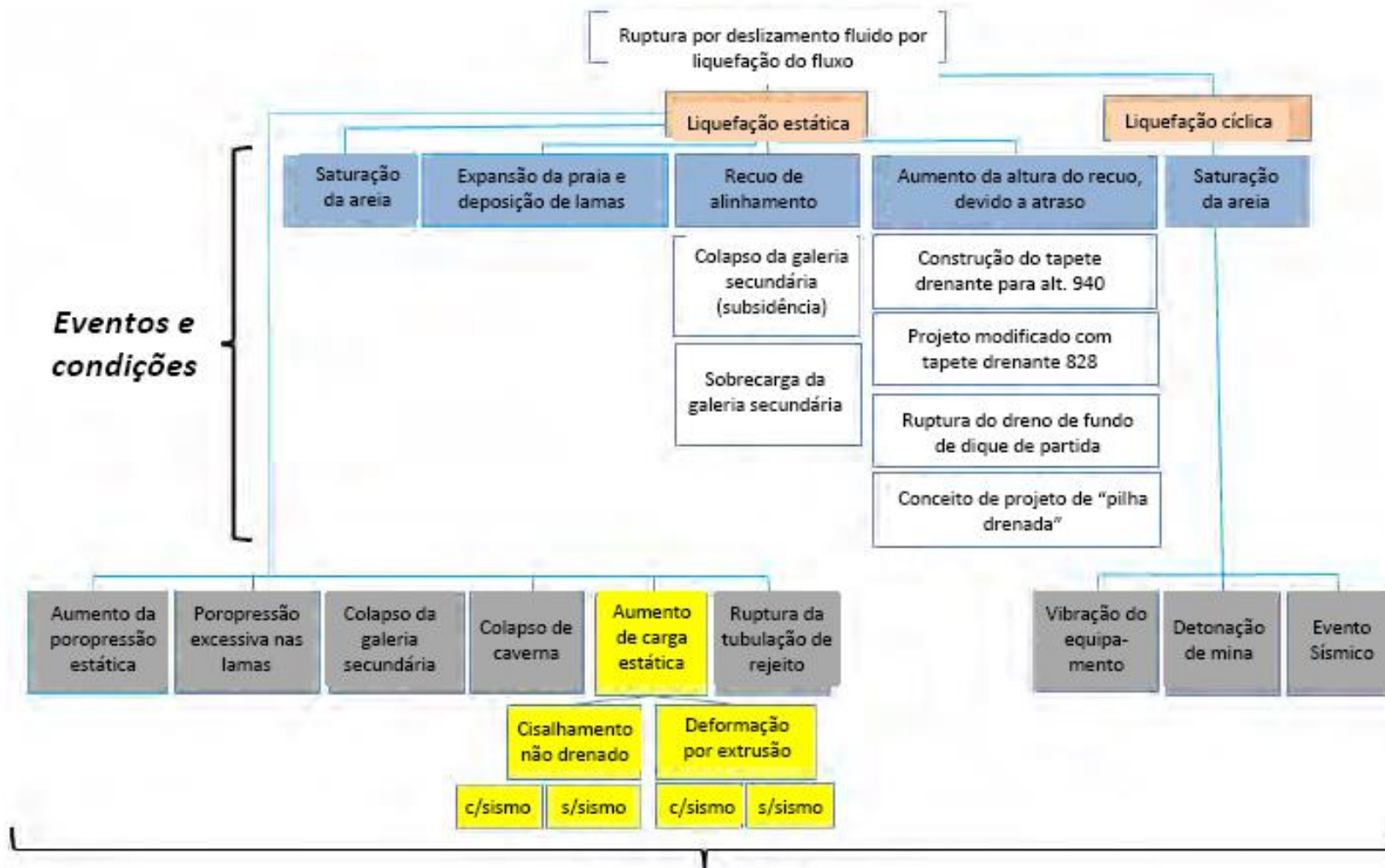


Figura 23- Árvore de falhas para o desencadeamento da liquefação.

Fonte: Morgenstern et al (2016).

