



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica & Escola de Química  
Programa de Engenharia Ambiental

André Pereira Batista

ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE  
FERRO

Rio de Janeiro  
2020



André Pereira Batista

ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE  
FERRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadores:

D.Sc. Cláudia do Rosário Vaz Morgado

D.Sc. Marco Antonio da Silva Braga

D.Sc. Victor Paulo Peçanha Esteves

Rio de Janeiro  
2020

André Pereira Batista / Análise de risco de ruptura de barragens de rejeitos de minério de Ferro – 2020.

126 f.: il. 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2020.

Orientador (es): Cláudia do Rosário Vaz Morgado, Marco Antonio da Silva Braga e Victor Paulo Peçanha Esteves.

1. Análise de risco. 2. Série de Risco. 3. Ruptura de Barragem de Rejeitos; 4. Mineração; 5. Barragem de Rejeitos; 6. Imagens de Satélite. I. Morgado, Cláudia; II Braga, Marco e Estevez, Victor II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Título.



## ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

André Pereira Batista

Orientadores: D.Sc. Cláudia do Rosário Vaz Morgado  
D.Sc. Marco Antonio da Silva Braga  
D.Sc. Victor Paulo Peçanha Esteves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela banca:

Cláudia do Rosário Vaz Morgado, D.Sc.– UFRJ

Marco Antonio da Silva Braga, D.Sc. – UFRJ

Victor Paulo Peçanha Esteves, D.Sc.– UFRJ

Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc. – PEC/COPPE/UFRJ

Graziella Maria Faquim Jannuzzi, D.Sc. – PEC/COPPE/UFRJ

Daniele Mesquita Bordalo da Costa, D.Sc. – Universidade do Porto

Rio de Janeiro  
2020

## **AGRADECIMENTOS**

A minha amada esposa, Liza, meu porto seguro, que sempre com amor e o carinho, me deu forças e me inspirou.

A minha família: meus pais, por todo o amor e por compreenderem a minha ausência nos encontros de família.

A professora e orientadora Cláudia do Rosário Vaz Morgado, por acreditar no meu potencial e ter me dado como desafio o tema desta dissertação.

Ao professor e orientador Victor Paulo Peçanha Esteves, por sua parceria acadêmica para construção deste trabalho e pela amizade.

Ao professor e orientador Marco Braga, pela parceria acadêmica para construção deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de profissão, que sempre que precisei de orientação foram solícitos e me ajudaram a ter um entendimento melhor de muitas questões feitas por mim a eles.

Aos professores do PEA pelo aprendizado obtido nas disciplinas cursadas.

Aos meus amigos.

## RESUMO

Batista, André Pereira. Título: ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO Rio de Janeiro, 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

A mineração é um dos principais setores da economia global, fornecendo matérias-primas para muitas atividades industriais. A indústria de mineração normalmente produz grandes quantidades de rejeitos, comumente armazenados em lagoas atrás de barragens, que têm um grande potencial de danos em caso de ruptura. De 1915 a 2019, ocorreram 356 acidentes. Em quase 4 anos, dois acidentes muito graves marcaram a atividade de mineração brasileira. O rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG se caracterizou como o de maior impacto ambiental da mineração (Garcia et. al., 2017), causando danos à bacia do rio Doce até a sua foz, incluindo regiões do oceano Atlântico. O rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG, apresentou o maior número de mortes, 306. Em ambos os acidentes, as barragens romperam-se devido ao efeito de liquefação. O objetivo deste trabalho é analisar as causas e consequências do rompimento de uma barragem de rejeito utilizando Série de Riscos e imagens de satélite. A Série de Riscos é uma ferramenta qualitativa que permite avaliar a sequência de eventos possíveis e, conseqüentemente, controlar os riscos por meio de medidas preventivas e mitigadoras. Através das análises de imagens de satélites foi possível avaliar os impactos ambientais e mapear as áreas impactadas. No acidente em Mariana, 2015, as imagens de satélites analisadas foram entre a barragem do Fundão e a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves. Além de ter afetado os rios Gualaxo do Norte e do Carmo, também impactou 920,17 ha de terras. Enquanto o acidente ocorrido em Brumadinho, 2019, resultou em uma área impactada de 279,47 ha. A Série de Risco se mostrou uma ferramenta adequada para identificar e analisar os diversos eventos que podem contribuir para que a barragem venha a romper, possibilitando a gestão dos riscos e estabelecendo as inibições para as causas e consequências. Conclui-se que o conhecimento das causas de rompimentos de barragens de rejeitos já existe há muito tempo, entretanto, devido à falta do emprego de análise de risco, às falhas organizacionais e nas etapas de monitoramento, as barragens caminham para a ruptura.

Palavras chaves: Análise de risco; Série de Risco; Ruptura de barragem de rejeitos; Mineração; Barragem de Rejeitos; Imagens de Satélite

## ABSTRACT

Batista, André Pereira. Title: ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO. Rio de Janeiro, 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Mining is one of the main sectors of the global economy, providing raw materials for many industrial activities. The mining industry normally produces large amounts of tailings, commonly stored in ponds behind dams, which have a high potential for damage in the event of a rupture. From 1915 to 2019, there were 356 accidents. In almost 4 years, two very serious accidents have marked the Brazilian mining activity. The disruption of the Fundão Dam in Mariana-MG was characterized as having the greatest environmental impact of mining (Garcia et. Al., 2017), causing damage to the Doce River basin up to its mouth, including regions of the Atlantic Ocean. The rupture of Dam I, of the Córrego do Feijão mine in Brumadinho-MG, had the highest number of deaths, 306. In both accidents, the dams broke due to the liquefaction effect. The objective of this work is to analyze the causes and consequences of the rupture of a tailings dam using Series of Risks and satellite images. The Risk Series is a qualitative tool that allows assessing the sequence of possible events and, consequently, controlling risks through preventive and mitigating measures. Through the analysis of satellite images it was possible to assess the environmental impacts and map the impacted areas. In the accident in Mariana, 2015, the satellite images analyzed were between the Fundão dam and the Risoleta Neves Hydroelectric Plant. In addition to affecting the Gualaxo do Norte and Carmo rivers, it also impacted 920.17 ha of land. While the accident in Brumadinho, 2019, resulted in an impacted area of 279.47 ha. The Risk Series proved to be an adequate tool to identify and analyze the various events that can contribute to the dam's rupture, enabling risk management and establishing inhibitions for the causes and consequences. It is concluded that the knowledge of the causes of tailings dam ruptures has existed for a long time, however, due to the lack of use of risk analysis, organizational failures and in the monitoring stages, the dams are heading for rupture.

Keywords: Risk analysis; Risk Series; Rupture of tailings dam; Mining; Tailings Dam; Satellite Images.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	17
2.1 BARRAGEM DE REJEITOS.....	17
2.1.1 Método a Montante .....	17
2.1.2 Método Centro de Linha .....	18
2.1.3 Método a Jusante .....	19
2.2 HISTÓRICO DE ACIDENTES .....	19
3. GERENCIAMENTO DE RISCO.....	29
3.1 ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E EFEITOS (AMFE).....	30
3.2 ÁRVORE DE FALHAS (AF) .....	35
3.3 <i>BOW TIE</i> .....	40
3.4 ÁRVORE DE EVENTOS .....	44
3.5 SÉRIE DE RISCO.....	46
4. METODOLOGIA.....	50
5. RESULTADOS .....	53
5.1. SÉRIE DE RISCO.....	53
5.2 INIBIÇÕES.....	82
6. CONCLUSÃO.....	92
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>95</b>
APÊNDICE 1 – Série de Risco do rompimento de uma barragem de rejeito por liquefação .....	101
ANEXO 1 – Série histórica de acidentes de Barragens de Rejeitos 1915 a 2019.....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Método a montante.....	18
Figura 2: Método Centro de Linha.....	18
Figura 3: Método Jusante .....	19
Figura 4: Tendência da Severidade dos acidentes de barragens de rejeito no mundo entre 1915 – 2019 .....	21
Figura 5: Ruptura de barragens de rejeito ao redor do mundo entre 1915 e 2019.....	22
Figura 6: Distribuição dos acidentes com barragem de rejeitos por tipo de barragem. ....	23
Figura 7: Distribuição dos acidentes de acordo com as falhas. ....	23
Figura 8: Valor da ação da Vale, valor do minério de ferro e o dólar comercial de 01/01/2015 a 10/10/2019.....	27
Figura 9: Metodologia da AMFE .....	31
Figura 10: Metodologia AMFE - Aspecto funcional vs. Aspecto estrutural.....	32
Figura 11: AMFE da ruptura da Barragem do Fundão.....	33
Figura 12: Exemplo de Árvore de Falhas .....	36
Figura 13: Símbolos para eventos básicos, condições e transferência da Árvore de Falhas.....	37
Figura 14: Símbolos para as conexões .....	38
Figura 15: Árvore de Falhas do rompimento de barragem devido ao overtopping.....	39
Figura 16: Elementos do diagrama de Bow tie .....	41
Figura 17: Resultados e controles críticos para mitigar uma falha na barragem de rejeitos, com exemplos de elementos funcionais de controle críticos.....	43
Figura 18: Conceito da Árvore de Eventos. ....	44
Figura 19: Desenvolvimento do diagrama.....	45
Figura 20: Sequência direta .....	47
Figura 21: Diversos fatos conectados por uma conexão E/OU que tem como consequência o Fato n 47	47
Figura 22: Consequências do Fato n conectadas por uma conexão E/OU.....	47
Figura 23: Esquema gráfico de uma série de riscos.....	48
Figura 24: Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos.....	54
Figura 25: Esquema 1 (Sh 1) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos. ....	55
Figura 26: Esquema 3 (Sh 3) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos. ....	57
Figura 27: Candle de alta e de baixa .....	59
Figura 28: Ações VALE3 negociadas na escala de tempo diário na época do acidente da Barragem IV em 2019.....	59
Figura 29: Ações VALE3 negociadas na escala de tempo semanal na época do acidente da Barragem I em 2019.....	60
Figura 30: Ações VALE3 negociadas na escala de tempo diário na época do acidente da Barragem do Fundão em 2015. ....	60
Figura 31: Ações da Vale em um período de 5 anos.....	62
Figura 32: Esquema 2 (Sh 2) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos. ....	62
Figura 33: Esquema 5 (Sh 5) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos. ....	64
Figura 34: Mostra o Distrito de Bento Rodrigues/MG, antes de ser tomada pela lama. A imagem é de 20/07/2015.....	65
Figura 35: Distrito de Bento Rodrigues/MG, completamente tomado pela lama. Imagem de 24/12/2015.....	65
Figura 36: Mostra a natureza se recuperando no local do Distrito Bento Rodrigues, imagem de 01/07/2019.....	66

Figura 37: Visão geral da Barragem do Fundão até a Hidrelétrica Risoleta Neves. ....	67
Figura 38: a) Mostra o complexo de barragens Fundão, Santarém e Germano; b) Mostra o primeiro rio impactado o Gualaxo do Norte.....	68
Figura 39: a, b e c) Mostram a o trajeto percorrido pelo rejeito nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Rio Doce.....	69
Figura 40: a, b e c) Mostram o percurso dos rejeitos no rio Doce até chegar no início da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves; d) Mostra a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves. ....	70
Figura 41: Mapa das áreas atingidas pela lama no acidente Barragem I em 2019: a) área impactada antes de atingir o rio Paraopeba; b) áreas naturais, agrícolas, pastagem e de influência urbana impactadas; c) destaque a área administrativa da Vale incluindo refeitório. ....	71
Figura 42: Impacto da lama em zonas ripárias .....	73
Figura 43: Mortandade de peixes .....	74
Figura 44: Monitoramento da Turbidez nos rios impactados, marcados pela linha vermelha, pelo acidente da Barragem do Fundão.....	75
Figura 45: Potenciais efeitos relacionados aos impactos e riscos causados pelo desastre. ....	77
Figura 47: Esquema 4 (Sh4) da Série de Risco de rompimento de barragem de rejeitos.....	78
Figura 48: Uma caracterização comum da conscientização da situação. O círculo maior representa a percepção ideal, enquanto o círculo menor representa a percepção real .....	80
Figura 49: Indicação dos locais onde as inibições serão aplicadas.....	83
Figura 50: Resultado em 2D dos dados obtidos por Rocha (2019).....	84
Figura 51: Resultado em 3D dos dados obtidos por Rocha (2019).....	85
Figura 52: Localização dos equipamentos e dos pontos de infiltração.....	86
Figura 53: Correlação das velocidades de onda sísmicas com os dias de chuva e o nível d'água na barragem. ....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: As 10 maiores barragens de rejeito do Brasil (Fonte: ANM, 2019).....	14
Tabela 2: Exemplos de barragens que romperam por liquefação.....	25
Tabela 3: Análise de Modos de Falhas e Efeitos da Barragem Cerro do Lobo (Santos et. al. 2011) continua.....	34
Tabela 4: Descrição dos eventos que levam ao rompimento da barragem por overtopping.....	39
Tabela 5: Comparativo entre os métodos.....	49
Tabela 6: Áreas afetadas pelo acidente em Mariana/MG.....	72
Tabela 7: Áreas afetadas pelo acidente em Brumadinho/MG.....	72
Tabela 8: O uso de dados baseados em satélite para monitorar barragens de rejeito (Lumbroso et. al., 2019) continua.....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF – Árvore de Falhas

AMFE – Análise de Modos de Falhas e Efeitos

ANA – Agência Nacional de Água

ANM – Agência Nacional de Mineração

CBDB - Comitê Brasileiro De Barragens

CGE-MG – Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

FOB – *Free on Board* (Livre a bordo – O valor FOB significa que o comprador assume os custos e riscos com o transporte da mercadoria assim que ela é colocada a bordo do meio de transporte a ser utilizado)

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD - *International Commission On Large Dams* (Comissão Internacional de Grandes Barragens)

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

MTPS – Ministério do Trabalho e da Previdência Social

Na – Sódio

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - Amônio

PIB – Produto Interno Bruto

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

UNEP – *United Nations Environmental Protection* (Proteção Ambiental das Nações Unidas)

USEPA – *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

USCOLD – *United States Commission On Large Dams* (Comissão de Grande Barragens dos Estados Unidos)

WISE - *World Information Service of Energy* (Serviço de Informação Mundial de Energia)

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria extrativa mineral desempenha uma função muito importante para a economia mundial, já que fornece matéria prima para diversos segmentos da indústria, tais como cerâmica, construção, cosméticos, eletrônicos, vidro, metal, tinta entre outros segmentos. Azapagic (2004) estimava que 250 a 300 milhões de pessoas dependiam direta ou indiretamente da mineração.

No Brasil, a indústria da mineração representa 1,4% de todo o PIB do país e emprega diretamente 195 mil trabalhadores. Em 2018 o volume exportado foi de mais de 409 milhões de toneladas de bens materiais. Desse volume, o ferro representou 68%, seguido pelo ouro e cobre, com 9% cada um, e em terceiro lugar, com 7% das exportações, o ferronióbio. Os demais minerais exportados foram bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimentos, caulim e outros. O resultado dessas exportações foi de US\$ FOB 29,9 bilhões (IBRAM, 2019).

Para conseguir comercializar os minérios, a indústria precisa beneficiar o minério extraído fazendo com que o produto comercializado possua uma pureza maior. A fase de beneficiamento, que consiste em processos hidrometalúrgicos (MMSD, 2002), gera o produto a ser comercializado e uma grande quantidade de rejeitos, que geralmente são armazenados atrás de barragens (Kossoff et al., 2014).

De acordo com Davies e Martin (2000, apud Davies, 2002), existiam no mundo, em 2002, mais de 3.500 barragens de rejeitos. No Brasil, em 2019, segundo o levantamento da Agência Nacional de Mineração existem 769 barragens de rejeitos (ANM, 2019).

Devido ao desenvolvimento econômico contínuo no mundo, há uma tendência de que esses tipos de estruturas aumentem de tamanho e número, com localizações cada vez mais próximas de centros populacionais e terras agrícolas (James et al., 2011).

Essa tendência é resultado de um *boom* sem precedentes na procura por recursos em todo o mundo. Devido à alta demanda e alto preço, as jazidas menos ricas se tornam economicamente viáveis (Borges e Hart, 2008). Essa alta no preço dos minérios e os avanços tecnológicos de produção mineral pode fazer que os rejeitos de antigas áreas de barragem possam ser minerados.

As barragens de rejeito são algumas das maiores estruturas artificiais feitas pelo homem (Davies, 2002). A Tabela 1 apresenta as 10 maiores barragens de rejeitos do Brasil, com grande capacidade de retenção de rejeitos.

Tabela 1: As 10 maiores barragens de rejeito do Brasil (Fonte: ANM, 2019).

Nome da Barragem	NOME DO EMPREENDEDOR	UF	MINÉRIO PRINCIPAL	ALTURA ATUAL (m)	VOLUME ATUAL (m3)
Barragem Santo Antônio	Kinross Brasil Mineração S A	MG	Minério de Ouro Primário	104,00	399.058.945,00
Pontal	Vale S A Filial: Vale Itabira	MG	Minério de Ferro	69,00	226.957.900,00
Barragem de Rejeitos do Córrego Baco Pari	Mineração Maracá Industria e Comercio Sa	GO	Minério de Cobre	47,00	179.363.962,00
Barragem BL-1	Mosaic Fertilizantes P&K S.A. Filial: Tapira	MG	Fosfato	91,00	170.000.000,00
Barragem Eustáquio	Kinross Brasil Mineração S A	MG	Minério de Ouro Primário	94,00	148.349.348,00
Itabiruçu	Vale S A Filial: Vale Itabira	MG	Minério de Ferro	71,00	130.751.697,30
Barragem de Germano	Samarco Mineração S A.	MG	Itabirito	163,00	129.590.000,00
Gelado	Vale S A Filial: Vale Carajas	PA	Minério de Ferro	34,00	110.469.304,67
BARRAGEM DO SOSSEGO	Vale S A Filial: Vale Mina Sossego	PA	Minério de Cobre	42,10	108.444.833,89
Maravilhas II	Vale S A Filial: Vale Itabiritos	MG	Minério de Ferro	97,92	94.590.445,00

Boger e Hart (2008) analisaram 8 métodos de gerenciamento dos rejeitos, classificando-os do menos sustentável até o mais sustentável. A ordem por eles colocada foi, ribeirinho, submarino, barragem convencional de rejeitos, descarga espessada central, empilhamento a seco, *paste backfill*, reutilização dos rejeitos e *dry backfill*. Sendo a barragem convencional de rejeitos o método normalmente mais adotado e como exposto no estudo dos autores, é o terceiro método menos sustentável no gerenciamento dos rejeitos. Estas barragens são construídas visando a diluição dos custos de disposição dos rejeitos através dos alteamentos sucessivos durante a sua vida útil (IBRAM, 2016). Estes alteamentos transformam o processo de construção em um sistema dinâmico e havendo uma falha de supervisão de sua estrutura isto pode resultar em um acidente de rompimento de barragem com grandes danos ambientais, sociais e econômicos (ICOLD, 2001; XIN et al., 2011).

Algumas características tornam as barragens vulneráveis a falha: (1) a barragem é formada por material local (solo, resíduos grosseiros, sobrecarga de operações de mineração e rejeitos); (2) elevação em várias etapas da barragem para lidar com o aumento dos rejeitos mais o escoamento da precipitação liberado; (3) a falta de regulamentação sobre critérios específicos de projeto; (4) falta de estabilidade da barragem que requer monitoramento e controle contínuos durante a implantação, construção e operação da barragem, e (5) o alto

custo das obras de remediação após o encerramento das atividades de mineração (Rico et al. 2007).

O resultado de um rompimento pode deixar um legado ambiental, social e econômico para a empresa e para sociedade. Na esfera econômica, a empresa terá que arcar com diversos custos (recuperação ambiental, indenizações, perda material e etc.), na esfera social a reputação da empresa junto à comunidade mais próxima será afetada; já a esfera ambiental, o impacto negativo proveniente irá variar de acordo com o tipo de substâncias presentes nos rejeitos.

Diversos foram os legados de rompimentos de barragens mundialmente. Em um levantamento feito por Bowker (2019), no mundo ocorreram 356 acidentes de rupturas de barragens de rejeitos entre 1915 a 2019. Em 2015 e em 2019 o Brasil vivenciou dois grandes acidentes, ambos ocorreram no Estado de Minas Gerais. O primeiro foi o rompimento da barragem do Fundão, que foi considerado como o maior desastre ambiental tecnológico (Garcia et al., 2016) e o segundo, da Barragem I da Mina do Feijão, que pode ser considerado o pior acidente de trabalho (Sznclwar, 2019).

Ambos os acidentes tiveram como causa a liquefação (Morgenstern et. al., 2016; Robertson et. al., 2019). Segundo James et. al. (2011), a liquefação é um fenômeno que ocorre devido a deformação causada pelo excesso de forças geradas pela poro-pressão em regiões saturadas. Davies (2002) aponta a liquefação estática como a causa de rompimento mais comum.

As barragens de rejeito são empreendimento de alto risco, uma vez que, as consequências podem ser catastróficas. Desta maneira, surge a necessidade de um amadurecimento no gerenciamento de risco dentro do setor. Para isso urge a necessidade de trabalhos voltados para o gerenciamento de risco que visem o entendimento das causas em rupturas de barragem.

O presente trabalho elabora uma Série de Risco de uma barragem genérica, utilizando a causa de um rompimento por liquefação, uma vez que esta é apontada na literatura como sendo uma das causas principais de rompimentos. Para a elaboração da Série de Risco foi utilizado os relatórios técnicos realizados pelos comitês que analisaram os acidentes da Barragem do Fundão (2015) e da Barragem I (2019), além de trabalhos disponíveis na literatura. A Série de Risco é uma ferramenta que analisa as possíveis causas de um acidente, além de permitir a análise dos seus impactos. Para isso, na esfera do impacto ambiental, foram mapeadas as áreas tomadas pelos rejeitos, a partir da análise de imagens de satélite. Os

demais impactos sociais e econômicos resultantes de ambos os acidentes foram obtidos estudos que analisaram os mesmos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

A proposta desta dissertação é analisar as causas e consequências do rompimento de uma barragem de rejeito e estruturar uma Série de Risco para o evento de rompimento de barragens de rejeito da mineração em que tem como causa principal a liquefação. A partir da Série de Risco estruturada, como parte da gestão de risco, foi proposto algumas medidas de mitigação.

O presente trabalho não irá detalhar tecnicamente as questões geotécnicas, uma vez que, tem como objetivo trabalhar com os instrumentos de gestão de risco. Ou seja, sequenciar as causas e consequências e determinar inibições que possam evitar os eventos catastróficos de grandes impactos sociais, ambientais e econômicos. Desta forma será possível ter uma análise mais ampla de gestão de risco.

### 1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Por meio de uma revisão da literatura identificar os fatores que contribuem para que ocorra um rompimento de barragem de rejeito e quais foram as consequências para servir de apoio a estruturação da Série de Risco.
2. A partir da análise de imagens de satélite do uso e a ocupação do solo, antes e depois, avaliar os impactos ocorridos nos acidentes da Barragem do Fundão (2015) e Barragem I (2019), para ajudar a compor os possíveis impactos provenientes de uma ruptura de barragem de rejeitos.
3. Como parte de uma gestão de risco será proposto medidas inibidoras que visem à prevenção dos fatores contribuintes que levam a ruptura e à mitigação de suas consequências.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 BARRAGEM DE REJEITOS

A maioria das empresas de mineração utilizam as barragens de rejeito para poder destinar os rejeitos provenientes da etapa de beneficiamento (Edraki et. al., 2014). Esse tipo de barragem é mais indicado para regiões de clima semi-árido e árido, onde a precipitação não ultrapasse a evaporação do reservatório (Franks et. al., 2011). Ao construir barragens de rejeitos em regiões com esses tipos de clima, que favorecem a evaporação do reservatório, obtêm-se um controle maior do nível da água.

O gerenciamento dos rejeitos aumenta o custo da produção, por isso, é importante que o descarte seja o mais barato possível (Wills & Finch, 2015). Devido a essa necessidade, as barragens mostram boa vantagem econômica, uma vez que é possível diluir o custo da disposição através dos alteamentos (IBRAM, 2016).

As barragens podem ser divididas em três tipos e o método de construção é o que determina o tipo: a montante, centro de linha e a jusante. Nos três métodos há o dique de partida, o que varia entre eles é a direção do alteamento. Pode-se considerar ainda um quarto tipo, onde o empreendedor usa uma combinação desses métodos. Neste caso o custo e outras características dependem de cada projeto específico (Chambers & Higman, 2011)

Os métodos centro de linha e a jusante quando comparados ao método a montante apresentam um custo mais elevado para o empreendedor, porém, permitem um controle maior da percolação da água pela barragem. Desta forma, esses métodos apresentam um fator de segurança maior que o método a montante.

#### 2.1.1 Método a Montante

Este método apresenta vantagem econômica em relação aos outros: um baixo custo e uma velocidade maior no alteamento (Wills & Finch, 2015).

A construção da barragem que utiliza o método a montante possui a direção do alteamento voltada para o local onde os rejeitos são depositados (Figura 1). Assim a base dos próximos diques é a praia de rejeitos formada pelo lançamento do rejeito e o topo do dique anterior.



Figura 1: Método a montante  
Fonte: IBRAM, 2016

Quando a construção da barragem que utiliza este método não for bem executada, a condição em que os alteamentos irão se encontrar pode gerar problemas de subpressão no reservatório devido a percolação de água armazenada (Castro, 2008). Por essa razão que Morgenstern et al (2016) enfatiza a importância de uma boa drenagem.

### 2.1.2 Método Centro de Linha

O método centro de linha tem o seu dique de partida e os alteamentos são feitos, tanto a montante quanto a jusante do dique de partida, mantendo a mesma posição do dique de partida (Figura 2). O empreendedor quando utiliza este método, consegue ao longo dos alteamentos instalar os drenos (Castro, 2008).



Figura 2: Método Centro de Linha  
Fonte: IBRAM, 2016

### 2.1.3 Método a Jusante

Este método consiste em ter os seus alteamentos construídos a jusante do dique de partida (Figura 3). Desta forma, o dique de partida e os alteamentos de etapas anteriores continuarão a ser a fundação da barragem recém alteada (Castro, 2008).

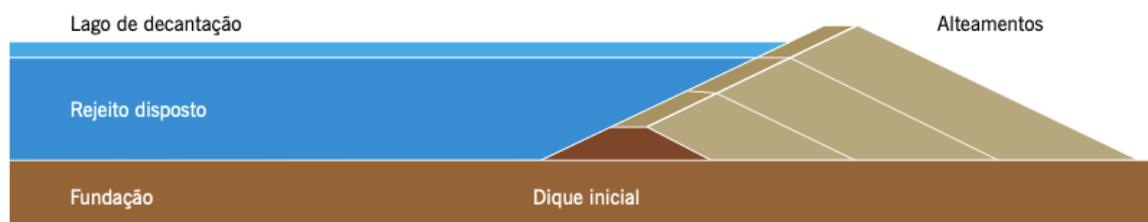


Figura 3: Método Jusante  
Fonte: IBRAM, 2016.

Quando comparado com os métodos anteriores o método a jusante possibilita a instalação de mecanismos que irão proteger a barragem contra a ruptura por liquefação e *piping*. O *piping* é um processo erosivo interno tubular, que se caracteriza pelo surgimento de canais, que se não controlados, irão erodir cada vez mais o maciço da barragem.

Os sistemas normalmente instalados são: impermeabilização do talude, instalação de filtros e tapetes drenantes e a construção de núcleos impermeáveis (Castro, 2008).

## 2.2 HISTÓRICO DE ACIDENTES

Desde que as barragens começaram a ser utilizadas, no início para controle de cheias e armazenamento de água, os acidentes acontecem (Rico et al., 2008). Entretanto, o foco deste trabalho, são as barragens usadas para destinar os rejeitos provenientes da atividade de extração mineral.

As barragens normalmente são projetadas e construídas por empresas especializadas de engenharia, porém por elas serem construídas lentamente, através de alteamentos ao longo do tempo, as condições podem mudar. Estas mudanças aliadas a falhas na supervisão podem levar a acidentes (ICOLD, 2001).

De acordo com Azam e Qiren (2010), a base de dados mundial com um histórico de acidentes de barragens de rejeitos é praticamente inexistente. Eles mencionam alguns bancos

de dados, tais como: (1) *United Nations Environmental Protection* (UNEP); (2) *International Commission On Large Dams* (ICOLD); (3) *World Information Service of Energy* (WISE); (4) *United States Commission On Large Dams* (USCOLD); and (5) *United States Environmental Protection Agency* (USEPA).

Atualmente o banco de dados mais completo é o compilado por Bowker (2019), que é organizado com informações provenientes de diversas fontes, além das anteriormente citadas. O Anexo deste trabalho apresenta informações deste banco de dados, que traz um total de 365 acidentes ocorridos entre 1915 e 2019, que resulta em uma frequência de 3,51 rompimentos por ano. Os são classificados em três categorias: aumento na ocorrência de acidentes menor (Falhas de engenharia / instalações com liberação menor que 100.000m<sup>3</sup> de rejeitos, , sem perda de vidas), graves (perda de vida e / ou liberação de descarga maior ou igual a 100.000 m<sup>3</sup> de semi-sólidos e / ou vazão maior .9km) e muito graves (perda múltipla de vidas (maior ou igual a 20) e / ou liberação de descarga total  $\geq 1.000.000$  m<sup>3</sup> e / ou liberação de deslocamento de 20 km ou mais), sendo que os acidentes graves e muito graves, preocupa devido aos seus impactos (Bowker, 2019 e Bowker e Chambers, 2017). A Figura 4 mostra a evolução da tendência para as categorias de acidente menor, sério e muito sério.

Devido a série histórica de acidentes envolver a ruptura de barragens que acondicionava rejeitos de diferentes minerais e durante a pesquisa não foi encontrado uma série histórica de produção mineral que abrangesse o mesmo período, não sendo possível fazer a normalização dos dados.

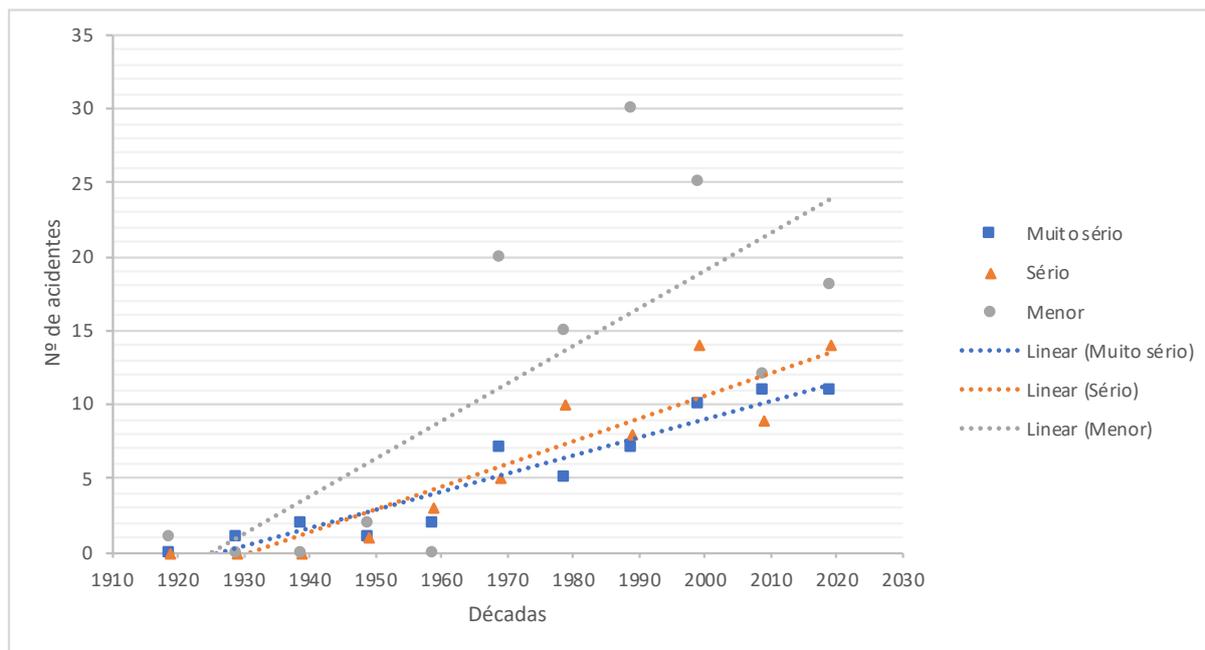


Figura 4: Tendência da Severidade dos acidentes de barragens de rejeito no mundo entre 1915 – 2019  
 Fonte: Adaptado de Bowker, 2019

Os acidentes de barragens de rejeito entre os anos de 1915 e 2019 (Bowker, 2019) aconteceram em diversos países, nos quais o setor da mineração possui grande importância no Produto Interno Bruto (PIB), como por exemplo, Brasil, Canadá e Austrália. Nestes países, a quantidade de acidentes registrados nesses anos representa respectivamente, 3.89%, 7.78% e 2.1% do total ao longo deste período. Nos Estados Unidos, onde participação da mineração no PIB é menor, apresentaram uma taxa maior de acidentes de barragens de rejeito (32,34%) ao longo do mesmo intervalo de tempo. (Figura 5).

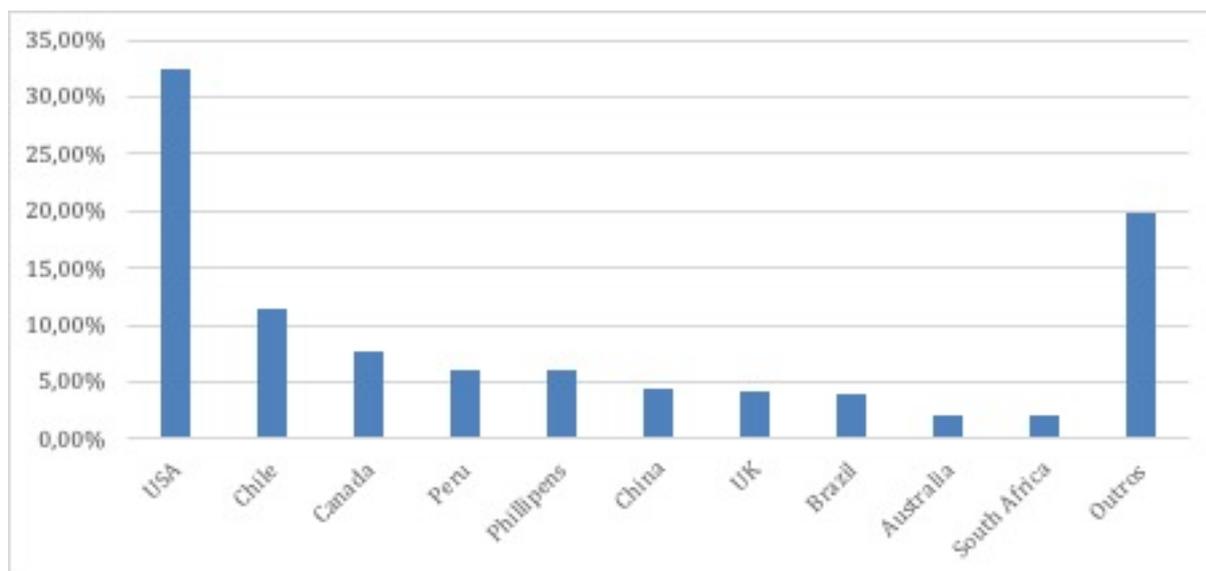


Figura 5: Ruptura de barragens de rejeito ao redor do mundo entre 1915 e 2019

Fonte: Autor, 2019 a partir de Bowker, 2019.

Do total de rompimentos de 147 barragens de rejeito estudadas por Rico et al. (2008), 83% ocorreram quando a barragem estava ativa, 15% em barragens inativas e abandonadas, e apenas 2% das falhas ocorreram em barragens inativas, mas mantidas.

Dos acidentes recentes ocorridos no Brasil, barragem do Fundão e Barragem I, chama a atenção pois cada um desses acidentes se encontra em uma das três categorias citadas acima, a primeira barragem estava ativa e a segunda estava inativa, porém supervisionada.

As causas principais para as falhas e incidentes em barragens de rejeito são: falta de controle hídrico, falta de controle da construção e falta geral de entendimento das características que controlam as operações seguras (ICOLD, 2001).

Lyu et. al. (2019) analisaram 139 rompimentos em um período de 108 anos (1910 a 2018), que foram classificados de acordo com o tipo de barragem (figura 6). Lyu et. al. (2019) aponta que as falhas causadas no campo da tensão e o campo da infiltração mudam, levando a barragem à instabilidade. Eles explicam que existem alguns acontecimentos que resultaram na falha, são eles: (1) o campo de infiltração induz diretamente a instabilidade da barragem de rejeitos (infiltração e erosão interna); (2) a instabilidade da fundação da barragem de rejeitos (más condições de fundação); (3) inundações que façam com que o declive da barragem de rejeitos se torne instável (por cima); (4) um efeito de terremoto (instabilidade estática e sísmica); e (5) outras razões (subsidência de minas, estrutura, erosão externa e instabilidade de taludes).

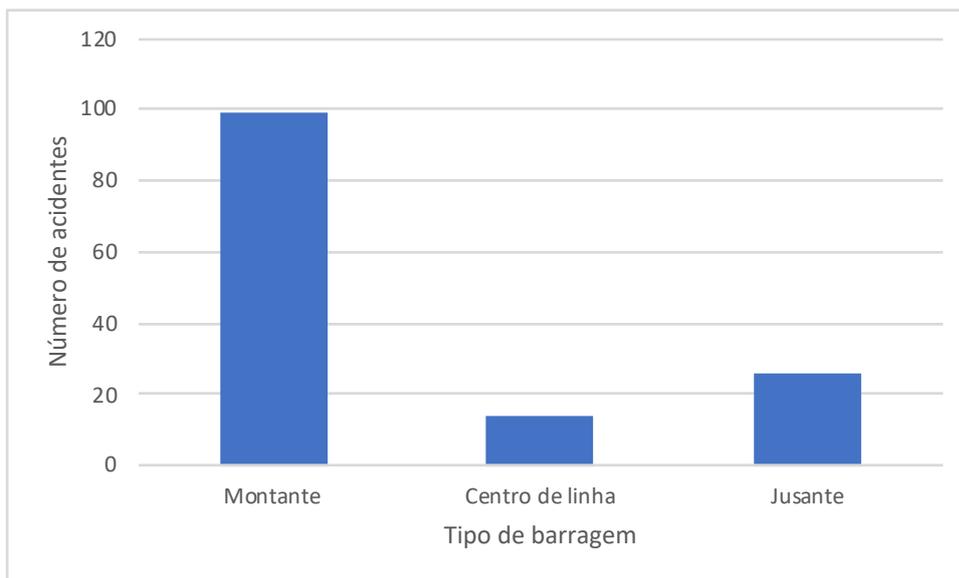


Figura 6: Distribuição dos acidentes com barragem de rejeitos por tipo de barragem.  
Fonte: adaptado de Lyu et. al. (2019).

Rico et. al. (2008), Kossoff et. al. (2014), Azam e Qiren (2010) e ICOLD (2001) quando analisaram rupturas de barragens, avaliaram somente para um risco contribuinte, isto é, a causa anterior ao rompimento, que podem ser diversas (liquefação, galgamento, inundações, infiltração, defeito estrutural, gestão, subsidência da fundação). Na figura 7 é possível observar como é a distribuição dessas falhas, a partir do banco de dados analisado por Lyu et. al. (2019), compreendendo 306 acidentes.

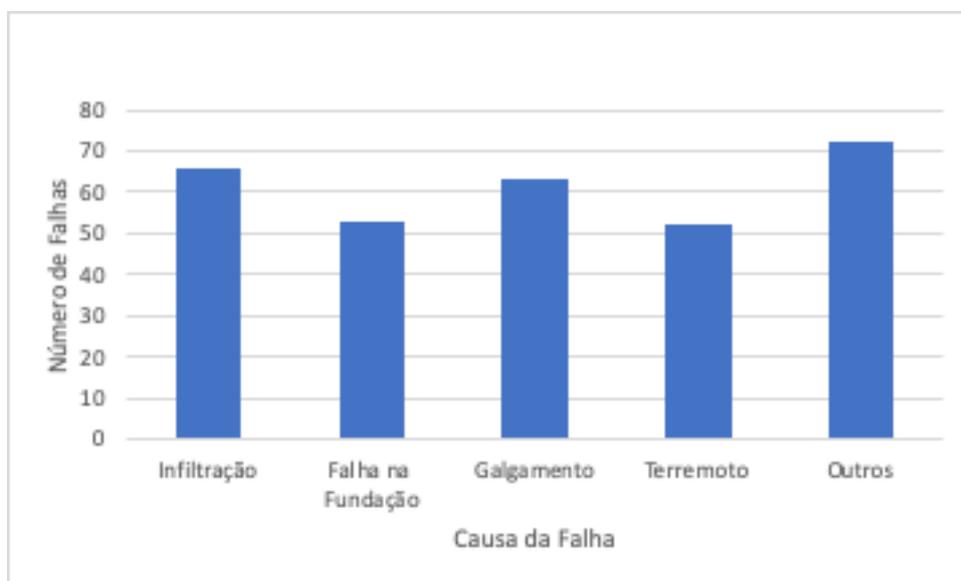


Figura 7: Distribuição dos acidentes de acordo com as falhas.  
Fonte: adaptado de Lyu et. al. (2019).

Como pode ser notado na figura 7, o modo de falha por liquefação não foi citado. Isso se deve ao fato de alguns autores ao analisarem determinados acidentes, acreditam que a sua causa seja a infiltração, enquanto outros, apontam a liquefação como causa. Por exemplo, Lyu et. al. (2019) aponta como causa do rompimento da barragem Stava na Itália, a infiltração. Já Davies (2002), aponta como causa a liquefação. Essa confusão acontece porque a infiltração é um evento anterior a liquefação. Para que a liquefação aconteça, o meio tem que possuir uma certa saturação e para isso a infiltração no maciço precisa ocorrer.

As barragens de rejeitos são permeáveis a água, tendo a sua estabilidade muito influenciada pelas infiltrações. A linha freática do campo da infiltração é chamada de “linha da vida” da barragem. Sendo que o material que fica abaixo dessa linha necessita de um tempo maior para se consolidar, sendo que, os rejeitos que se encontram quase saturados aumentam o peso da barragem, o que acarreta a redução da força de cisalhamento e tensão efetiva. Desta forma o monitoramento da linha freática tem que ser constante, uma vez que, a maioria das barragens localizam-se perto das montanhas, tornando os lagos de rejeitos suscetíveis a eventos de chuvas intensas. Esses eventos contribuem para que o nível de água aumente em um curto período de tempo. Além dos eventos de chuva, podemos elencar mais alguns fatores que afetam o nível da linha freática, são ele: o comprimento da praia de rejeitos, baixa permeabilidade, e falhas nas instalações de drenagem (Lyu et. al. 2019).

Dos rompimentos estudados por Rico et al (2008), as barragens a montante representam 66%, o que está em acordo com apresentado por ICOLD (2001). Este método apresenta uma grande vulnerabilidade ao efeito da liquefação (Davies, 2002; Morgenstern et. al, 2016). Ainda de acordo com Psarropoulos e Tsompanakis (2008), o método a montante tem o fator de segurança reduzido conforme a construção progride.

Ao longo da história de rupturas de barragem, podemos elencar algumas que tiveram como causa a liquefação, incluindo os dois acidentes mais recentes ocorridos no Brasil, Barragem do Fundão em 05/11/2015 e Barragem I em 25/01/2019, ambas localizadas no estado de Minas Gerais (Tabela 2).

Tabela 2: Exemplos de barragens que romperam por liquefação

Barragem / Mina	Ano	País
Merriespruit Harmony Mine <sup>1</sup>	1994	África do Sul
Sullivan Mine <sup>1</sup>	1991	Canadá
Stava Mine <sup>1</sup>	1985	Itália
Los Frailes Mine <sup>1</sup>	1997	Espanha
Pinto Valley <sup>1</sup>	1991	Estados Unidos
Pit No. 2 <sup>2</sup>	1977	Austrália
Cerro Negro No. 4 <sup>2</sup>	1985	Chile
Barragem do Fundão <sup>3</sup>	2015	Brasil
Barragem I <sup>4</sup>	2019	Brasil

Fonte: <sup>1</sup> Davies e Martin (2002), <sup>2</sup> ICOLD (2001), <sup>3</sup>Morgenstern et. al. (2016) e <sup>4</sup> Robertson et. al. (2019)

Segundo o relatório elaborado por Morgenstern et. al (2016), que avaliou as causas da Barragem do Fundão, não se pôde definir qual foi o tipo de liquefação, cíclica ou estática, uma vez que foram detectados sismos perto do momento da ruptura.