É importante observar na Figura 23 os eventos e condições antecedentes destacados em azul que permitiram que houvesse a liquefação estática na ombreira esquerda da barragem. Os eventos antecedentes foram:

- Saturação da areia;
- Invasão da água que permitiu que a lama se depositasse na praia de rejeitos;
- Recuo do alinhamento;
- Aumento da altura do recuo, resultante do alteamento contínuo da barragem.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES COMPLEMENTARES

5.1 CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica considerada nesta dissertação, com relação à disposição de rejeitos, conclui-se que se tem praticado quase que de forma generalizada, a disposição de rejeitos de minério ferro, por meio de aterro hidráulico com alteamento a montante. Sabe-se que este método de alteamento apresenta vantagens pela a simplicidade e o baixo custo de construção, porém está associado à maioria das rupturas em barragens de rejeitos nos acidentes já ocorridos pelo mundo.

Observou-se também na revisão de literatura que os aspectos relacionados com a ocorrência de liquefação em barragens de rejeitos, indica a importância do tema abordado, tendo em vista a necessidade ambiental de se dispor de um sistema adequado de armazenamento de rejeitos de mineração.

Métodos de Análise de Riscos estão sendo recentemente aplicados a barragens de contenção de rejeitos. No entanto, há ainda uma falta de "valores-limite" de risco para subsidiar a análise geral.

De uma maneira geral, a utilização da ferramenta FMEA para análise de risco da Barragem de Rejeitos do Fundão (BRF) possibilitou identificar e ordenar os principais problemas por perda de funcionalidade de suas estruturas e o rompimento da barragem.

Embora as análises tenham uma natureza subjetiva, a adoção do método RPN (*Risk Priority Number*), como ferramenta para calibração da matriz de riscos, demonstrou ser bastante pertinente, uma vez que os resultados tenderam a ser consistentes destacando os subsistemas mais críticos. Entende-se então que, a partir dos valores dos elementos analisados, a estabilidade da BRF se encontraria sob um estado de alerta.

A implantação da metodologia FMEA possibilitou ainda a análise da maioria das possíveis formas de ruptura, coincidindo com as fontes de informações e recursos utilizados, conforme apresentado na revisão da literatura. Assim, a aplicação da metodologia mostrou-se ser uma importante ferramenta na gestão das demais barragens de contenção de rejeitos,

identificando as deficiências do sistema e as medidas de redução ou mitigação dos riscos associados.

Para se fazer uma discussão sobre o acidente da BRF, debruçando-se sobre os pontos críticos, obtidos com a ferramenta FMEA, conclui-se que para o êxito de uma estrutura tão complexa quanto uma barragem de rejeitos de minério, que envolve diversas incertezas, se faz necessária a elaboração de um bom projeto, que tenha uma relação custo/benefício aceitável quando avaliadas todas as variáveis envolvidas, tanto sociais, como ambientais e econômicas. É muito importante assegurar condições adequadas de construção, análise de comportamento, operação e manutenção, mantendo a eficiência da operação da barragem, as suas condições de segurança e mantendo os riscos em valores aceitáveis para a população exposta, não só a população de Bento Rodrigues, como todo vale do Rio Doce.

É importante também que todas essas etapas do gerenciamento de segurança de barragens sejam acompanhadas por equipes multidisciplinares compostas por profissionais devidamente habilitados e capacitados.

Em termos específicos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas em função dos resultados obtidos na abordagem da técnica ao caso real estudado:

- A utilização da metodologia do FMEA para implantação da gestão de riscos mostrou-se ser uma ferramenta bastante eficiente, fácil e rápida aplicação, devido à subjetividade e grande liberdade de atribuição de valores às classes de probabilidades e consequências;
- A matriz de análise de risco criada com o uso avaliação da falha da Barragem de Rejeitos do Fundão constitui também uma ferramenta de análise de grande apoio às fases de controle e de redução de riscos, em outras barragens de minério, por ser baseada em operadores simples, que explicitam, de forma ordenada, os pontos mais críticos e que merecem maior atenção quando da operação e manutenção da barragem;
- Os efeitos que apresentam maior risco de ruptura da barragem (classificados com cores quentes na matriz de riscos), que devem ser considerados assim que identificados, são aqueles que estão relacionados aos eventos antecedentes de saturação da areia,

invasão da água que permitiu que a lama se depositasse na praia de rejeitos, recuo do alinhamento;

- Aumento da altura do recuo, resultante do alteamento contínuo da barragem.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como o comportamento das barragens hidráulicas alteadas a montante apresenta com rejeitos de mineração é um assunto complexo e que envolve questões de segurança, para o melhor entendimento destas estruturas, sugere-se a realização das pesquisas abaixo. Para isso, são sugeridos os seguintes trabalhos e pesquisas futuras:

- Ampliar a discussão sobre o modo da falha na forma de liquefação ocorrido em outras barragens de rejeitos de minério, realizando estudos comparativos com o acidente da BRF;
- Avaliar os mecanismos desencadeadores da liquefação, adotando novamente a mesma formulação de hipóteses de processo de triagem;
- Realizar análise de riscos no caso estudado, considerando a criticidade, utilizando o método Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e criticidades – FMECA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBADE, P.U.B., VILLAR, L.F.S., E PEREIRA, G.A. (2010). **Caracterização geotécnica e parâmetros mecânicos e hidráulicos de um rejeito de minério de ferro**. UFMG Conhecimento e Cultura, 2010.

ABNT. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBRNM 67, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 8p., 1998.

ABNT. **Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. NBR 13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 6 p.,2006.

ABNT. **Resíduos sólidos – Classificação**. NBR 10004, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 71 p., 2004.

ALMEIDA FILHO, N. **Epidemiologia e modelos de complexidade: perspectivas metodológicas**. In: Almeida Filho N, Barreto ML, organizadores. *Epidemiologia & saúde*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2011. p. 291-306.

ALMEIDA FRANCO, Carlos Sergio Souza Pinto. **Segurança de Barragens – Aspectos Regulatórios**, Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Goiânia, 134 p.,2008.

ALMEIDA, A. B. de. **Segurança e Risco nos Vales a Jusante de Barragens**, IV Congresso da Água, Lisboa, 23-27 de Março de 1998.

ALMEIDA, B. A. **Gestão Integrada do Risco nos Vales a Jusante de Barragens – um projecto NATO realizado em Portugal**. 1º Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português - ABES, Rio de Janeiro. Março/2000.

ALMEIDA, A. B. et al. **Dam-Valley Risk Management. First Results of a Case Study in Portugal**. Arade Valley. Proceedings 20º ICOLD Congress, Beijing, China. 2000.

ALVES, A.R.C.. **Disposição compartilhada de rejeito e estéril gerados no Processo de extração de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 183 p.,2009.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 136 p.,2006.

AVILA, P.(2008).**Relatório da auditoria Sarbox - de todas as barragens da VALE**. VALE, 2008.

BAPTISTA, M.L.P.. **Abordagens de risco em barragens de aterro**. Tese de Doutorado.Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. 534p.,2008.

BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. Tese de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 150 p., 2008.

BISCO, A.P.R. **A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais**. Tese de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 87 p.,2009.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 21 de setembro de 2010, pt1., 2010.

Brasil. Ministério do Trabalho. Superintendência Regional do Trabalho e Emprego de Minas Gerais. **Relatório de análise de acidente: rompimento da barragem de rejeitos Fundão em Mariana (MG)**, Belo Horizonte. Belo Horizonte: SRTE-MG; 2016. 138 p.

BSI. **Reliability of System Equipment and Components. Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)**. BS 5760-5, 1991.

CALDEIRA, L.. **Análise de Riscos em Geotecnia**. Aplicação a Barragens de Aterro. Programa de Investigação para Obtenção de Habilitação para Funções de Coordenação Científica, LNEC, Lisboa, p. 1-248,2005.

CALDEIRA, L.; PIMENTA, L.; SILVA GOMES, A. **Enquadramento das Análises de Riscos e sua Aplicação a Barragens de Aterro**. Seminário de Barragens Tecnologia, Segurança e Interação com a Sociedade, v. 4, p. 569-685, 2006.

CALDWELL, J.A. E ZYL, D.V. (2011). **Thirty years of tailings history from tailings & mine waste**.Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC. 13 p.CBDB. Barragens de rejeito no Brasil. Comitê Brasileiro de Barragens. 308 p., 2012.