O relatório elaborado por Robertson et. al (2019) já foi mais categórico ao afirmar que a Barragem I rompeu-se devido a liquefação estática.

Como já apontado, as barragens têm as suas causas de rompimento por terremoto, falha na fundação, galgamento e liquefação. Também podemos citar o *piping* como causa de acidente, o qual também está relacionado com a infiltração que o maciço sofre (Luy, 2019; Rico, 2008; Azam e Qiren, 2010; Davies, 2002). Porém, como colocado por Caldwell e Charlebois (2010), os acidentes ocorrem porque não se controla os incidentes.

Caldwell e Charlebois (2010) vão além das causas já citadas, relacionadas a estrutura e operação das barragens, Caldwell e Charlebois (2010) enumeram mais três causas de acidente, que são fatores externos (macro) que são:

1- Institucionais, que são as atitudes e as práticas culturais e de partes interessadas que não sabem ou se preocupam com a presença e/ou condição do represamento de rejeitos.

2- Gerenciamento, incluindo a ausência de gerentes com conhecimento e/ou a falha daqueles com poder e responsabilidade de agir.

3- Regulamentação, incluindo ausência ou regulamentação inadequada e/ou falha dos responsáveis não se fazer cumprir a regulamentação existente.

Um outro fator que tem sido apontado por alguns autores (Bowker & Chamber, 2017; Davies & Martin, 2009; Marshal, 2018), são os ciclos de alta e baixa das *comodities*. Nesses estudos os ciclos das *comodities* dos minérios de cobre e ouro foram utilizados, e verificou-se

uma tendência: quando estes minérios se encontravam em baixa, era observado a ocorrência de algum acidente devido, provavelmente, a projeto e construção acelerados, redução de custos, alta rotatividade do pessoal na mina, dentre outros (Caldwell e Charlebois (2010).

Desta forma, foi observada a mesma tendência ocorria ao analisarmos a *comodity* de minério de ferro, com os rompimentos de barragens de minério de ferro. Também podemos incluir mais dois fatores, a cotação do dólar, e no caso dos rompimentos das barragens do Fundão e da Barragem I, o valor da ação da Vale. Na figura 8, é possível verificar a oscilação destes três fatores e o momento em que os acidentes ocorreram. As duas linhas verticais vermelhas indicam quando os acidentes da barragem do Fundão (2015) e Barragem I (2019) ocorreram.

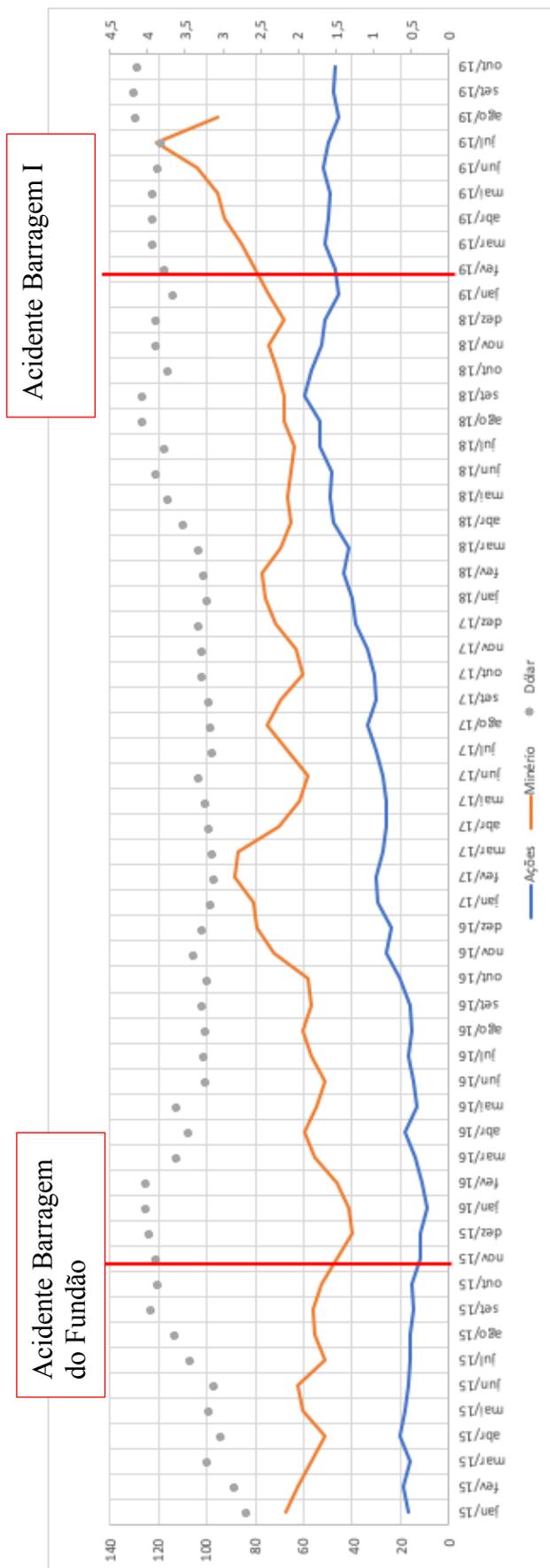


Figura 8: Valor da ação da Vale, valor do minério de ferro e o dólar comercial de 01/01/2015 a 10/10/2019

As linhas em vermelho marcam os momentos dos acidentes de Mariana e Brumadinho. Como podemos perceber, na época do acidente em Mariana, o valor do minério de ferro estava caindo há tempos e o dólar estava em um movimento lateralizado o que indica uma indecisão, sem tendência de alta e nem de baixa do ativo. Além disso, em 2000, a Samarco, que era a dona da barragem do Fundão, havia contraído dívidas para investir em um crescimento (*ramp-up*) (Samarco, 2008). Já o acidente de ruptura da Barragem I, em Brumadinho, que tem como proprietária a Vale, fez com que as ações da empresa apresentassem um movimento lateralizado, já que vinham apresentando uma baixa desde setembro de 2018. O minério tinha começado a subir e o dólar estava esboçando uma alta. Desta forma, a mesma tendência observada por Bowker & Chamber, (2017), Davies & Martin (2009) e Marshal (2018), pode ser notada.

### 3. GERENCIAMENTO DE RISCO

As catástrofes resultantes da nossa incapacidade de controlar as tecnologias criadas pelo ser humano (Manion e Evan, 2002) e o impacto dessas catástrofes, geralmente, não respeitam fronteiras de nenhum tipo. Essa incapacidade, vem desde o início da Revolução Industrial resultando em catástrofes, sendo algumas mais conhecidas, e os seus impactos não ficaram contidos dentro dos limites físicos das empresas. Entre as os acidentes de grande magnitude, podemos citar: Bophal em 1984, Chernobyl em 1986, Exxon Valdez em 1989, Deep Water Horizon em 2010, Barragem do Fundão em 2015 e Barragem I em 2019. Todos os acidentes citados geraram grandes os impactos financeiros, ambientais e sociais.

Todos esses acidentes ocorreram em indústrias que gerenciam sistemas complexos de alto risco. Llory e Montmayeul (2014) apontam que esses e outros acidentes se repetem de forma muito semelhante, como um “eco” de um acidente para outro. Assim, o interesse em compreender a gênese de acidentes cresceu. Diversas formas para abordar o problema de causa de acidentes sob diferentes perspectivas foram criadas (Moura, 2017), sendo os métodos em árvores os mais usuais (Llory e Montmayeul, 2014). Esses métodos são utilizados nas análises de acidentes e no gerenciamento de riscos.

Na engenharia de segurança, muitos dos métodos empregados tem como objetivo a identificação dos riscos existentes nos sistemas de produção das indústrias consideradas de alto risco, tais como química, nuclear, mineração, entre outras. Estes métodos visam identificar, analisar, avaliar e eliminar ou controlar os riscos do sistema documentando cada uma destas etapas (Bahr, 2018).

Os métodos em árvore são muito eficientes quando utilizados para identificar as relações causais entre os eventos, pois permitem a reconstrução dos fatos através de um encadeamento lógico, trazendo mais entendimento a análise de um acidente. Dentre os métodos em árvore utilizados nas análises de acidentes e no gerenciamento de risco nas indústrias, podemos citar as seguintes ferramentas: Análise de Modos de Falhas e Efeitos, Árvore de Falhas, Árvore de Eventos, Bow tie e Série de Risco.

Independente da ferramenta escolhida, é importante que o profissional que está aplicando possua domínio. Não há a necessidade de que esse profissional tenha um conhecimento profundo do sistema, normalmente nas análises de risco são utilizadas equipes multidisciplinares.

Nos próximos itens deste capítulo, os métodos Análise de Modos de Falhas e Efeitos, Árvore de Falhas, Árvore de Eventos, Bow tie e Série de Risco serão explicados e quando identificado a emprego de algum desses métodos para analisar o risco de rompimento de uma barragem, o trabalho será citado informando o método aplicado.

Para poder aplicar qualquer um desses métodos, há a necessidade de se compreender como o sistema a ser analisado funciona. Normalmente, quando uma empresa realiza uma análise de risco, é constituída uma equipe multidisciplinar, onde pelo menos uma pessoa tem o domínio sobre algum dos métodos citados e em análise de risco, e os demais envolvidos irão apoiar na análise, explicando e informando como o processo ou sistema analisado funciona. Estes também podem contribuir com informações de falhas que podem ocorrer.

### 3.1 ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E EFEITOS (AMFE)

A Análise de Modos de Falhas e Efeitos (AMFE) é uma metodologia quantitativa e/ou qualitativa que tem como objetivo analisar os modos de falhas e os seus efeitos dentro de um sistema. Desta maneira é possível determinar se modificações serão necessárias devido a confiabilidade, segurança ou operação intolerável, como consequência dos possíveis modos de falhas. Ela pode ser utilizada na forma de diagrama ou de planilha quando há o interesse de quantificar o risco (Ericson, 2005).

Este método é uma técnica que realiza a avaliação de baixo para cima, focando no design ou na função de produtos e processos, com o objetivo de priorizar quais medidas precisam ser tomadas para reduzir o risco de falhas no sistema analisado. Também serve para documentar a análise e capturar as alterações de design recomendadas. Ao utilizar o AMFE, o tempo e os recursos devem ser alocados durante o desenvolvimento do projeto e do processo, já que nessas fases, qualquer alteração que seja necessária se torna mais fácil e barata (Ericson, 2005).

O conceito desta ferramenta é decompor o sistema analisado em unidades menores e listar os seus modos de falhas, no qual pode-se organizar um organograma de como essas unidades estão conectadas no sistema. O método também oferece a possibilidade para trabalhar em forma de planilha, na qual, cada linha da planilha será um item do sistema analisado, contendo o seu modo de falha, taxa de falha, efeito imediato e efeito no sistema

(Figura 9). No AMFE, os principais componentes analisados de um sistema são as partes físicas e as funções, que podem ser classificados como o aspecto estrutural e o aspecto funcional do sistema (Figura 10). A definição de como as funções serão implementadas através das partes físicas que realizarão as operações do sistema são definidas pelo aspecto estrutural (Ericson, 2005).

De acordo com Ericson (2005), conceitualmente há três abordagens para realizar o AMFE:

- 1- Abordagem Funcional: nesta abordagem a AMFE é realizado em funções. Sendo que estas funções podem estar em qualquer nível que garanta a função para a análise: sistema, subsistema, unidade ou montagem. O foco desta abordagem é verificar as maneiras pelas quais os objetivos funcionais de um sistema acabam errados.
- 2- Abordagem Estrutural: esta abordagem tem como foco os possíveis modos de falhas das partes físicas. Essas partes podem estar em qualquer nível para análise do sistema, unidade, montagem ou peça. Sendo que esta abordagem possui uma tendência a ser mais detalhada no nível do componente.
- 3- Abordagem Híbrida: O AMFE híbrido é a combinação das duas outras abordagens. Começando pela análise funcional do sistema e depois caminha para parte física que pode contribuir diretamente para que ocorram falhas funcionais no sistema e sendo críticas à segurança.

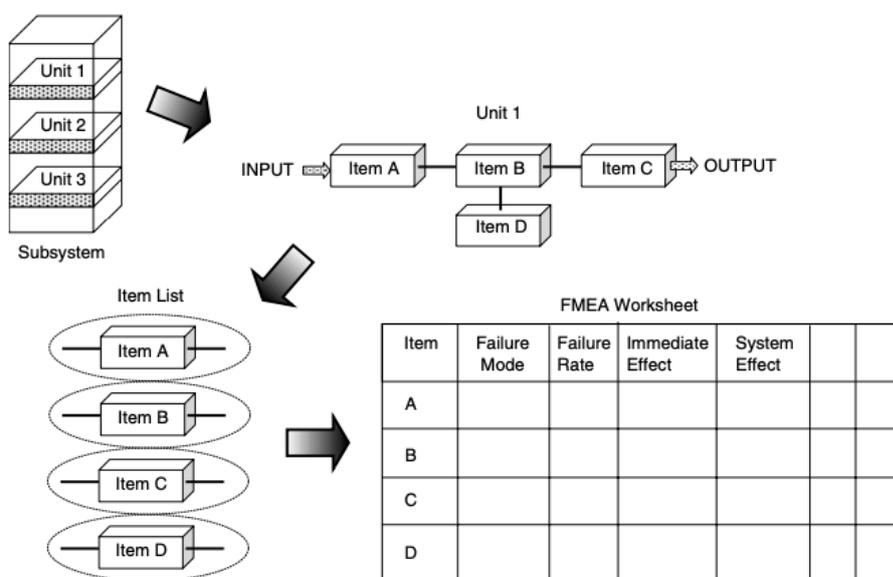


Figura 9: Metodologia da AMFE  
Fonte: Ericson (2005).

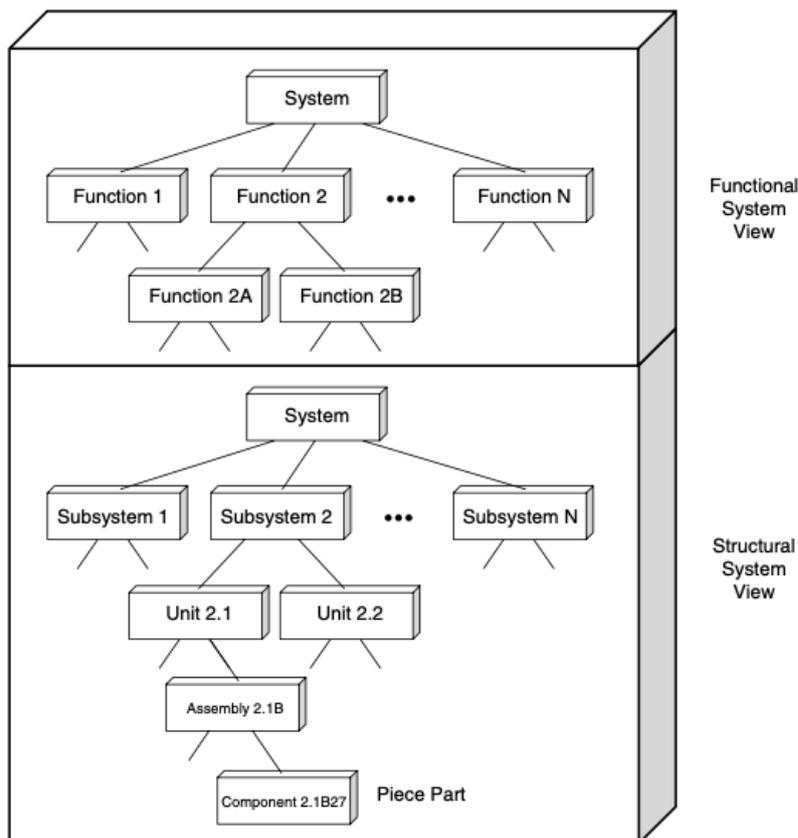


Figura 10: Metodologia AMFE - Aspecto funcional vs. Aspecto estrutural  
 Fonte: Ericson (2005)

Na investigação do rompimento da barragem do Fundão, Morgenstern et. al. (2016) relata que aplicou a Árvore de Falhas, porém ao analisar o esquema apresentado (Figura 11), é possível notar que o método aplicado é a AMFE, uma vez que não foram aplicadas as conexões lógicas do método Árvore de Falhas. Desta maneira os autores durante a investigação utilizaram método AMFE na abordagem híbrida para mostrar os modos de falhas que resultaram no rompimento da barragem do Fundão por Liquefação.

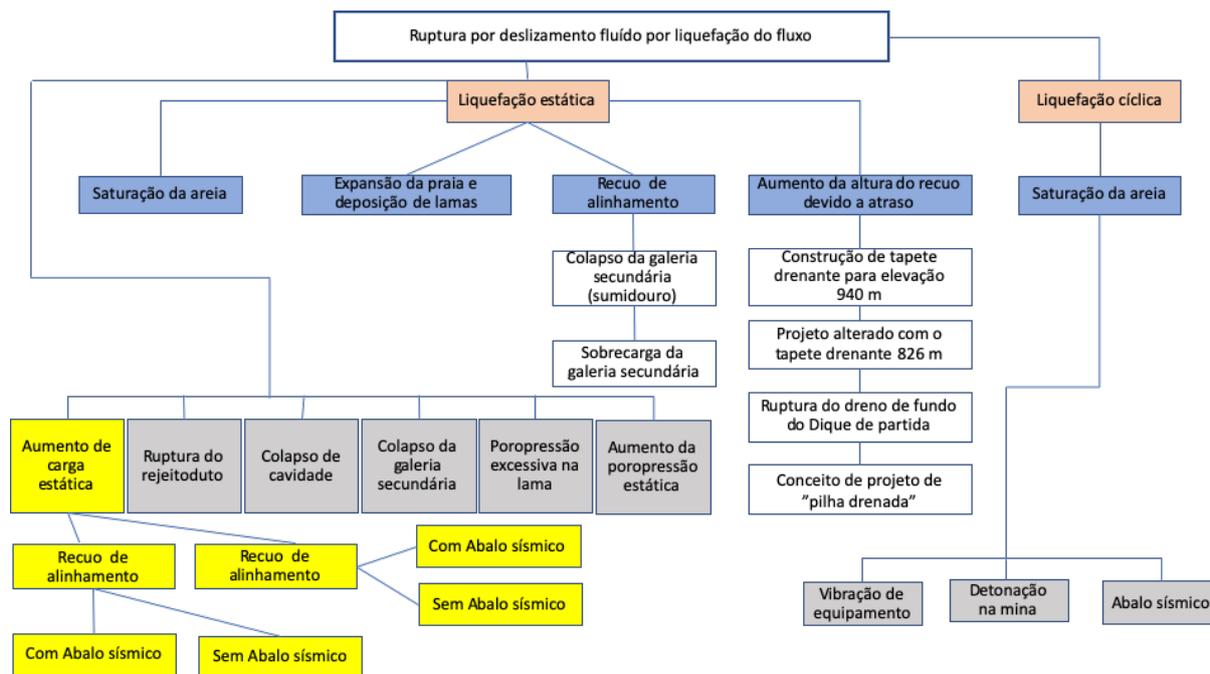


Figura 11: AMFE da ruptura da Barragem do Fundão.  
 Fonte: Morgenstern et. al. (2016)

Santos et. al. (2011), utilizaram o método Análise de Modos de Falhas e Efeitos em formato de planilha para a barragem em operação Cerro do Lobo, localizada em Portugal. No trabalho, os autores evidenciaram os perigos e as vulnerabilidades mais relevantes do sistema de barragens analisado, isolando cada componente e descrevendo os efeitos dos modos de falha de componentes individuais no sistema global. A Tabela 3 apresenta parte da planilha apresentada pelos autores.

Tabela 3: Análise de Modos de Falhas e Efeitos da Barragem Cerro do Lobo (Santos et. al. 2011) continua

ID	Modos de Falhas	ID	Efeitos Diretos	ID	Efeitos intermitentes	ID	Efeitos finais
III.1.1. (1) Camada de proteção a montante	Erosão	III.1.(1)	Destruição parcial (praias e escarpas)	III.(1)	Variação da geometria e da força de a concha a montante	0.(1) 0.(6)	Redução do armazenamento de rejeitos Perda de bordo livre
III.1.2. (1) Concha a montante	Instabilidade	III.1.(2)	Variação da geometria e da força (deslizante)	III.(3) III.(4)	Danos na geomembrana ou no núcleo (falta de estanqueidade) abaixando	0.(1) 0.(4) 0.(6)	Redução do armazenamento de rejeitos Falta de retenção da lagoa (exposição de rejeitos) Perda de bordo livre
III.1.2. (2) Concha a montante	Deformabilidade excessiva	III.1.(2)	Variação geométrica	III.(3) III.(4)	Danos na geomembrana (falta de estanqueidade) Redução da crista	0.(1) 0.(4) 0.(6)	Redução do armazenamento de rejeitos Falta de retenção da lagoa (exposição de rejeitos) Perda de bordo livre
III.1.3. (1) Concha a jusante	Instabilidade	III.1.(4)	Variação da geometria e da força (deslizante)	II.(3) III.(4) III.(6)	Danos na geomembrana e no núcleo (falta de estanqueidade) Redução de crista Mau funcionamento do sistema de drenagem (obstrução do dreno do pé)	0.(4) 0.(5) 0.(6)	Monitorando danos no sistema Destruição do poço de drenagem da bomba Falta de retenção da lagoa (exposição de rejeitos) Insuficiência do sistema de bombeamento (contaminação local) Perda de bordo livre

Tabela 3: Análise de Modos de Falhas e Efeitos da Barragem Cerro do Lobo (Santos et. al. 2011) continuação

ID	Modos de Falhas	ID	Efeitos Diretos	ID	Efeitos intermitentes	ID	Efeitos finais
III.1.3. (2) Invólucro a jusante	Deformabilidade e excessiva	III.1.(5)	Assentamentos de crista e de aterro a jusante	III.(3) III.(4)	Danos na geomembrana (falta de impermeabilização) Redução de crista	0.(2) 0.(4) 0.(5) 0.(6)	Monitorando danos no sistema Falta de retenção da lagoa (exposição de rejeitos) Insuficiência do sistema de bombeamento (contaminação local) Perda de bordo livre)
III.1.4. (1) Núcleo argiloso	Infiltração excessiva (sem rachaduras)	III.1.(7)	Erosão interna	III.(6) III.(7) III.(8)	Entupimento do sistema de drenagem Tubulação e formação de brechas Infiltração em níveis elevados no reservatório a jusante	0.(5) 0.(6) 0.(7) 0.(8)	Insuficiência do sistema de bombeamento (contaminação local) Perda de bordo livre Onda de inundação no vale a jusante Contaminação generalizada a jusante

ID: Identificação da unidade do sistema analisada

### 3.2 ÁRVORE DE FALHAS (AF)

A Árvore de Falhas é uma técnica que consiste em analisar sistemas para determinar a raiz das causas e a probabilidade de um evento ocorrer. Sendo muito empregada para avaliar sistemas complexos e dinâmicos, com o objetivo de entender e prevenir potenciais problemas. É uma metodologia lógica que permite ao analista uma modelagem de combinações de falhas de eventos que podem fazer com que um evento indesejado ocorra (Ericson, 2005).

Na modelagem da Árvore de Falhas utiliza-se conexões lógicas para estabelecer as relações causa-efeito que possam causar o evento indesejado. O modelo gráfico pode ser traduzido para um modelo matemático, a fim de avaliar as probabilidades. Na maioria das

vezes, uma avaliação qualitativa já nos fornece um resultado efetivo para reduzir custos (Ericson, 2005).

É uma metodologia que requer a aplicação de certas regras da álgebra Booleana, lógica e teoria da probabilidade. A Árvore de Falhas é um diagrama lógico com todos os acontecimentos que podem causar o evento indesejado (Ericson, 2005). A figura 12 apresenta um exemplo de Árvore de Falhas. O evento topo é representado pelo retângulo G1, os demais retângulos seriam as falhas que ocorreram para o desenvolvimento do evento topo. As falhas são definidas como erros, mal funcionamento das “peças” que compõem o sistema analisado.

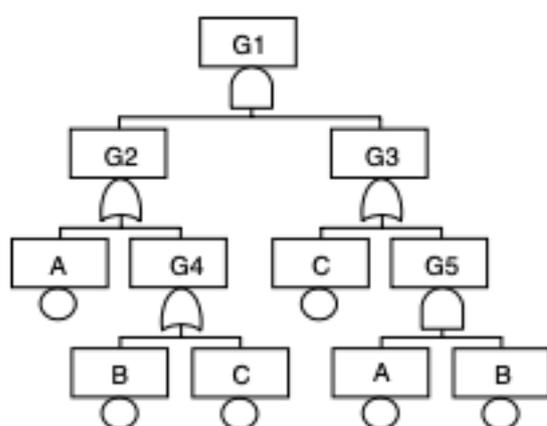


Figura 12: Exemplo de Árvore de Falhas  
Fonte: Bahr (2017).

Quando a árvore de Falha está completa, é possível determinar os conjuntos críticos de corte e a probabilidade da falha. Os conjuntos de corte são o resultado das combinações de eventos de falha que podem causar o evento indesejado (Ericson, 2005).

A metodologia consiste em nós interligados em uma estrutura de árvore. Sendo que os nós representam os erros ou falhas que estão conectadas por uma lógica booleana e símbolos (Figura 13 e 14). Os símbolos utilizados na construção dos blocos consistem em quatro categorias: evento básico, evento conexão, evento condicional e evento de transferência (Ericson, 2005).

Símbolo	Tipo	Descrição
	Nó de caixa de texto	Contém o texto para todos os nós da AF. O texto entra na caixa e o símbolo do nó fica abaixo da caixa.
	Primeira falha (evento básico)	Uma falha básica do componente; o modo primário, inerente, de falha de um componente. Um evento de falha aleatória.
	Falha secundária (evento básico)	Uma falha induzida externamente ou um modo de falha que poderia ser desenvolvido com mais detalhes, se desejado.
	Evento normal (evento básico)	Um evento que deve ocorrer como parte da operação normal do sistema.
	Condição (evento condição)	Uma restrição ou probabilidade condicional.
	Transferência (evento transferência)	Indica onde uma ramificação ou sub-árvore está marcada para o mesmo uso em outras partes da árvore. Símbolos de entrada e saída ou de / para.

Figura 13: Símbolos para eventos básicos, condições e transferência da Árvore de Falhas

Fonte: Ericson (2005).

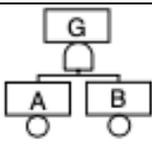
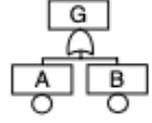
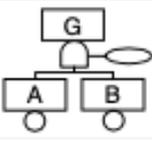
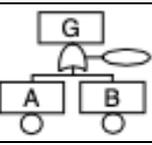
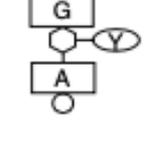
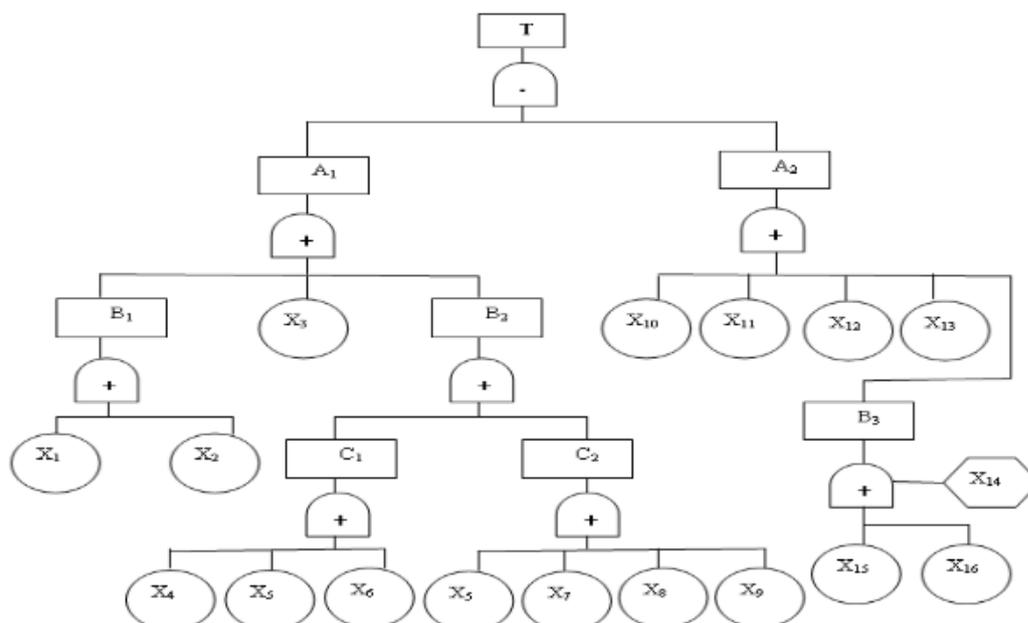
Símbolo	Tipo	Descrição
	Conexão E	A saída ocorre apenas se todas as entradas ocorrerem juntas. $P = P_A \cdot P_B = P_A P_B$ (2 entradas) $P = P_A \cdot P_B \cdot P_C = P_A P_B P_C$ (3 entradas)
	Conexão OU	A saída ocorre apenas se pelo menos uma das entradas ocorrer. $P = P_A + P_B - P_A P_B$ (2 entradas) $P = (P_A + P_B + P_C) - (P_{AB} + P_{AC} + P_{BC}) + (P_{ABC})$ (3 portas de entrada)
	Conexão E Prioridade	A saída ocorre apenas se todas as entradas ocorrerem juntas e A deve ocorrer antes de B. A declaração de prioridade está contida no símbolo de Condição. $P = (P_A P_B) / N!$ Dados $\lambda_A \approx \lambda_B$ e $N =$ número de entradas para a conexão
	Conexão OU exclusiva	A saída ocorre se uma das entradas ocorrer, mas não as duas. A declaração de exclusividade está contida no símbolo de condição. $P = P_A + P_B - 2 (P_A P_B)$
	Conexão Inibir	A saída ocorre apenas se o evento de entrada ocorrer e a condição anexada for atendida. $P = P_A \cdot P_Y = P_A P_Y$

Figura 14: Símbolos para as conexões  
Fonte: Ericson (2005).

Zengh *et. al.* (2016) realizou um estudo em que uma árvore de falhas foi estruturada para avaliar o risco de rompimento de uma barragem na China (Figura 15). Os símbolos utilizados para representar as conexões lógicas assim como os símbolos usados nas falhas foram diferentes dos apontados por Ericson (2005). Para estruturar a árvore de falhas os autores atribuíram para cada evento um código único (tabela 4).

Tabela 4: Descrição dos eventos que levam ao rompimento da barragem por *overtopping*.

Evento	Descrição do evento	Evento	Descrição do evento
T	Rompimento da barragem por <i>overtopping</i>	X <sub>5</sub>	Os problemas de instalações de drenagem sem retificação
A <sub>1</sub>	O nível da água excede a crista	X <sub>6</sub>	Falha no projeto
A <sub>2</sub>	Má qualidade de construção da barragem	X <sub>7</sub>	Mau gerenciamento
B <sub>1</sub>	Os detritos de deslizamento fluem para o tanque de rejeitos	X <sub>8</sub>	Estruturas de drenagem de inundações destruídas
B <sub>2</sub>	As instalações de drenagem não podem atender aos requisitos	X <sub>9</sub>	Estruturas de drenagem de inundação entupidas
B <sub>3</sub>	Outros problemas de qualidade da barragem	X <sub>10</sub>	Projeto inadequado do corpo da barragem
C <sub>1</sub>	A capacidade de drenagem é muito pequena	X <sub>11</sub>	Má qualidade de construção da barragem
C <sub>2</sub>	Falha nas instalações de drenagem	X <sub>12</sub>	Sem manutenção de rotina
X <sub>1</sub>	Localização inadequada	X <sub>13</sub>	Más condições geológicas
X <sub>2</sub>	Nenhum tratamento no deslizamento de terra	X <sub>14</sub>	Existe risco de barragem
X <sub>3</sub>	Previsão de falha de tempestade rara	X <sub>15</sub>	Nenhum risco identificado
X <sub>4</sub>	Sem instalações de drenagem	X <sub>16</sub>	Risco identificado, mas não controlou

Figura 15: Árvore de Falhas do rompimento de barragem devido ao *overtopping*.

Fonte: Zengh *et. al.* (2016)

Os autores transformaram o modelo gráfico (figura 15) em um modelo matemático, utilizando a Rede Bayesiana. A partir dados estatísticos da China, eles conseguiram calcular a probabilidade para cada evento, tornando possível fazer a equipe prestar mais atenção a esses fatores importantes no processo de produção.

### 3.3 BOW TIE

O método *Bow tie* é uma ferramenta qualitativa e com o foco na criação de uma representação visualmente simples de barreiras, ameaças, eventos importantes, barreiras, fatores e controles de degradação e consequências. Sendo utilizado a mais de 20 anos por diversas indústrias, com o seu foco no gerenciamento de acidentes graves.

O uso apropriado do tem o potencial de melhorar significativamente a segurança de processo, uma vez que, o método se concentra nos aspectos operacionais, destacando de forma clara todas as barreiras de segurança. Este método documenta as barreiras implementadas, como essas barreiras podem falhar e os processos e sistemas implementados para impedir que isso aconteça.

Esta ferramenta é muito útil para auxiliar indústrias de processos e não processo na análise de risco. Sendo que na indústria de processo, o é muito utilizado para eventos de acidentes grandes (*Major Accidents Events – MAE*), que são acidentes que resultam em fatalidades ou ferimentos severos, danos na estrutura, instalação ou planta e impacto ambiental grande, severo ou persistente, pois os funcionários de dessas indústrias precisam entender como isso pode ocorrer e as barreiras e controles de degradação implantados para evitá-los.

Entretanto, há empresas que decidem em utilizar o em eventos menos sérios, tais como os de segurança ocupacional, por exemplo, queda de altura. Isso pode ser benéfico para o gerenciamento de risco, por usar um formato comum. Porém há a necessidade de um esforço significativo para criar, comunicar e manter atualizado.

O pode apoiar na avaliação de risco, por ser uma abordagem estruturada, em instalações que não possuem P&ID e possuem a dificuldade de utilizar outros métodos. A figura 16 mostra os elementos que são utilizados no diagrama de *bow tie*.

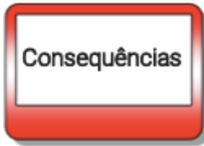
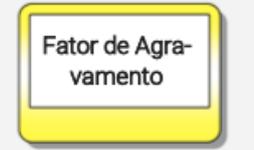
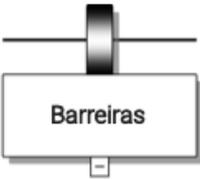
 <p>Perigo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descreve o estado desejado ou atividade</li> <li>• É parte natural do negócio</li> <li>• Tem potencial de causar dano se o controle é perdido</li> <li>• Define o contexto e escopo do diagrama bow tie</li> </ul>
 <p>Evento Topo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É o desvio do estado desejado ou atividade</li> <li>• Precede um dano de maior gravidade</li> <li>• Permite a possibilidade de recuperação</li> <li>• Perigos podem ter múltiplos eventos topo</li> </ul>
 <p>Ameaças</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São causas de um evento topo</li> <li>• Não são falhas de barreiras</li> <li>• Estão diretamente ligadas a um evento topo</li> <li>• Podem gerar eventos topo independente</li> </ul>
 <p>Consequências</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São as saídas/entregas danosas de um evento topo</li> <li>• Descrevem a causa direta de uma perda ou dano</li> <li>• Descrevem como o dano ocorreu</li> </ul>
 <p>Fator de Agravamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São fatores que reduzem a efetividade de uma barreira</li> <li>• Devem se usadas de forma complementar para destacar problemas reais</li> <li>• Dica: foque nas barreiras críticas</li> <li>• Dica: Evite repetição</li> </ul>
 <p>Barreiras</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Previnem, controlam, mitigam eventos não desejados ou consequências</li> <li>• Podem ser (uma combinação) de comportamento e elementos físicos</li> <li>• A um sistema de barreiras contém componentes de detecção, decisão e ação</li> </ul>

Figura 16: Elementos do diagrama de Bow tie  
Fonte: CCPS (2018)

Freeman e Baker (2016), que utilizaram a metodologia do *Bow tie* (Figura 17) para entender eventos complexos, tais como a ruptura de uma barragem, com base no que foi aprendido no setor da mineração global sobre gerenciamento de eventos catastróficos. Os autores analisaram a ruptura da barragem de rejeitos sob as diferentes formas que ela pode ocorrer (falha na fundação, *overtopping e piping*), e quais seriam os possíveis cenários com o rompimento da barragem. Por utilizarem o método *bow tie*, trabalharam também com as barreiras de controle para prevenir as ameaças e mitigar as consequências, levantando os fatores de degradação que podem afetar a performance da barreira de controle.

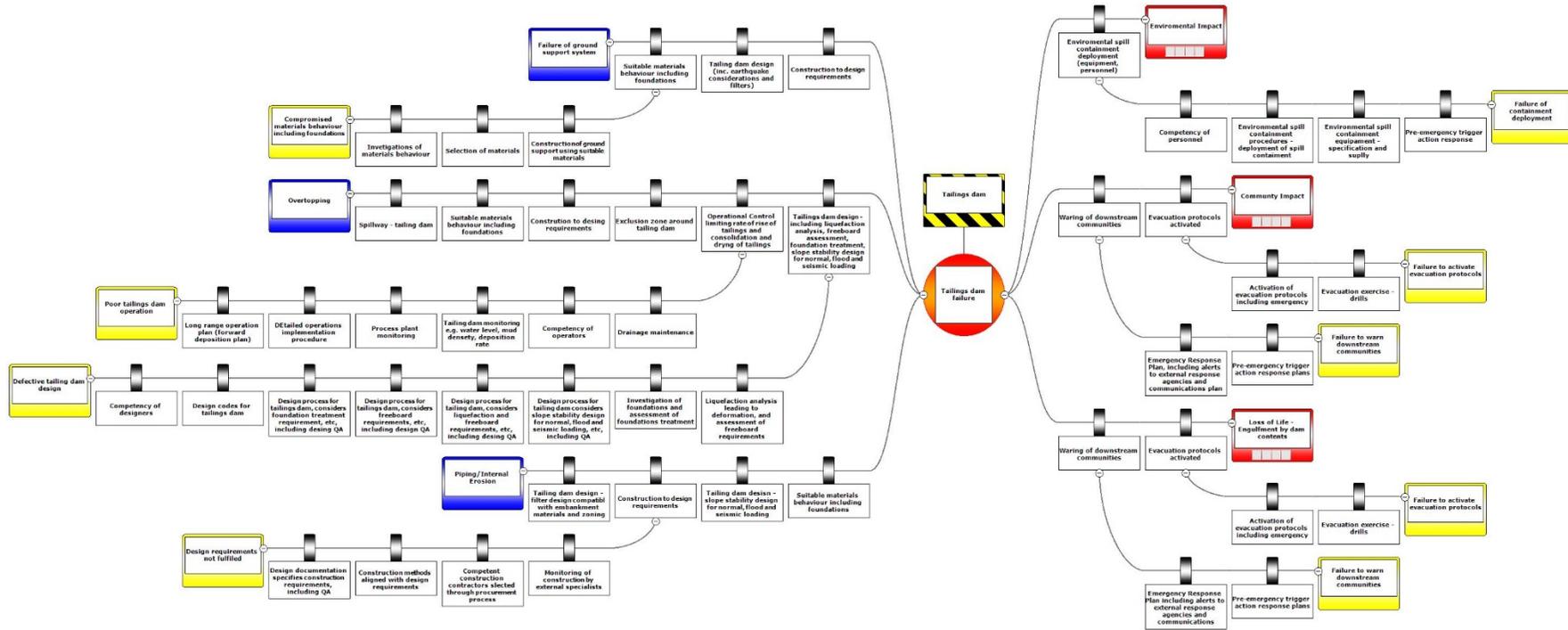


Figura 17: Resultados e controles críticos para mitigar uma falha na barragem de rejeitos, com exemplos de elementos funcionais de controle críticos. Fonte Freeman e Baker (2016)

### 3.4 ÁRVORE DE EVENTOS

A Árvore de Eventos é uma análise que consiste em identificar e avaliar a sequência de eventos em um cenário de acidente em potencial, após a ocorrência de um evento inicial. O fundamento por trás desta metodologia é a utilização de uma árvore lógica visual, cujo objetivo é determinar se o evento inicial irá se transformar em um acidente ou se os controles do sistema são suficientes. Ao contrário do método de Árvore de Falhas, que avalia as causas de um acidente ou evento indesejado, a Árvore de Eventos avalia os cenários que são formados após um acidente, sendo possível realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos eventos formados (Ericson, 2005).

Uma das formas de se realizar a construção da Árvore de Eventos é utilizando o conceito de múltiplas Árvores de Falhas. O resultado sempre será a geração de diversas possibilidades de consequências a partir de um evento inicial. A teoria por trás da Árvore de Eventos, parte da definição dos conjuntos de eventos iniciais que irão perturbar o sistema. Com isso definido, o analista irá proceder com a determinação dos modos de falhas que irão desenvolver as consequências indesejadas. As consequências e as frequências para cada cenário são computadas individualmente para os eventos iniciais e a probabilidade obtida formará o perfil do sistema (Ericson, 2005).

O início se dá através do evento inicial (EI) que é o acidente e o resultado final são os cenários, porém no meio do caminho existem os eventos centrais (figura 18). Esses eventos podem ser falhas ou eventos que podem mitigar ou agravar um cenário. Para obter-se a probabilidade desses eventos, pode-se utilizar a mesma lógica presente na Árvore de Falhas (Ericson, 2005).

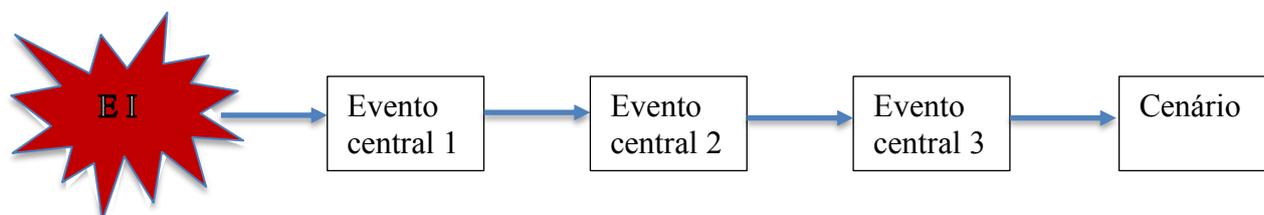


Figura 18: Conceito da Árvore de Eventos.  
Fonte Ericson (2005)

Uma vez que, a Árvore de Eventos trabalha a partir das consequências geradas por um acidente é preciso definir primeiro os cenários do acidente, os eventos iniciais e os eventos centrais de interesse para estruturar. Uma vez estruturado o diagrama, é possível aplicar a frequência que é usualmente derivada da Árvore de Falhas (Figura 19).

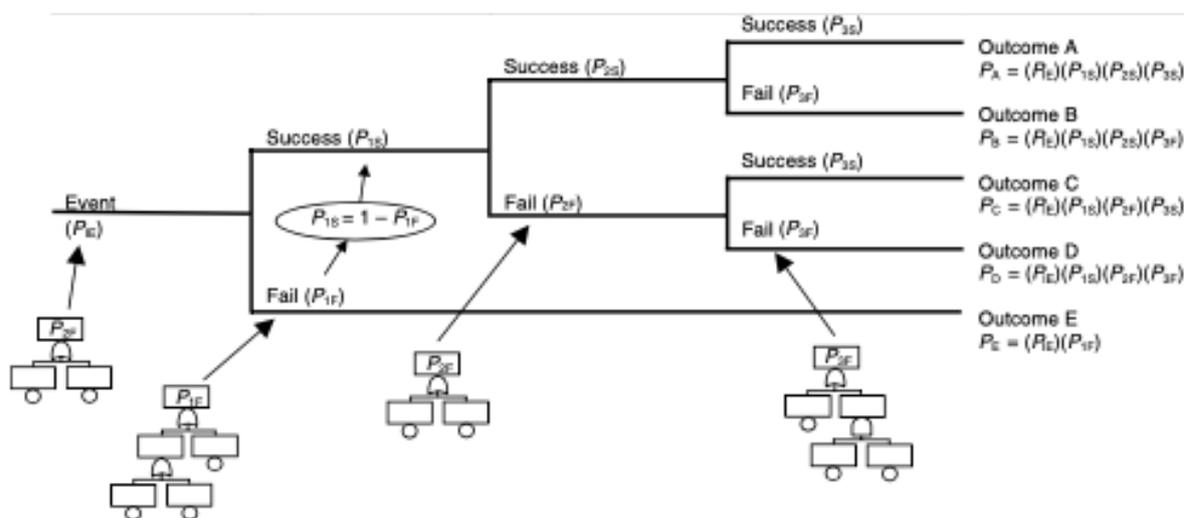


Figura 19: Desenvolvimento do diagrama  
Fonte Ericson (2005)

Na figura 19, é exemplificado um modo quantitativo, onde é apontado o local da análise no qual pode ser empregado a Árvore de Falhas para descobrir as causas das falhas ocorridas e possibilitando analisar a probabilidade de cada evento. Como pode ser notado, o modelo combina todos os métodos de contramedidas de segurança do projeto do sistema destinados a evitar que o *Event* (Evento Inicial), ou seja, o acidente. Como resultado final da Árvore de Eventos, tem-se um diagrama que evidencia os possíveis cenários ocorridos. O que este método faz é trabalhar com os eventos para avaliar se irão resultar em um acidente (Ericson, 2005).