COLLE, G.A. **Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. 104 p., 2008.

CRISTO, S. S. V. **Análise da Susceptibilidade a Riscos Naturais Relacionados às Enchentes e Deslizamentos do Setor Leste da Bacia Hidrográfica do Rio Itacorubi, Florianópolis**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Florianópolis. 2002.

DE CASTRO LACAZ, F. A.; DE SOUSA PORTO, M. F.; PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 42, p. 1-12, 2017.

CVRD. **Estudo do Potencial de Ruptura dos Taludes da Ferrovia Vitória a Minas Aplicando a Metodologia FMECA**. Gerencia Geral de Engenharia da Via Permanente, Companhia Vale do Rio Doce, Vitória, ES. 2005.

DUARTE, A.P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós - graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos,UFGM, Belo Horizonte, MG. 114 p., 2008.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Belo Horizonte: UFGM Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.2008.

ESPÓSITO, T. E.; CALDEIRA, L. **Gestão da segurança de uma pilha drenada de rejeitos de minério de ferro:a aplicação das análises FMEA/FMECA**. Anais do COBRAMSEG 2010. Gramado, Brasil. 8 p.,2010.

ESPÓSITO, T.J. **Controle geotécnico da construção da barragem de rejeito – Análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia,Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p., 1995.

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

FIGUEIREDO, M.M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 100 p.,2007.

FONSECA, M. N. E.; ÁVILA FILHO, S. **Assessment of an accident using FMEA to a tailings dam, a mining event in Brazil Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice**, p. 223-227, 2017.

FRANCO, C.S.S.P.A. **Segurança de barragens: aspectos regulatórios**. Dissertação de Mestrado.Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil. 134 p.,2008.

FUSARO, T.C. **Segurança de Barragens**. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Complementariedade entre o monitoramento e análises de risco na gestão da segurança de barragens. 2015.

GOMES, R.C., PEREIRA, E.L. **Avaliação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração**. III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, SBMR, São Paulo, SP, 91-101 p., 2002.

GOMES, R. C. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 220 p, 2009.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 129 p. 2011.

HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. **Risk and uncertainty in dam safety – CEA Technologies Dam Safety Interest Group**. ISBN 0 7277 3270 6, Londres, Inglaterra: Thomas Telford Publishing. 391 p. 2004.

HERNANDEZ, H.M.O. **Ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH) para a caracterização de rejeitos utilizados em barragens de aterro hidráulico**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 186 p., 2007.

ICOLD. **ICOLD Guidelines on Risk Assessment for Dams**. International Committee on Dam Safety, Chairman's 1997/98 Progress Report for New Delhi Meeting. 1998.

ICOLD. **Tailings dams. Risk of dangerous occurrences**. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. 144 p., 2008.

Jornal Globo (G1) Minas Gerais. **Imagens mostram antes e depois de área das barragens em Mariana**. Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/imagens-mostram-antes-e-depois-de-area-das-barragens-em-mariana.html>, acessado em 21 Nov 2017

KOSSOFF, D. et al. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014.

LARA, J .L. E.; LEÓN, E. **Design and operational experience of the Cerro Lindo filtered tailings deposit**. Paste 2011. Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. 25-38 p. 2011.

LIMA, L.M.K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 125 p. 2006.

LLORY, M.; MONTMAYEUL, R. **O acidente e a organização**. Belo Horizonte: Fabrefactum; 2014.

MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de

Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 155 p.2007.

MAPA, P.S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.172 p. 2006.

MENDES, M.B. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 189 p.,2008.

MILONAS, J.G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 146 p. 2006.

Minas Gerais. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. **Relatório: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. Belo Horizonte: Sedru; 2016. 289 p.

MINERAL, Sumário. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) 2015. Brasília/DF-Brasil. Disponível em:< <http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em, novembro, 2017.

MORGENSTERN, N. R; VICK, S. G; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão**, Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da BRF, 2016.

NEVES, E. M. **Breves Considerações Sobre Análises de Risco de Obras Geotécnicas em Portugal**. 8º Congresso Nacional de Geotecnia – A Geotecnia Portuguesa e os Desafios do Futuro, Volume 4. 2002.