### 3.5 SÉRIE DE RISCO

O método Série de Risco é apresentado por De Cicco e Fantazzini (2003) para estruturar um diagrama de causa-consequência, muito utilizado por profissionais da segurança do trabalho.

A Série de Risco tem como objetivo a inibição da sequência de fatos (causas ou consequências) negativos ou a sua repetição, ou seja, visa a prevenção ou mitigação desses fatos. A metodologia consiste na análise de sequências de eventos por relação causa-efeito, sendo fatural e não temporal. Este método trabalha com fatos reais, concretos ou abstratos e a partir das ligações entre os fatos reconstrói a realidade.

Para estruturar o diagrama, algumas regras precisam ser seguidas:

- 1- Obter todas as informações, por exemplo, “aquilo que não aconteceu como de costume”;
- 2- Listar todos os fatos (causas ou consequências): são as causas e consequência que ocorreram ou que podem ocorrer;
- 3- Identificar o risco principal;
- 4- Construir a Série de Risco: ligação entre os fatos, estabelecendo a relação de causa-efeito;
- 5- Escolher os objetivos para evitar que o acidente venha a acontecer e formular as possíveis ações de prevenção – elencar as inibições dos fatos;
- 6- Discutir quais seriam as melhores soluções para controle de riscos.

As inibições são medidas técnicas ou administrativas que tem como objetivo mitigar ou prevenir o risco identificado.

As ligações entre os fatos ocorrem através de conexões lógicas E/OU e podem ocorrer de quatro formas. As figuras 20, 21 e 22 exemplificam o conceito dessas ligações.

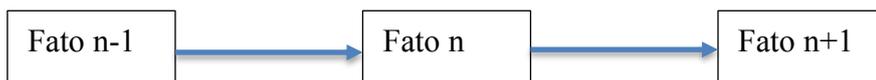


Figura 20: Sequência direta

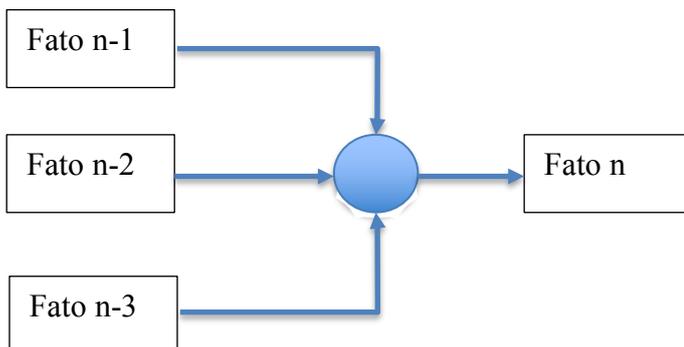


Figura 21: Diversos fatos conectados por uma conexão E/OU que tem como consequência o Fato n

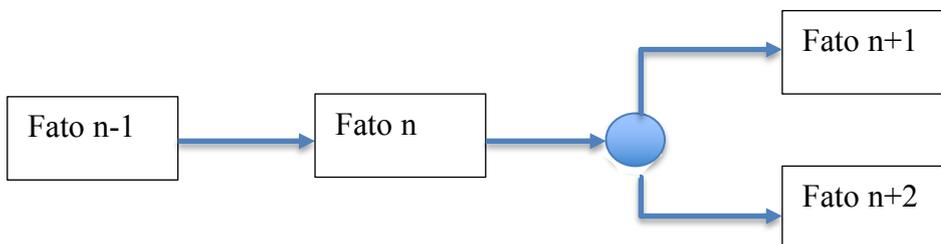


Figura 22: Consequências do Fato n conectadas por uma conexão E/OU

Desta forma, podemos construir a Série de Risco a partir de um Acidente ou Evento Principal, sendo precedido pelas causas imediatas, que serão originadas por outras causas contribuintes e assim deve-se seguir para trás até as suas causas básicas ou riscos iniciais. Por sua vez, o risco ou evento principal desencadeia a série de fatos consequentes, os quais são chamados de eventos catastróficos, conforme o exemplo apresentado na figura 23.

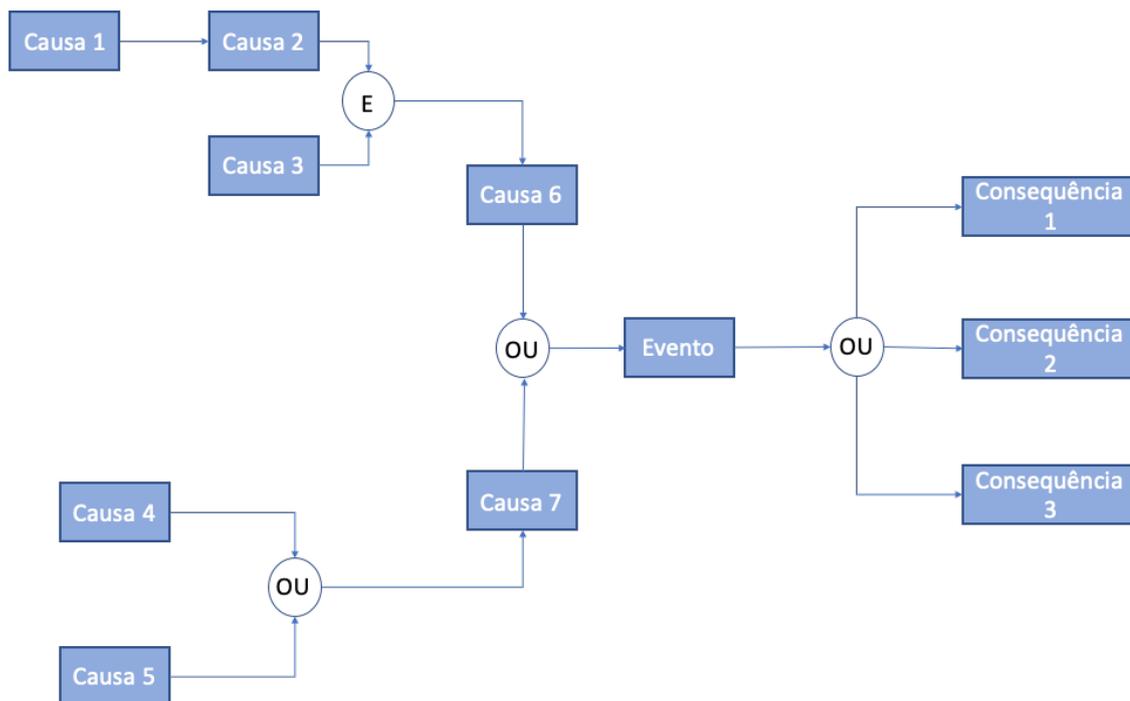


Figura 23: Esquema gráfico de uma série de riscos.

Na série de risco, quando for usado a conexão “E”, sabe-se que para um evento ser desencadeado é necessário que todos os eventos contribuintes aconteçam. Quando se usa a conexão “OU”, sabe-se que para que o evento aconteça, basta que uma das causas contribuintes ocorra. O mesmo vale para a ligação entre as consequências. Na Série de Risco, os Eventos Causa e os Eventos Consequência podem ter uma relação direta, sem a necessidade de usar uma das conexões “E” e “OU” entre os eventos.

Na análise, quando temos as conexões “OU”, os eventos que entram nesta conexão tornam-se prioridade na adoção de medidas para a redução do risco, pois basta que um destes eventos ocorra para que a série de eventos se propague.

Na série de risco, o evento catastrófico é chamado de Risco Principal, os Eventos Causa que antecedem o risco principal são chamados de causas ou riscos imediatos e os eventos que iniciam cada um dos ramos da série são os riscos iniciais.

A Série de Risco é uma metodologia muito semelhante a *Árvore de Falhas*, *Árvore de Eventos*, *Bow tie* e *Análise de Modos de Falhas e Efeitos*. Porém ela consegue reunir quase todas as boas características que as demais metodologias citadas. Na tabela 5 é apresentado um comparativo entre esses métodos.

Pelo fato da Série de Risco reunir em sua maioria os pontos fortes dos demais métodos, tornando-se um método completo para analisar riscos e acidentes de forma prática e

assim como o *Bow tie*, também é um método de fácil comunicação para as partes interessadas.

A Série de Risco é de fácil comunicação pois devido a forma que o método apresenta o resultado permite que as partes interessadas consigam ler e entender facilmente o que está sendo analisado.

Tabela 5: Comparativo entre os métodos

<b>Características</b>	<b>Série de Risco</b>	<b>Árvore de Falhas</b>	<b>Árvore de Eventos</b>	<b><i>Bow tie</i></b>
Análise qualitativa	SIM	SIM	SIM	SIM
Análise quantitativa		SIM		
Álgebra booleana	SIM	SIM		
Análise de causas	SIM	SIM		SIM
Análise de consequências	SIM		SIM	SIM
Analisa a série de eventos	SIM	SIM	SIM	
Medidas de controle	SIM			SIM

#### 4. METODOLOGIA

De acordo com Marconi et al (2010), a metodologia de pesquisa ocorre quando o pesquisador expõe os métodos de abordagem e os procedimentos utilizados, que são utilizados na construção de um trabalho de pesquisa científica.

Yin (2005) descreve as condições para a utilização dos cinco principais métodos de pesquisa, porém, para esta pesquisa iremos nos ater aos métodos pesquisa histórica, estudo de caso.

O objetivo deste trabalho é a análise de risco de rompimento de barragem de rejeitos pelo modo de liquefação, utilizando a metodologia Série de Risco já apresentada no Capítulo 3. Porém para conseguir realizar essa análise foi realizada uma pesquisa na área de geotecnia para poder compreender os fenômenos que podem levar ao rompimento de uma barragem de rejeitos. Buscou-se ainda um histórico de acidentes com rompimentos de barragem entre 1915 e 2019, para poder compreender mais sobre como estes acidentes podem ocorrer. Foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre artigos que estudaram acidentes de barragens. Estes artigos foram analisados para extrair questões geotécnicas, organizacionais e de fatores humanos.

Os relatórios técnicos dos acidentes das barragens Mount Polley (2014), Fundão (2015) e Barragem I (2019), serviu de apoio para obter informações de quais fatos influenciaram nestes acidentes. Já os pareceres técnicos pelos órgãos que analisaram os impactos ocasionados nesses acidentes, foram utilizados para servir de base para montar os cenários que esses acidentes podem gerar. Os impactos analisados nos acidentes da barragem de rejeitos do Fundão e a Barragem I foram: os socioambientais, financeiros e de credibilidade

Outra fonte de informações foram os materiais publicados pelos comitês de barragens internacional (ICOLD), Canadá e Austrália. Neles são apontados cuidados e modos de operação que uma mineradora deve ter com a barragem de rejeitos.

Para levantar os impactos financeiros ocorridos em um acidente de ruptura de barragem de rejeito, utilizou-se os acidentes da barragem do Fundão e Barragem I como base e para isso foi analisado o comportamento das ações da Vale na época dos acidentes.

Este trabalho também buscou utilizar as ferramentas de geoprocessamento para poder analisar o impacto que os acidentes do Fundão e Barragem I ocasionariam nas terras que foram tomadas pela onda de rejeitos. Para isso foram utilizadas imagens de satélite para

levantar o uso e ocupação das áreas impactadas. Essas imagens de satélite foram obtidas no site Earth Explorer.

As ferramentas de geoprocessamentos utilizadas foram Google Earth, QGIS e E-Cognition. O Google Earth foi utilizado para obter o polígono da área afetada pela onda de rejeito, além de auxiliar na classificação das áreas. O E-Cognition foi utilizado para realizar a classificação do uso e ocupação do solo nas regiões afetadas pela onda de lama. Já o QGIS, foi utilizado para processamento das imagens de satélite, tornando possível mensurar as áreas impactadas.

O geoprocessamento foi realizado seguindo as seguintes etapas:

1 – Obtenção das imagens do satélite LANDSAT 8 no site Earth Explorer, de um período antes e depois dos acidentes. As imagens foram montadas em falsa cor, usando as bandas 6/5/4.

2 – Delimitação do polígono da área afetada pela onda de rejeitos no Google Earth;

3 – Utilizando o QGIS, foi feito o recorte nas imagens de satélite para delimitar a área impactada;

4 – Com o resultado do recorte, foi feita a classificação do uso e ocupação do solo, utilizando o software E-Cognition; o Google Earth foi utilizado para identificação das áreas. ;

4.1 – Classificação a ser utilizada para identificar o uso e ocupação do solo da região afetada pelo acidente de Mariana em 2015:

- ✓ Influência Urbana;
- ✓ Agricultura;
- ✓ Pastagem;
- ✓ Vegetação Natural Florestal;
- ✓ Vegetação Natural Campestre;
- ✓ Corpos d'Água;
- ✓ Barragem;
- ✓ Areia.

4.2 – Classificação a ser utilizada para identificar o uso e ocupação do solo da região afetada pelo acidente de Brumadinho em 2019:

- ✓ Influência Urbana;
- ✓ Agricultura;
- ✓ Pastagem;

- ✓ Vegetação Natural Florestal;
- ✓ Vegetação Natural Campestre;
- ✓ Corpos d'Água;
- ✓ Barragem;
- ✓ Barragem de Água;
- ✓ Área Operacional;
- ✓ Área Administrativa.

A classificação utilizada para caracterizar as áreas impactadas nos dois acidentes, apresenta uma diferença porque as áreas afetadas pelos acidentes tinham diferentes características e usos. Por exemplo, no acidente da barragem do Fundão, as áreas operacional e administrativa não foram impactadas.

5 – No QGIS, foi realizado o cálculo das áreas de acordo com a classificação utilizada.

## 5. RESULTADOS

Este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira será apresentado a Série de Risco estruturada considerando um rompimento de barragem devido a liquefação e o resultado das análises das imagens do satélite Landsat 8. A segunda parte irá apresentar as medidas de inibição a serem empregadas na Série de Risco, objetivando a redução do risco de rompimento.

### 5.1. SÉRIE DE RISCO

A série de risco aplicada nesta parte do trabalho foi elaborada a partir de informações sobre acidentes descritas em relatórios técnicos e na literatura (Morgenstern et. al., 2016; Robertson et. al., 2019; ICOLD, 2001; Davies, 2002; Davies et. al., 2002; Van Niekerk e Viljoen, 2005; Caldwell e Charlebois, 2010; Lyu et. al., 2019; Baecher, 2018; Fourie et. al. 2001;). Isso mostra que há muito conhecimento na área de geotecnia sobre as causas que levam uma barragem a romper-se por liquefação, porem do ponto de vista do gerenciamento de risco, esse conhecimento é pouco explorado.

A Série de Risco deste estudo é apresentada na figura 24. Para facilitar a visualização, a série foi dividida em 4 partes (Figuras 25, 26, 33 e 48). A Série de Risco apresentada na figura 24, está apresentada no Apêndice deste trabalho em um tamanho maior que possibilita uma melhor visualização.

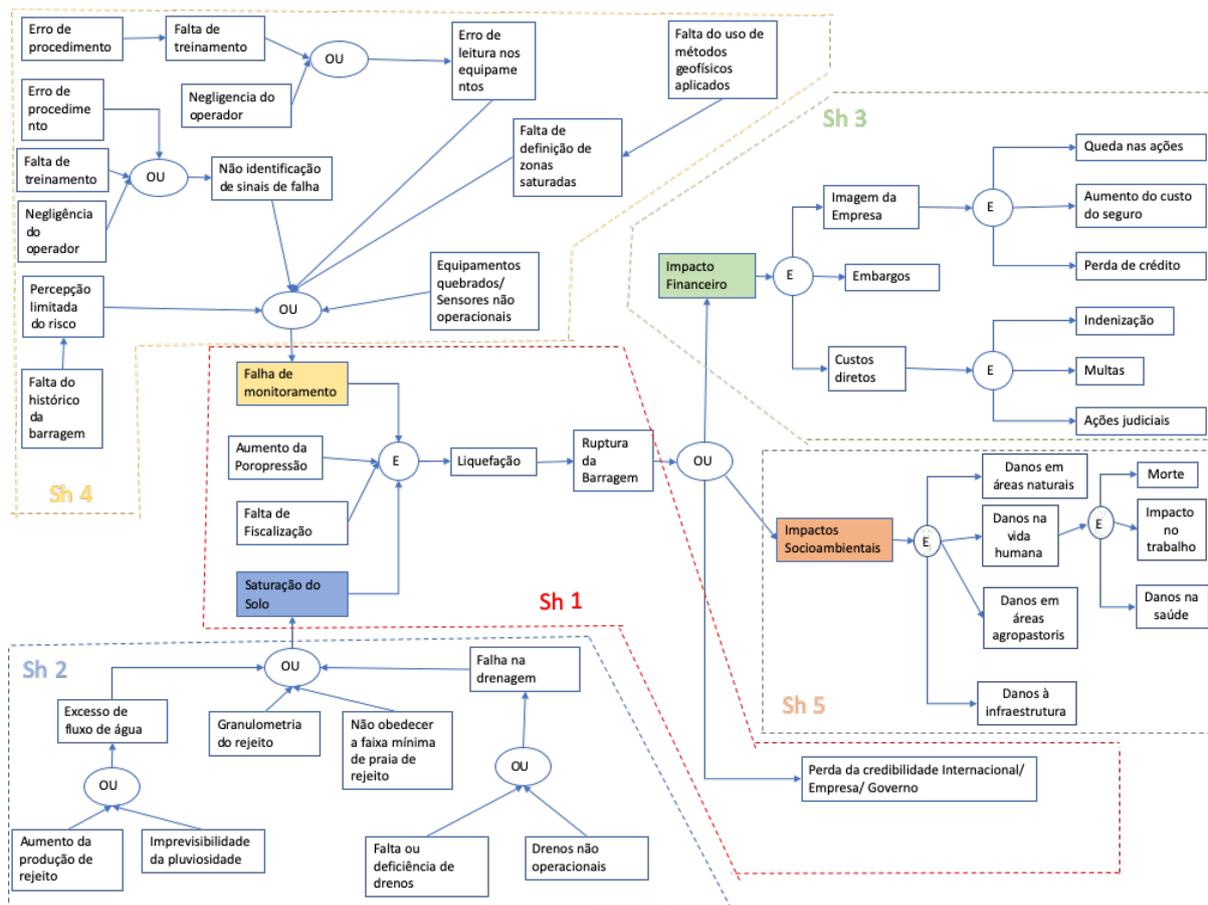


Figura 24: Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos.

O esquema 1 (Sh 1), apresentado na figura 25, ilustra o evento catastrófico ou risco principal (rompimento da barragem). São apresentados ainda as causas imediatas a liquefação com relação direta ao evento catastrófico e alguns dos demais riscos contribuintes que possuem relação com a liquefação. Entre esses riscos contribuintes, tem-se a saturação do solo, cujos riscos contribuintes são apresentados no esquema 2 (Sh 2) e no esquema 4 (Sh 4) temos os riscos contribuintes para a falha de monitoramento. A direita do risco principal, são apresentadas as consequências. Entre os eventos das consequências, os impactos financeiros são detalhados no esquema 3 (Sh 3) e os impactos ambientais são detalhados no esquema 5 (Sh 5)

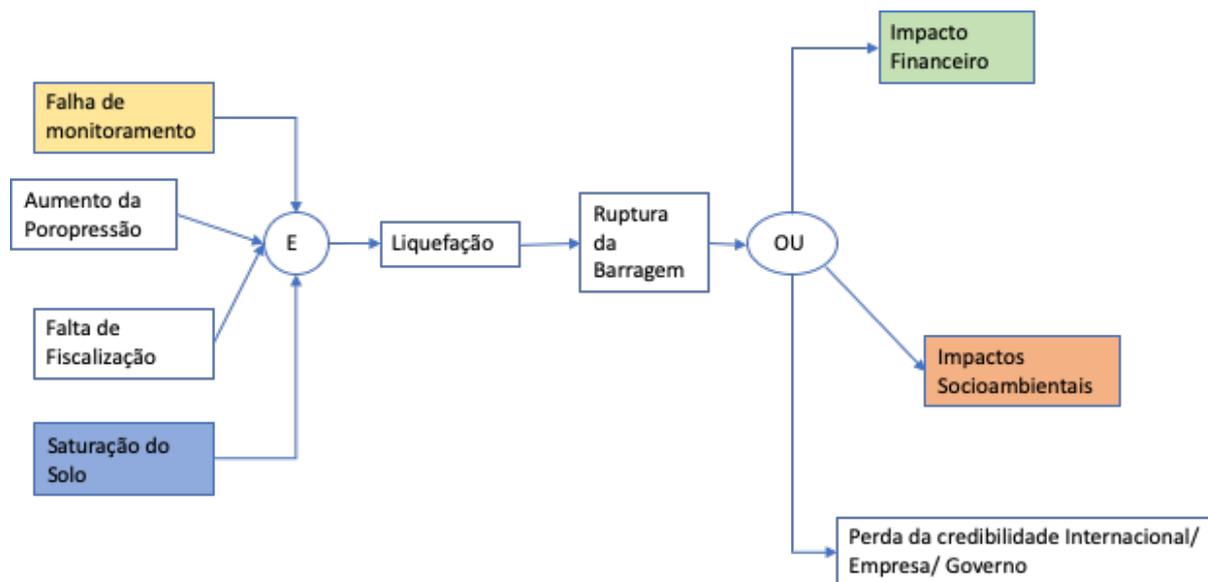


Figura 25: Esquema 1 (Sh 1) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos.

Liquefação - A liquefação é apontada como sendo uma das principais causas de rompimento de barragem (Rico et. al., 2008; Davies e Martin, 2002). Para esta série de risco, é considerado como causa imediata com relação direta. A liquefação é um fenômeno estudado desde a 1930 (Puri e KostECKI, 2013), no qual ocorre perda da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões sob solicitações não drenadas (Silva, 2010), devido a carregamentos cíclicos ou estáticos (Rafael, 2012).

Saturação do meio – A saturação se dá quando por alguma causa anterior a água penetra na estrutura da barragem, ocupando os espaços vazios. Essa saturação só é considerada uma falha, quando ela ocorre em regiões que não devem apresentar água.

Aumento da poropressão – O aumento da poropressão está associado a eventos tais como abalos sísmicos, podendo ser de origem natural (terremoto), ou devido ao trânsito de equipamentos ou explosões. Outra forma de aumento da poropressão seria devido a carga estática que é resultante da taxa excessiva de subida da barragem, injeção de água devido a falha de drenagem entre outras causas (Rafael e Romanel, 2014)

Como apontado, a taxa excessiva de alteamento é um dos gatilhos para que a liquefação ocorra e segundo Soares (1998 apud Castro 2008), restringe o alteamento para barragens construídas com o método a montantes a uma altura recomendável de menos de 5 a 10 m/ ano. Morgenstern et. al., 2016 aponta uma taxa de 15,7 m/ano para a barragem do Fundão.

Perda de credibilidade internacional/ empresa/ governo – A empresa quando sofre um acidente de grandes proporções perde a sua credibilidade no mercado nacional e internacional. A Vale, após Brumadinho terá como desafio a recuperação dessa credibilidade para recuperar o seu valor no mercado.

A credibilidade do governo é questionada quando acidentes de grandes proporções ocorrem devido ao tempo de resposta longo e o suporte prestado a população atingida no acidente. Uma vez constatado omissão do governo, tanto na fiscalização quanto no processo de licenciamento, o governo passa a ter a sua credibilidade questionada, já que em seus processos de licenciamento não é confiável.

Após o acidente de Brumadinho em 2019, a Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais (CGE-MG) realizou uma auditoria para verificar os processos administrativos de licenciamento ambiental, entre os anos 2007 e 2017. Como conclusão, a CGE-MG, identificou diversas não conformidades. Dentre as não conformidades, observou-se a ineficiência da gestão da barragem por parte da FEAM, uma vez que auditores independentes estipularam recomendações recorrentes, nas quais foram utilizadas as seguintes palavras-alertas: liquefação, drenagem, percolação. Outro ponto que chamou a atenção, foi a identificação da fragilidade na instrução processual relacionadas à ausência de normativos que estabeleçam obrigatoriedade da instrução de documentos pertinentes à segurança estrutural de barragens de contenção de rejeito nos processos de licenciamento, o que acarretou no deferimento de licenças ambientais para a Barragem I, sem que tivessem sido observados indícios de comprometimento estrutural da barragem. (CGE-MG, 2019). Estas constatações evidenciam a baixa qualidade presente nos órgãos governamentais.

Falta de Fiscalização – Uma vez que a licença ambiental tenha sido emitida, cabe ao órgão exercer o seu papel de fiscalizador para assegurar que tal atividade licenciada não venha a causar danos ambientais acima dos aceitos na legislação. Uma vez que há a omissão do órgão como agente de controle, esta falta de fiscalização irá alterar a percepção do risco o que pode vir a gerar eventos que irão contribuir para que os acidentes aconteçam.

O esquema 3 (Sh3) apresentado na figura 26, ilustra os eventos consequência relacionados aos impactos ao meio ambiente.

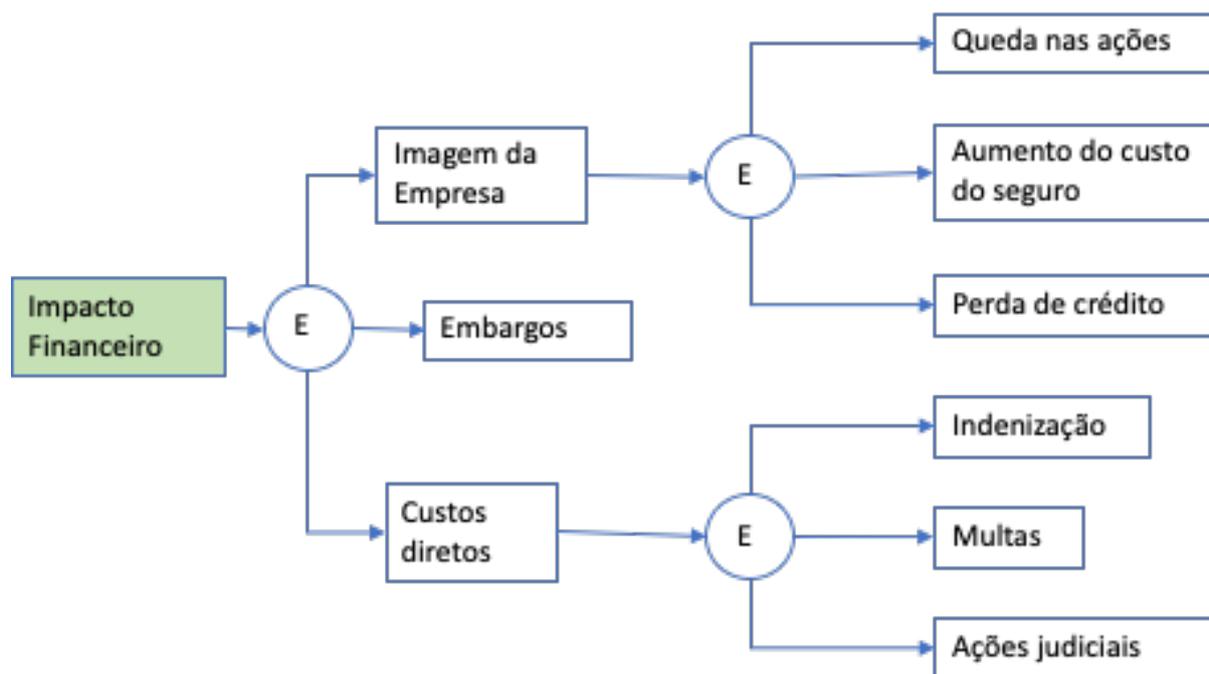


Figura 26: Esquema 3 (Sh 3) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos.

### 5.1.1. Impacto Financeiro

Depois de um acidente de grande magnitude, a empresa responsável, irá ter custos que afetará o caixa da empresa. A empresa terá que arcar com custos diretos que podem ser as multas, indenizações e ações judiciais, pode sofrer embargo e a imagem da empresa será afetada, sendo percebida com a queda das ações, aumento do custo do seguro e perda de crédito.

Caso as atividades forem embargadas, ela deixará de ter lucro e terá que lidar com os custos com o dinheiro em caixa, além do impacto que terá no mercado financeiro com a queda no valor das ações. De acordo com Volpato & Tavares (2016), a Samarco, após o acidente em Mariana, adquiriu um prejuízo contábil após o acidente, em que o seu patrimônio líquido ficou negativo, ou seja, mesmo que a empresa liquidasse os seus ativos, ainda não seria o suficiente para liquidar o passivo adquirido.

Dentre os impactos financeiros, podemos afirmar que as multas, indenizações e ações judiciais geram custos diretos ao caixa da empresa.

Multas – Entre as leis ambientais existentes, a Lei de Crimes Ambientais (LEI nº 9.605/98) e a Lei Federal n. 9.605, de fevereiro de 1998, que norteiam como penalizar as empresas. Os órgãos ambientais, com base na Lei de Crimes Ambientais, têm autonomia para lavrar uma multa por danos causados ao meio ambiente.

De acordo com a Lei de Crimes Ambientais, em seu art. 23 inciso II, é obrigação da empresa que causou o impacto ambiental custear as obras de recuperação da área degradada.

Podemos perceber que no Brasil, quando uma empresa é multada por dano ambiental, é desencadeado um processo, que além da multa, ocasionará outros custos.

Custos de Indenização - Os custos de indenização irão variar de acordo com a legislação do país. As empresas são obrigadas a indenizar a população afetada. Pode ser o custo do imóvel atingido ou, no caso de pescadores, quando atingidos, a legislação obriga que a empresa pague a eles um valor mensal para substituir o período que não poderão pescar devido ao impacto causado.

Ações Judiciais – Após acidentes de grande escala, tais como os ocorridos em Mariana e em Brumadinho, geram ações na justiça. Essas ações normalmente são abertas por pessoas que foram lesadas de alguma forma pelos acidentes.

Impacto na imagem da empresa – A imagem da empresa fica prejudicada, levando a uma perda de seu valor nas suas ações no mercado financeiro, o seguro aumenta e a perda de crédito.

Aumento do custo do seguro – É sabido que empresas que apresentam em seu histórico acidentes de grandes proporções, possui um valor mais alto na contratação dos seguros. Isso ocorre devido a ineficiência da empresa no gerenciamento dos seus riscos.

Perda de crédito – Após eventos catastróficos, agências de classificação de risco pioram a avaliação da empresa, fazendo com que o custo dos empréstimos fique mais caros.

Queda no valor das ações - Após os rompimentos das barragens em Mariana e em Brumadinho, a empresa VALE S.A., uma das sócias do consórcio responsável pela barragem da barragem do Fundão e a responsável direta pela barragem em Brumadinho, sentiu o efeito dos acidentes com queda no valor das ações. As figuras 28 e 29 apresenta a reação dos investidores que operam com as ações preferenciais, receberam a notícia do rompimento de Brumadinho de forma negativa, fazendo com que as ações da Vale iniciassem a semana do dia 28/01/2019 com um *Gap*.

O *Gap* é a distância que existe entre um *candle* e outro, quando há uma diferença entre os valores máximos e mínimos que possa causar um espaço em branco. Esse comportamento ocorre sempre após algum evento bom ou ruim para o mercado, no qual os acionistas, por alguma razão irão demonstrar uma confiança ou desconfiança maior sobre a empresa.

O *candle* (figura 27) é o nome dado ao símbolo utilizado no gráfico que é muito utilizado no mercado de ações. O formato lembra uma vela, neste símbolo, é possível ler a variação do valor da ação no período analisado. Cada *candle* trará de informação o valor de abertura e o de fechamento da ação e os valores máximo e mínimo do período analisado.

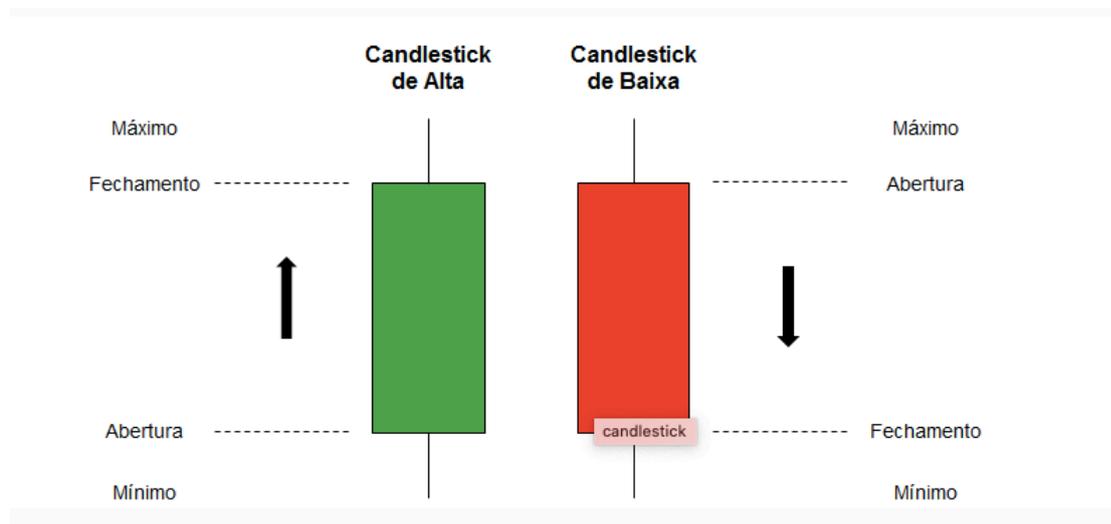


Figura 27: *Candle* de alta e de baixa



Figura 28: Ações VALE3 negociadas na escala de tempo diário na época do acidente da Barragem IV em 2019.

andrepbatista publicado no TradingView.com, Outubro 01, 2019 14:50:02 EST

BMFBOVESPA\_DLY:VALE3, 1W 47.79 ▲ +0.04 (+0.08%) O:47.65 H:48.88 L:47.21 C:47.79



Figura 29: Ações VALE3 negociadas na escala de tempo semanal na época do acidente da Barragem I em 2019.

Já a reação dos investidores na ação VALE3, quando houve o acidente da barragem do Fundão (Mariana), também negativa. Na época, como podemos ver na figura 30, a ação vinha com uma tendência de queda de 3 dias, porém no dia seguinte, na abertura da Bolsa de Valores, a ação abriu com um *Gap*.

andrepbatista publicado no TradingView.com, Outubro 01, 2019 14:59:58 EST

BMFBOVESPA\_DLY:VALE3, 1D 47.81 ▲ +0.06 (+0.13%) O:47.85 H:48.88 L:47.66 C:47.81

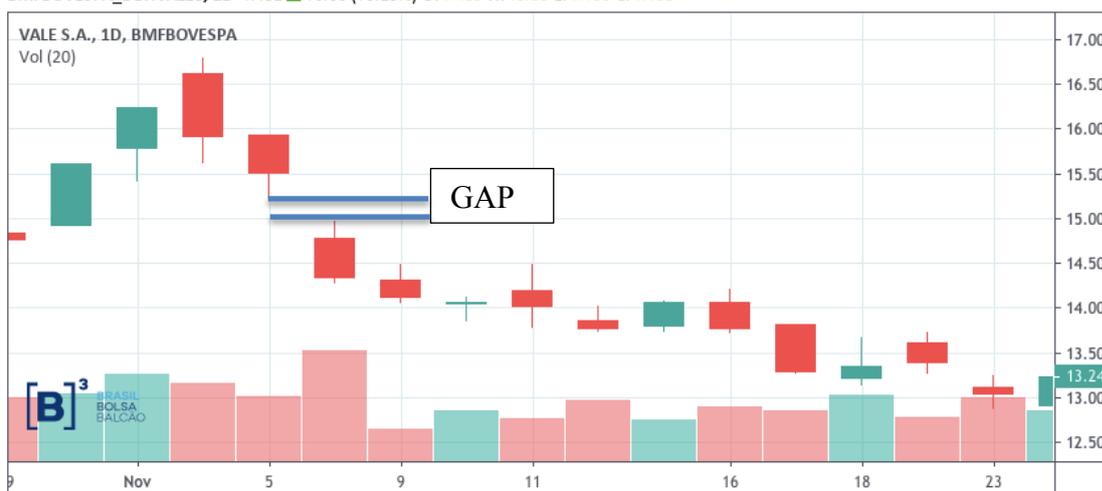


Figura 30: Ações VALE3 negociadas na escala de tempo diário na época do acidente da Barragem do Fundão em 2015.

Embargo - Devido a legislação ambiental (Lei de Crimes Ambientais nº 9.605 de 1998), quando alguma atividade causa algum acidente, por questões legais, a empresa pode ter as suas atividades paradas por exigência de algum órgão do governo.

Com o acidente em Brumadinho, por mais que a Mina Córrego do Feijão representasse aproximadamente 2,3% (Vale, 2017) da produção da Vale, o evento fez com que a empresa tivesse um impacto maior em sua produção. Segundo o CFO da Vale, Luciano Siani, a estimativa da empresa antes do acidente era de uma produção de 400 milhões de toneladas por ano de minério de ferro, contudo por decisão da empresa e por ordens judiciais houve uma diminuição de capacidade produtiva de 93 milhões de toneladas/ano. (EXAME, 2019).

Na figura 31, podemos ver como a ação VALE3 em um período de 5 anos (até outubro de 2019), na escala semanal, se comportou. Antes do acidente ocorrido em novembro de 2015, a ação vinha com um movimento de tendência de baixa e o acidente provavelmente fez com que a baixa se mantivesse até o final de 2015, entre 2016 a setembro de 2018, a ação teve uma alta. Esse resultado financeiro foi consequência de medidas tomadas quando em abril de 2017, Fabio Schvartsman assumiu a presidência da Vale. Nesse período houve a redução do prejuízo recorde de R\$ 44,2 bilhões e conseguiu acumular um lucro de R\$ 11,7 bilhões. No mesmo período foi capaz de diminuir a dívida de R\$ 104,9 bilhões para R\$ 10,7 bilhões. Outra medida tomada por ele foi converter as ações preferenciais (são as ações com prioridade na distribuição de dividendos), em ações ordinárias (com direito a voto na assembleia). Esta medida fez com que a participação que o governo detinha, foi diluída. Com as medidas adotadas novos investidores foram atraídos. (UOL, 2019). O rompimento e as decisões tomadas tanto pela empresa e as impostas por ordem judicial, podem ter contribuído para que a ação não voltasse a subir, levando o papel a um período de indecisão.



Figura 31: Ações da Vale em um período de 5 anos.

O esquema 2 (Sh2) apresentado na figura 32, ilustra os riscos que contribuíram para que ocorresse a saturação do material empregado na construção da barragem.

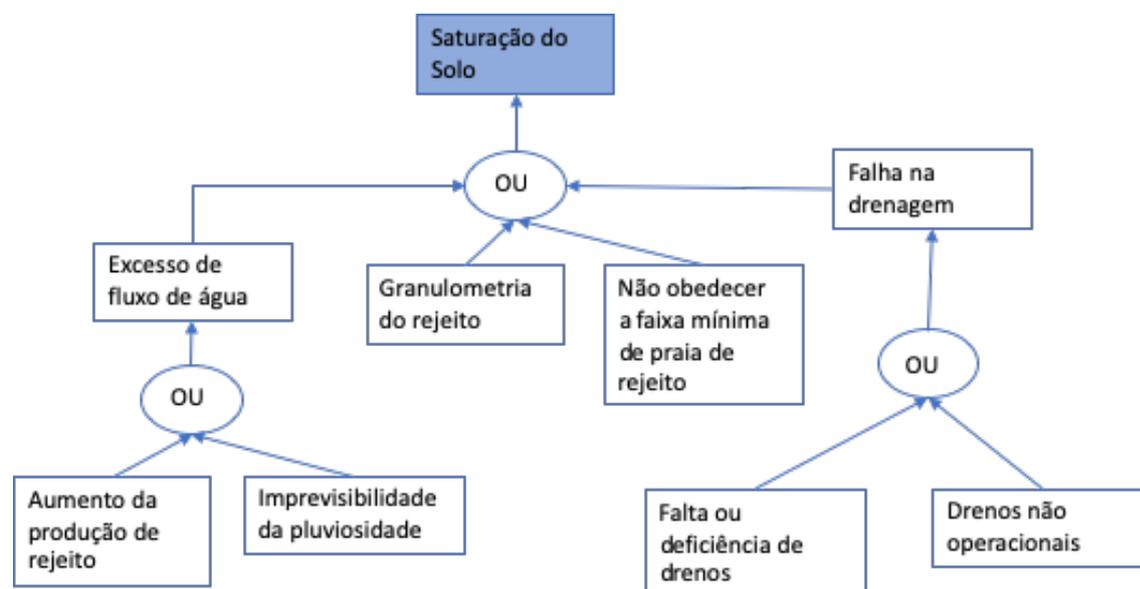


Figura 32: Esquema 2 (Sh 2) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos.

Granulometria do rejeito – Ao longo da vida útil da barragem de rejeitos, a qualidade do material depositado varia. A granulometria do rejeito irá influenciar em diversos aspectos na barragem, um deles é o entupimento dos drenos pelos grãos finos e na permeabilidade. A parcela de finos também contribui para o efeito de liquefação, pois quando saturado por água, essa combinação de finos e água se torna em um material pastoso com baixa resistência ao

cisalhamento. Um outro efeito apontado por Santamarina, Torres-cruz e Bachus (2019) é o efeito de cimentação, que caso ocorra irá contribuir para o efeito de liquefação. Já que este fenômeno causa uma perda da estrutura dos sedimentos, que pode fazer a barragem colapsar durante um carregamento ou no evento de um gatilho sísmico ou falha da barragem.

Imprevisibilidade da pluviosidade - Devido as mudanças climáticas, a previsibilidade dos eventos de alta pluviosidade se tornou difícil. Os estudos de mudanças climáticas apontam para tendências de seca ou de aumento da pluviosidade (IPCC, 2014).

Os estudos realizados pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), aponta para uma tendência de aumento da precipitação para a região sudeste. O Estado de Minas Gerais, se localiza nessa região e concentra 365 barragens (ANM, 2017). As empresas de mineração precisam mapear os riscos climáticos a que estão expostas.

Não obedecer a distância mínima da praia de rejeitos– A praia de rejeitos tem como objetivo manter a água distante do maciço. Quando as empresas não obedecem a essa distância mínima, o risco de o maciço sofrer com infiltrações, resulta no aparecimento de zonas de saturadas q eu não deveriam estar. Morgenstern et. al., 2016 ressalta que o projeto da barragem do Fundão previa uma distância mínima de 200 metros de praia de rejeitos, porem em alguns momentos essa distância não foi obedecida chegando a ter até 60 metros.

Aumento da Produção de Rejeitos – Durante o beneficiamento do minério, a água é utilizada no processo. O rejeito é um dos resultados da etapa de beneficiamento, sendo composta de água e da fração sem valor econômico do minério e água. Quando ocorre um aumento na produção, o aporte de rejeito dentro da barragem aumenta. Resultando no incremento de água no interior da barragem.

Drenos não operacionais - Os drenos são uma medida importante para evitar o acúmulo de água em alguma parte do maciço da barragem. Como dito por Morgenstern et. al. (2016), no conceito da barragem do Fundão, uma drenagem adequada era uma peça chave.

Falha na construção dos drenos - Por algum erro na hora da construção dos drenos, eles se tornaram não operacionais depois da obra entregue.

Entupimento dos drenos - Os drenos podem vir a ficar entupidos devido ao acúmulo de sedimento ou então porque alguma coisa está bloqueando a saída do dreno.

O esquema 5 (Sh5) apresentado na figura 33 ilustra os eventos consequência relacionados aos impactos ao meio ambiente.