OLIVEIRA, J.B.V.R. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens**. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 149 p.,2010.

ESPÓSITO, T.; PALMIER L. R. **Application of risk analysis methods on tailings dams. Soils and Rocks**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 97-117, jan-abr. 2013.

PEREIRA, E.L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. Ouro Preto: UFOP, 2005. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PERINI, D.S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 128p.,2009.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análises de risco**. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2010.

PIMENTA DE ÁVILA, J. 2011. The Drained Stacking of Granular Tailings: A Disposal Method for a Low Degree of Saturation of the Tailings Mass. in: **Proceedings of the Tailings and Mine Waste Conference**, Vancouver, BC, November 6 to 9 2011. Vancouver: University of British Columbia.

PIMENTA, L. et al. **2º Relatório de Progresso do Grupo de Trabalho de Análise de Risco em Barragens**. Comissão Nacional Portuguesa da Grandes Barragens, Lisboa. 2006.

PIMENTA, L. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**, Tese de doutoramento, IST, Lisboa, 1- 534, 2008.

PNDC, (2000). **Plano Nacional de Defesa Civil**. Ministério do Planejamento. Secretaria de Defesa Civil, 2000. Brasília.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação de Mestrado em Geotécnica e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais, 154 p., 2013.

Revista Proteção. Polícia Civil conclui 1º inquérito do rompimento de barragem. 2016 fev 25. [Acessado em: 2017nov3]. Disponível em: http://www.protecao.com.br/noticias/legal/policia_civil_conclui_1%C3%82%C2%BA_inquerito_do_rompimento_de_barragem/AnjyAQjb/9579

RUSSO, F.M. **Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 295p., 2007.

SAE International. **Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)**. Automotive Quality And Process Improvement Committee. 2002. http://www.sae.org/technical/standards/J1739_200208 (Acessado em 10/03/2018)

SANTOS, R. N. C. **Enquadramento das Análises de Risco em Geotecnia**. Lisboa. LNEC, 2007. Dissertação (Mestrado), Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2007.

SANTOS, Ricardo Neves Correia Dos; CALDEIRA, Laura Maria Mello Saraiva; SERRA, João Paulo Bilé. **FMEA of a tailings dam**. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, v. 6, n. 2, p. 89-104, 2012.

SILVA, S. R. C. et al. **Metodologia FMEA e sua Aplicação à Construção de Edifícios. Seminário de Qualidade na Concepção, Execução e Utilização de Empreendimentos.** LNEC, Lisboa. 2006.

SILVA, J. P. G. F. A. **Gestão de riscos aplicada a uma infraestrutura de armazenamento de resíduos mineiros.** Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

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

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros fração sinter feed..** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geociências)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 419p. 2004.

TOLEDO, J. C. e AMARAL, D. C. **Análise do Tipo e Efeito de Falha. GEPEQ: Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade.** Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. 2005.

Vick, S.G. **Planning, design, and analysis of tailing dams.** John Wiley & Sons, New York, USA. 369 p. 1983.

VICK, S. G. **Dam Safety Risk - From Deviance to Diligence.** In: Geo-Risk, p. 19-30, 2017.

WANG, S. et al. Potential Risk Analysis of Tailings Dam under Preloading Condition and Its Countermeasures. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 47, n. 1, p. 46-56, 2015.

WOLFF, A.P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de mina da Vale.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mineral. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 90 p., 2009.

ANEXO

Planilha de preenchimento da ferramenta FMEA

Análise do Tipo e Efeito de Falha																
Cod_pec : Nome da Peça: Data: Folha No. _____ de _____											<input type="checkbox"/> FMEA de Processo <input type="checkbox"/> FMEA de Produto					
Descrição do Produto/ Processo	Função(ões) do produto	Tipo de Falha Potencial	Efeito de Falha Potencial	Causa da Falha em Potencial	Controles Atuais	Índices				Ações de Melhoria						
						S	O	D	R	Ações Recomendadas	Responsável/ Prazo	Medidas Implantadas	Índices Atuais			
													S	O	D	R

S = Severidade O = Ocorrência D = Detecção R = Riscos