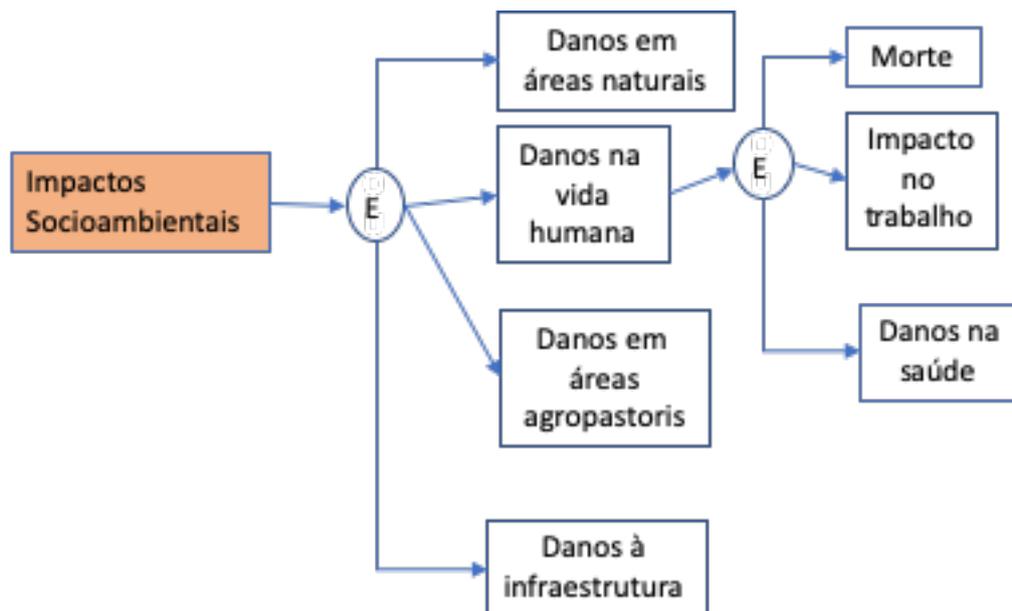


Figura 33: Esquema 5 (Sh 5) da Série de Riscos de rompimento de barragem de rejeitos.

Impacto ao meio ambiente - O rompimento da barragem de rejeito gerará uma onda de lama, que dependendo da distância percorrida, irá impactar diversas áreas e seres vivos.

Danos em áreas naturais - É o impacto causado na flora, fauna, rios etc.

Danos à infraestrutura - É o impacto que a onda de lama pode causar nas áreas construídas. No caso da barragem do Fundão, a lama tomou conta do distrito Bento Rodrigues. As figuras 34, 35 e 36 mostram o distrito antes do acidente e depois do acidente. Como pode ser observado, o distrito ficou completamente destruído e 4 anos após o acidente é possível notar que a natureza já está se recuperando nesse local.

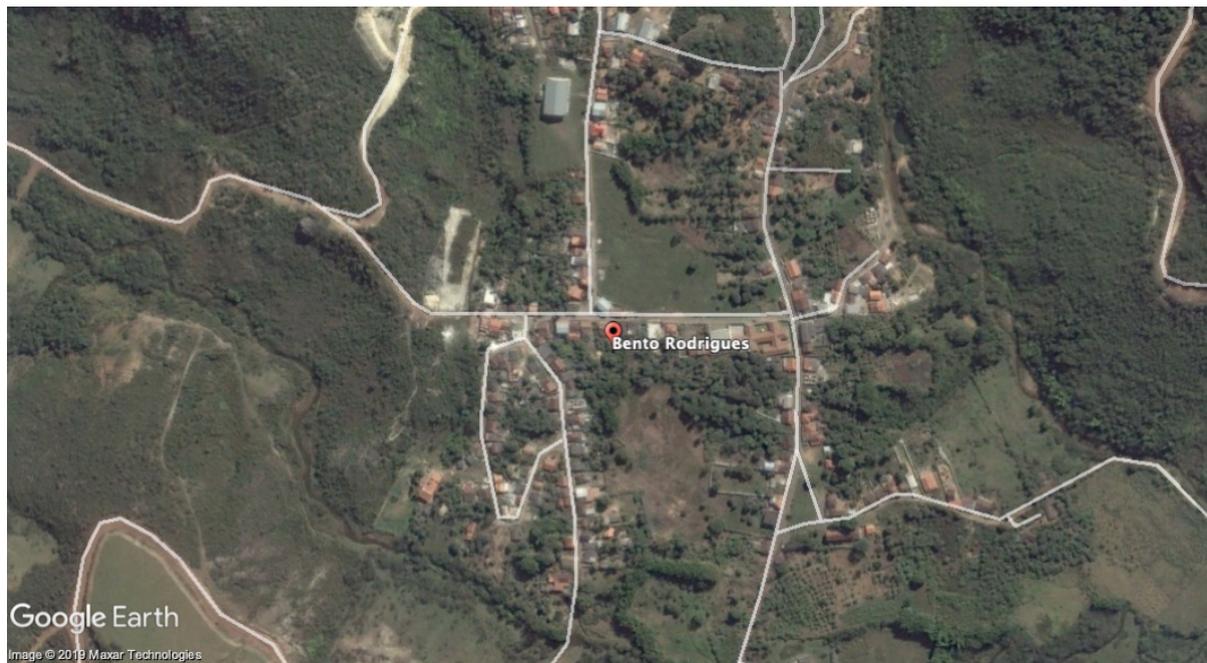


Figura 34: Mostra o Distrito de Bento Rodrigues/MG, antes de ser tomada pela lama. A imagem é de 20/07/2015.



Figura 35: Distrito de Bento Rodrigues/MG, completamente tomado pela lama. Imagem de 24/12/2015.

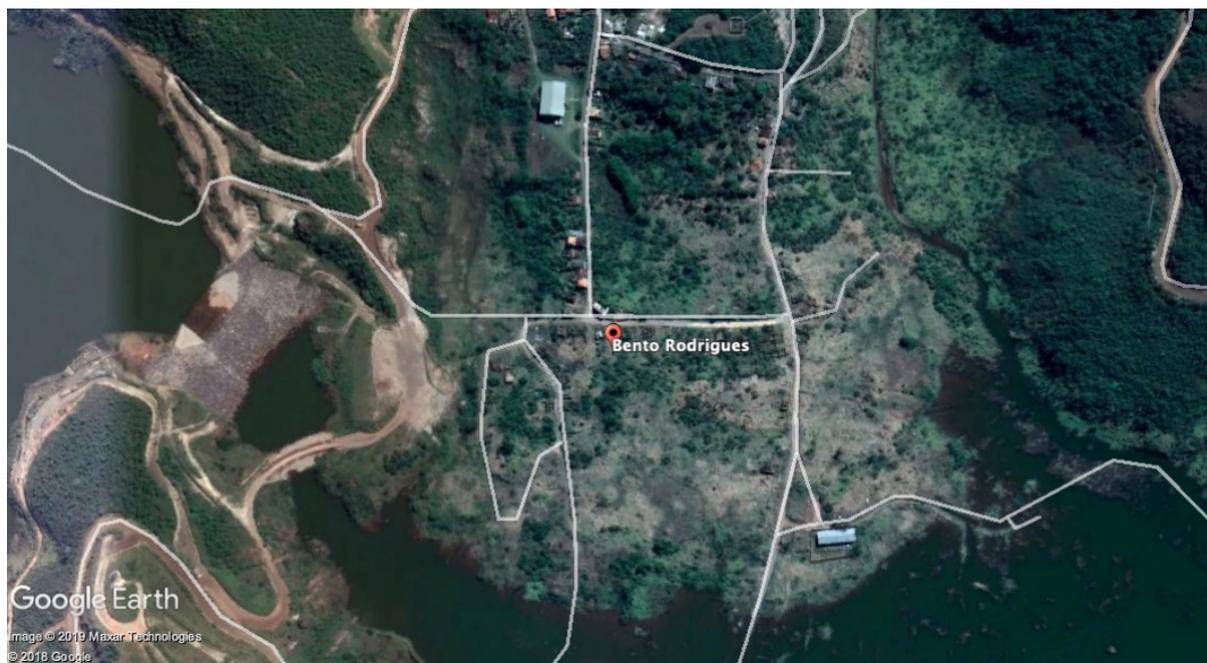


Figura 36: Mostra a natureza se recuperando no local do Distrito Bento Rodrigues, imagem de 01/07/2019.

Danos em áreas agropastoris – Na hipótese de a onda de lama atingir áreas agrícolas ou de pecuária, estas poderão tornar-se terras impróprias para a exploração agropastoril.

A partir do processamento das imagens de satélites, foi possível elaborar os mapas de uso e ocupação das áreas impactadas pelo rejeito liberado nos acidentes da Barragem do Fundão (2015) e da Barragem I (2019).

O resultado obtido é muito semelhante ao trabalho de Mapa de Inundação, exigido pela Agência Nacional de Mineração na Portaria No 70.389, DE 17 DE MAIO DE 2017. Nele, o empreendedor simula o rompimento da barragem para poder conhecer o cenário que será impactado. Nas Figuras 37 e 43 são apresentados os mapas elaborados para avaliar as áreas impactadas nos acidentes do rompimento das barragens do Fundão e Barragem I.

Como a área impactada nos acidentes foi muito grande, no acidente da barragem do Fundão a área total analisada foi de 2.382,03 ha enquanto que a área da Barragem I foi de 279,47 ha, foi preciso dividir o mapa em diversas áreas. Essa divisão usando como critério a escala que melhor se adequava para a apresentação dos mapas. Para ilustrar a área total (figura 43) da Barragem do Fundão, a escala utilizada foi de 1:255.000, já as demais figuras 38, 39 e 40 são os perfis que mostram a divisão realizada em uma escala que permite observar com mais detalhes as áreas atingidas pelo acidente da barragem do Fundão. A figura 41 mostra a área impactada do acidente da Barragem I, que também teve a sua área dividida em três perfis com as escalas mais adequadas para não perder os detalhes.

Em todas as figuras, da 38 a 40, foram utilizados pontos de referencia para auxiliar a leitura entre os perfis exibidos, para poder orientar o leitor entre as mudanças de perfis.

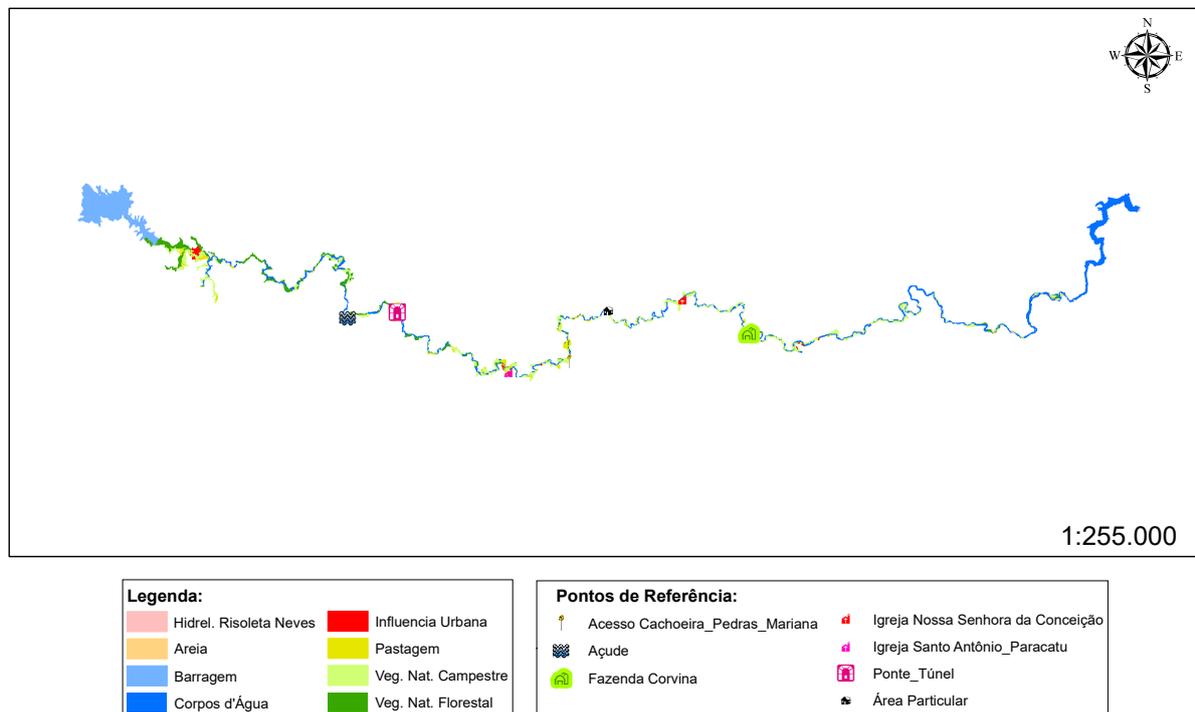


Figura 37: Visão geral da Barragem do Fundão até a Hidrelétrica Risoleta Neves.

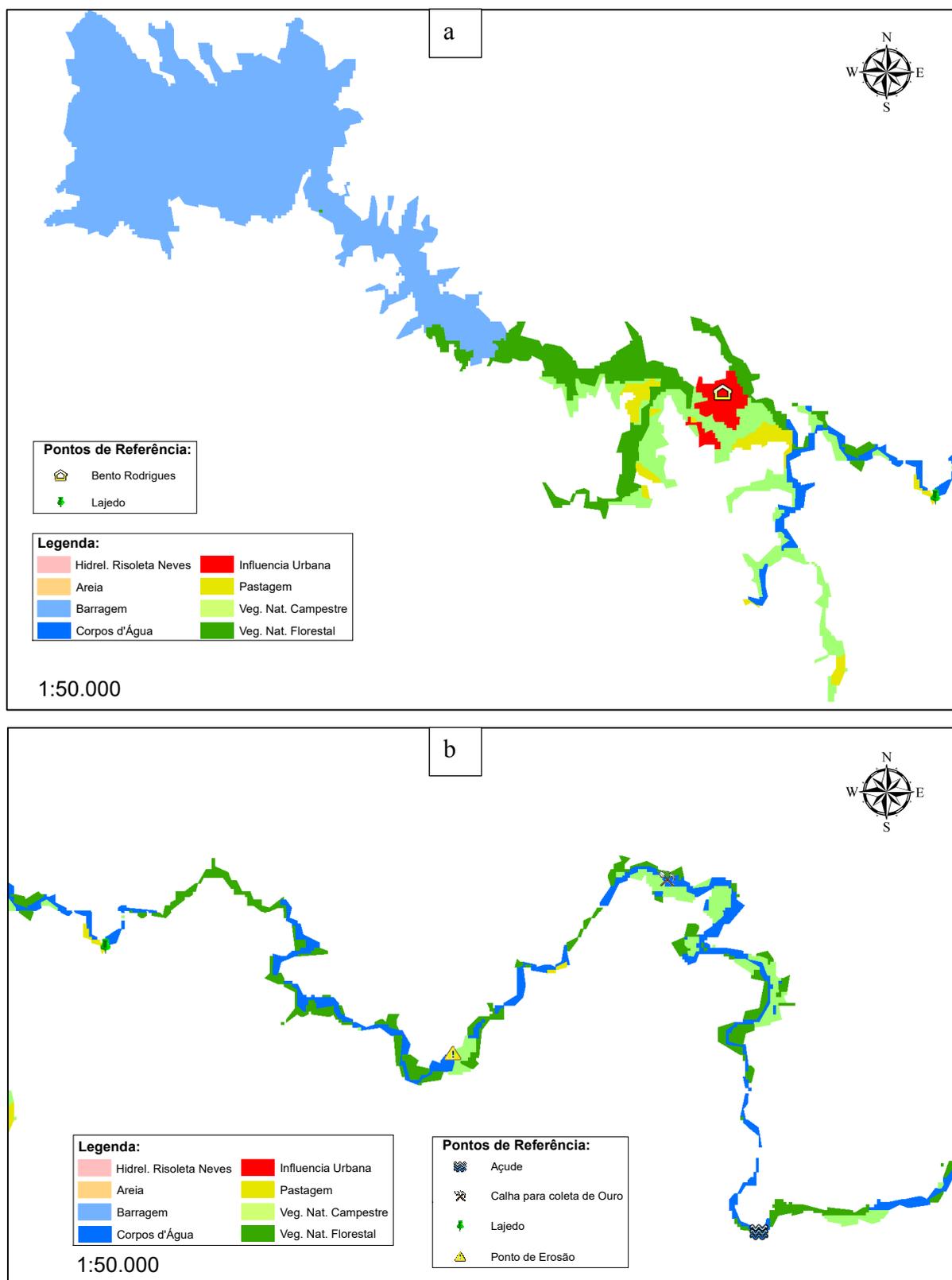


Figura 38: a) Mostra o complexo de barragens Fundão, Santarém e Germano; b) Mostra o primeiro rio impactado o Gualaxo do Norte.

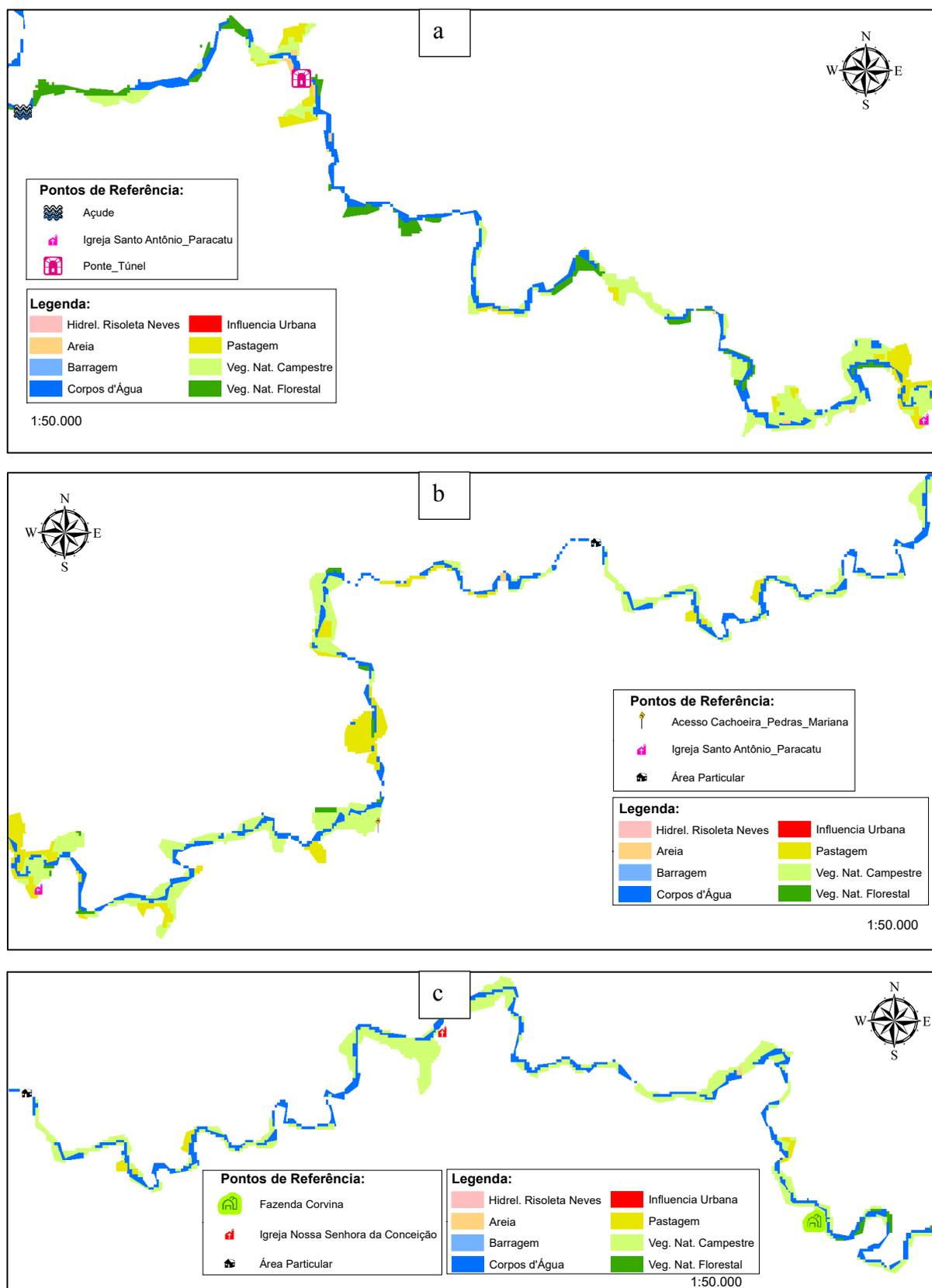


Figura 39: a, b e c) Mostram a o trajeto percorrido pelo rejeito nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Rio Doce.

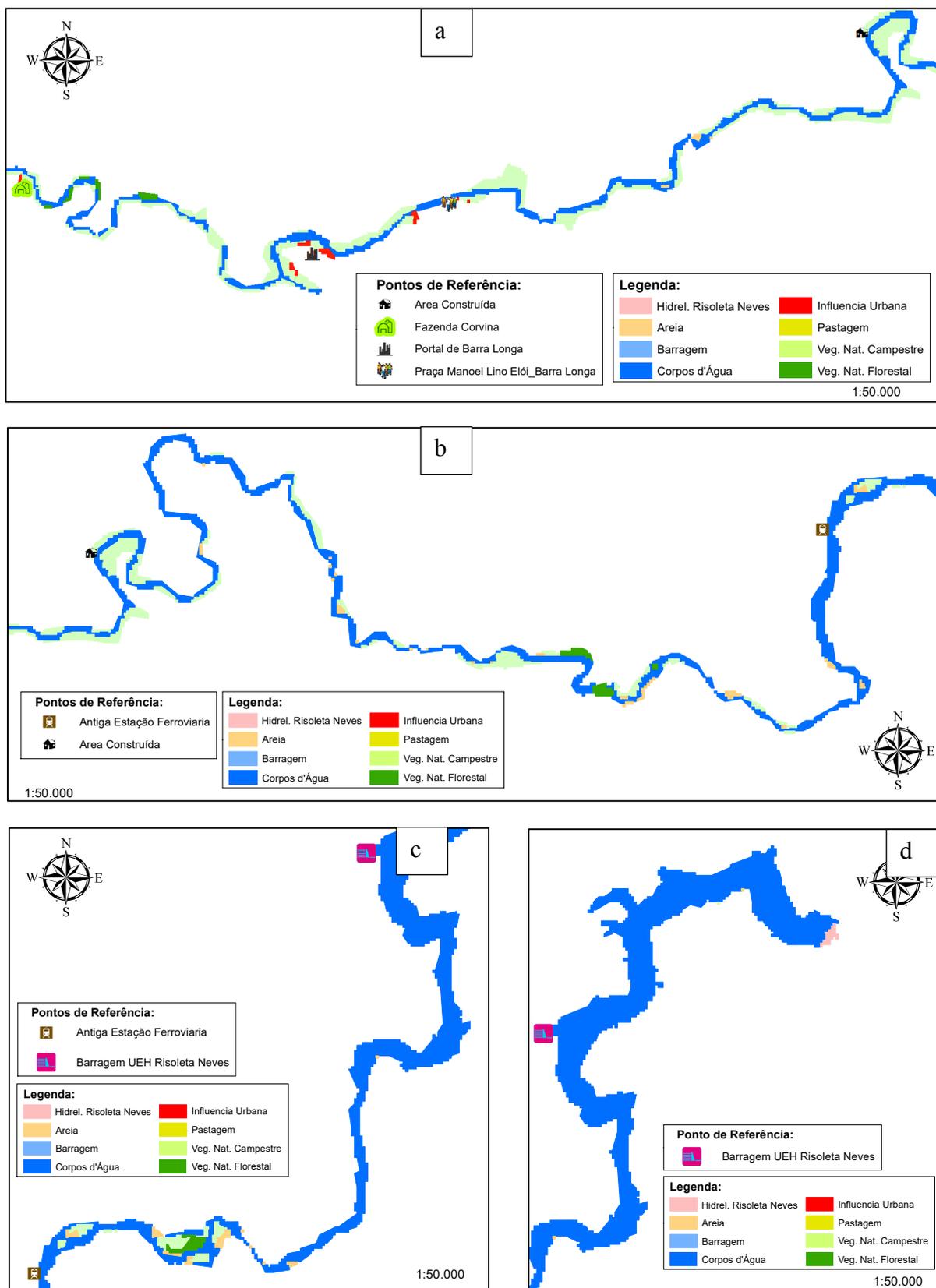


Figura 40: a, b e c) Mostram o percurso dos rejeitos no rio Doce até chegar no início da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves; d) Mostra a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves.

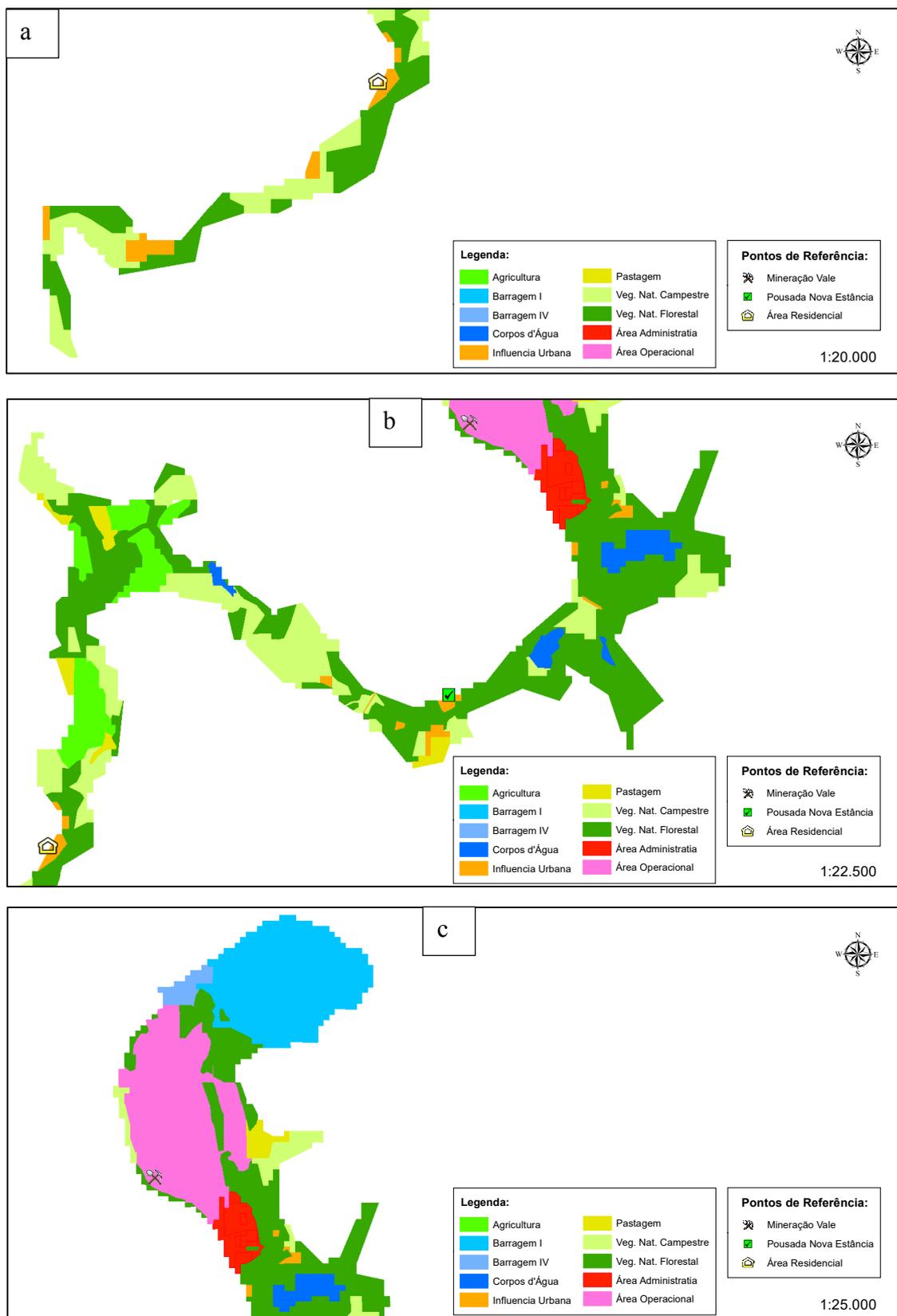


Figura 41: Mapa das áreas atingidas pela lama no acidente Barragem I em 2019: a) área impactada antes de atingir o rio Paraopeba; b) áreas naturais, agrícolas, pastagem e de influência urbana impactadas; c) destaque a área administrativa da Vale incluindo refeitório.

A partir dos mapas de uso e ocupação foi possível obter as áreas que foram impactadas nos acidentes. Na análise das informações foi verificado a área total impactada, assim como a representação de cada classe em relação ao total. Os resultados são apresentados em duas tabelas, uma para cada acidente, sendo a tabela 6 para o acidente da barragem do Fundão e a tabela 7 para o acidente da Barragem I.

Tabela 6: Áreas afetadas pelo acidente em Mariana/MG

Classificação	Área (ha)	Porcentagem
Influencia Urbana	39,33	1,65%
Pastagem	100,98	4,24%
Veg. Nat. Florestal	254,34	10,68%
Veg. Nat. Campestre	509,72	21,40%
Corpos d'Água	912,42	38,30%
Barragem	549,45	23,07%
Areia	15,80	0,66%
Total	2.382,03	

Tabela 7: Áreas afetadas pelo acidente em Brumadinho/MG

Classificação	Área (ha)	Porcentagem
Influência Urbana	6,61	2,37%
Agricultura	17,12	6,13%
Pastagem	7,73	2,77%
Veg. Nat. Florestal	126,38	45,22%
Veg. Nat. Campestre	57,39	20,54%
Corpos d'Água	7,72	2,76%
Área Operacional	49,76	17,81%
Área Administrativa	6,76	2,42%
Total	279,47	

Como se apresenta nas tabelas 6 e 7, em relação ao uso e ocupação das terras, as áreas com vegetação florestal e campestre foram as mais impactadas, mais de 60% em ambos os acidentes. A restauração ecológica dessas áreas afetadas pode ser realizada utilizando técnicas de recuperação de áreas degradadas (recuperação natural, plantio direto). Porém, mais de 10% da área impactada era de ocupação humana, para diversos fins econômicos ou para moradia. Ao compararmos as áreas impactadas, apesar da área destinada a ocupação

humana ser menor parte afetada do que área de vegetação florestal ou campestre, os custos envolvidos na reparação na área de ocupação humana podem ser muito superiores. Esse custo se deve a população que perdeu suas casas e seus meios de trabalho. Porém deve-se frisar que o maior impacto nesses 10% é a perda de vidas humanas.

Das áreas de influência urbana no acidente da barragem do Fundão em 2015, cerca de 200 edificações no distrito de Bento Rodrigues foram soterradas (MTPS, 2016). Carmo et. al. (2017) afirma que 40% das edificações de Paracatu de Baixo também foram destruídas. Ainda de acordo com (MTPS, 2016), a prefeitura de Mariana informou um prejuízo de cerca de R\$100 milhões em infraestrutura.

As cidades que tinham o abastecimento da água pelos rios impactados tiveram que interromper o fornecimento, como exemplo, o município Governador Valadares, que possui uma população de aproximadamente 276 mil de habitantes e que teve o abastecimento retomado dias depois (MTPS, 2016).

O acidente da barragem do Fundão é considerado o pior desastre ambiental do Brasil, no segmento da mineração (Garcia et. al., 2017), impactando flora e fauna. No impacto a flora, dentre as áreas de vegetação nativa, regiões ripárias, protegidas pelo Novo Código Florestal (Lei Federal no 12.651/2012) foram impactadas (figura 44), indivíduos arbóreos de pequeno porte e o sub-bosque foram soterrados (IBAMA, 2015).



Figura 42: Impacto da lama em zonas ripárias  
Fonte IBAMA (2015)

O IBAMA (2015) aponta também impactos na fauna, porém, devido ao impacto causado nos rios atingidos (Gualaxo do Norte, Carmo e Doce), é consenso que, toda a ictiofauna tenha sido impactada profundamente, sendo que nessa região existiam 80 espécies nativas. Dentre elas, 11 eram classificadas como ameaçadas de extinção e 12 eram endêmicas do rio Doce.

Devido à alta turbidez da água, acima dos níveis legais (100 NTU), levou a mortandade dos peixes (figura 43). A turbidez na água dificulta a penetração da luz no corpo hídrico, impedindo o processo de fotossíntese do fitoplâncton, e resultando em uma diminuição no oxigênio dissolvido. A figura 44 apresenta os níveis de turbidez nos pontos de monitoramento feitos pela Agência Nacional de Água (ANA), no rio Doce.



Figura 43: Mortandade de peixes  
Fonte Pesca Amadora (2015)

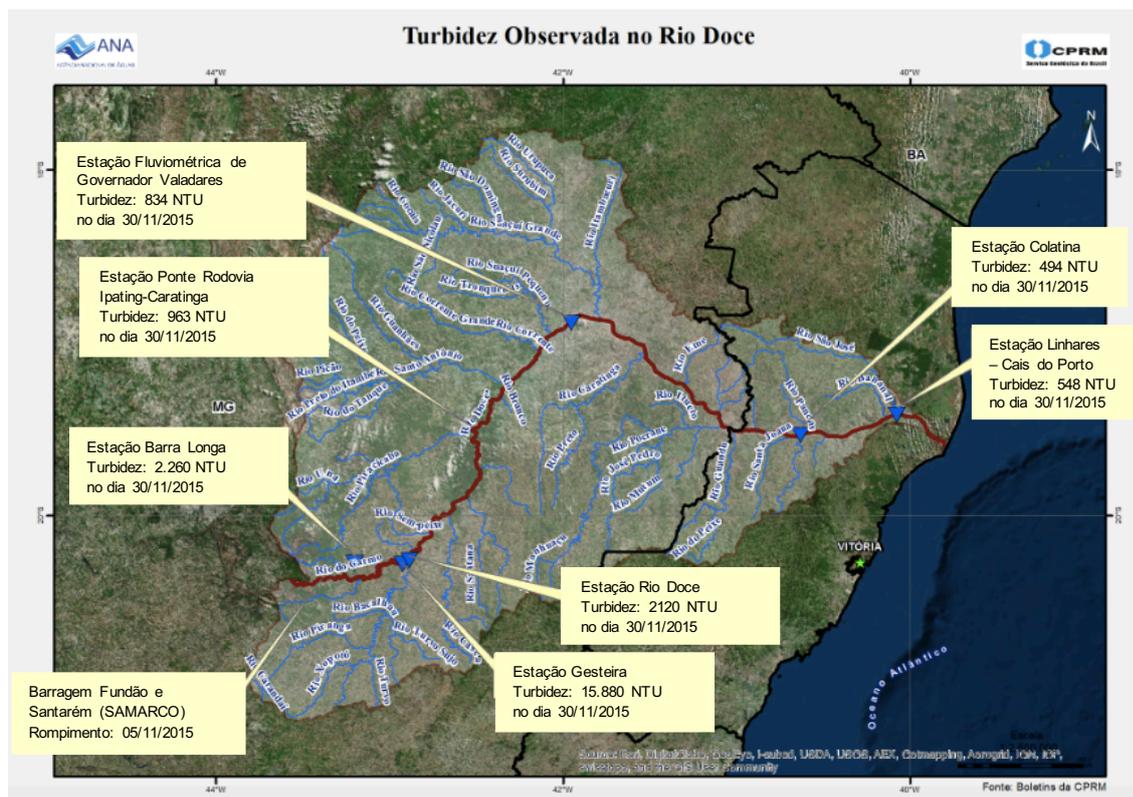


Figura 44: Monitoramento da Turbidez nos rios impactados, marcados pela linha vermelha, pelo acidente da Barragem do Fundão  
Fonte: CPRM (2015)

Ambos acidentes atingiram os rios da região, a lama do acidente da Barragem I atingiu o rio Paraopeba. Na fase de estudos para a implantação de uma barragem, a simulação do Dam Break, é de extrema importância. Pois é nessa simulação que é levantado duas hipóteses de rompimento da barragem e como resultado do estudo é possível avaliar a quais áreas serão impactadas. Com isso é possível avaliar o risco dos rejeitos atingirem um rio. Caso isso aconteça, é importante o mapeamento da população que será atingida, por exemplo os pescadores. Também podem ser mapeadas estruturas que servirão para barrar o avanço dos rejeitos nos rios. Nesses dois últimos acidentes ocorridos no Brasil, havia barragens de água que poderiam ter sido utilizadas caso o plano de emergência previsse a utilização destas estruturas.

De acordo com Santos et. al. (2019), a ruptura da barragem do Fundão resultou em uma mudança na morfologia do rio, que passou de um perfil sinuoso para um traçado com múltiplos canais. Ainda de acordo com os autores, foram encontradas no meio ambiente as

substâncias éter amina e sódio (Na), que são presentes na barragem devido ao processo de beneficiamento do minério. Estas substâncias causaram a toxicidade ambiental. As áreas ribeirinhas impactadas apresentaram uma redução da fertilidade e um aumento de  $\text{NH}_4^+$ , sódio (Na) e pH.

Danos na vida humana- O impacto que a lama pode vir a causar na vida humana pode ser dividido em três grupos, são eles:

Danos a saúde - Dependendo do tipo de mineral explorado, a lama pode conter metais pesados ou outros contaminantes gerados através do processo de beneficiamento, que irão afetar a saúde humana.

Acidentes como os ocorridos em Mariana e Brumadinho, produzem cenários de riscos ambientais que vão além do espaço local e do tempo, produzem uma multiplicidade e sobreposição de situações de exposições, riscos e efeitos sobre a saúde, que vão dos imediatos aos de longo prazo. Esses acidentes precisam levar em conta os impactos que vão além dos óbitos imediatos, os desabrigados e os feridos. Esses impactos incluem contaminação e alterações ambientais que produzem nas áreas (impactos sobre a biodiversidade e alterações dos ciclos de vetores, hospedeiros e reservatórios de doenças) e rios atingidos, como também a alteração abrupta da organização social e dos modos de viver e trabalhar historicamente constituídos nos territórios, com efeitos sobre a saúde. (Freitas et al, 2019).

O rompimento da barragem do Fundão atingiu 36 municípios. Os rios Gualaxo do Norte e o rio Doce foram atingidos, foram 663 km percorridos até atingir a foz do Rio Doce. Na figura 45, os autores Freitas et al (2019), expõem a multiplicidade de efeitos sobre a saúde humana.

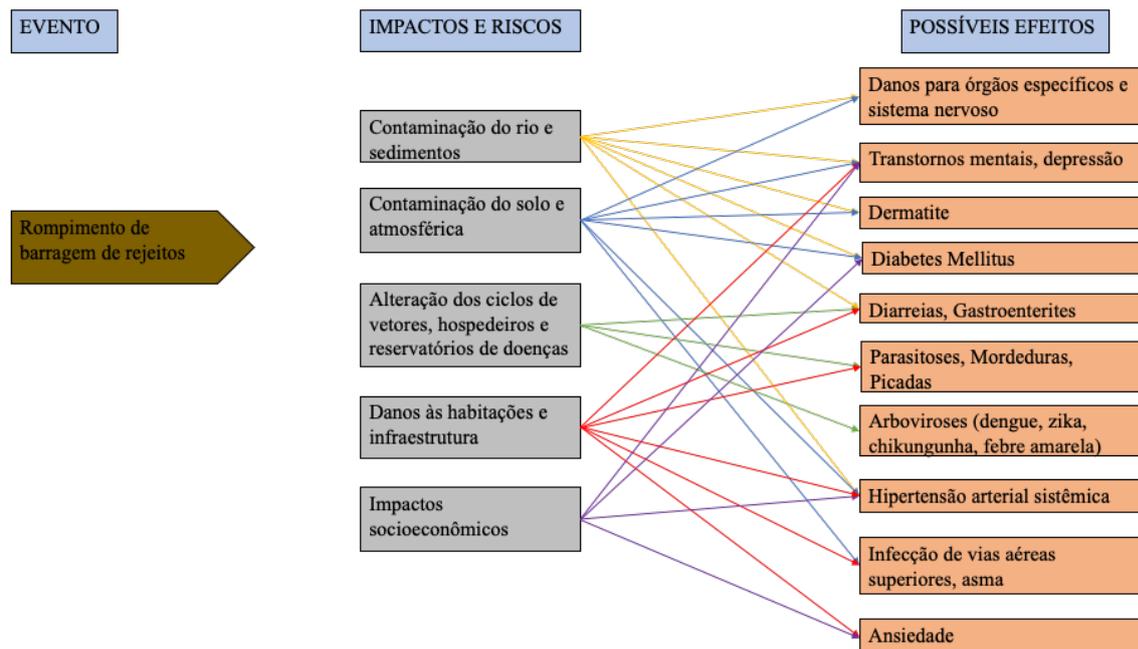


Figura 45: Potenciais efeitos relacionados aos impactos e riscos causados pelo desastre.  
 Fonte: Freitas et. al. (2019)

Impacto no trabalho - Dependendo das áreas atingidas pela lama, pessoas terão o seu trabalho impactado, por exemplo, no rompimento da barragem do Fundão que atingiu o Rio Doce, pescadores que tiravam o sustento da pesca no rio não puderam pescar.

Morte - Ao longo da história dos rompimentos de barragem, alguns eventos resultaram em mortes de pessoas, elas podem ser trabalhadores da empresa ou da comunidade atingida. Nos casos mais recentes de acidentes no Brasil, o rompimento da barragem do Fundão levou a óbito 19 pessoas, e o acidente ocorrido em Brumadinho foram, 306 pessoas perderam suas vidas ou estão desaparecidas (Vale, 2018).

O esquema 4 (Sh 4) apresentado na figura 46, ilustra os riscos contribuintes que podem colaborar para que haja uma falha no monitoramento da barragem.

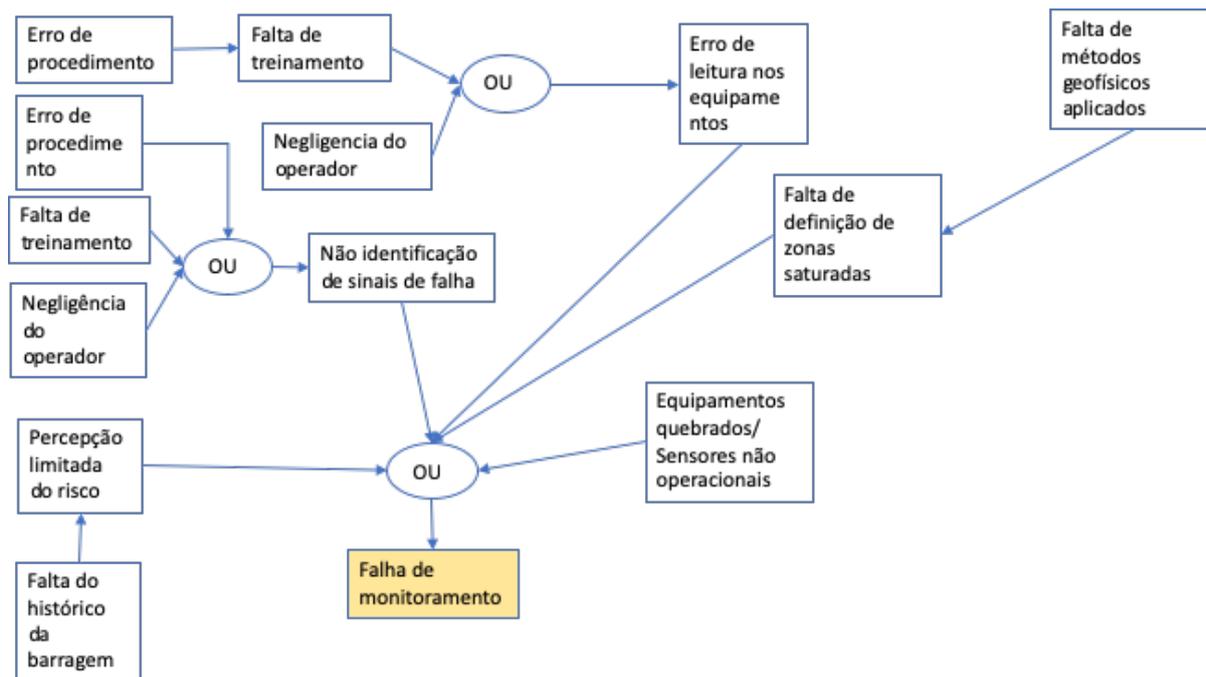


Figura 46: Esquema 4 (Sh4) da Série de Risco de rompimento de barragem de rejeitos.

Falta do histórico da barragem – As barragens de rejeito são estruturas que possuem vida útil de muitos anos. Porém, este tempo é relativo e existem alguns fatores que influem. Dentre eles, podemos citar a velocidade de produção e a impossibilidade de licenciar novas áreas.

Os projetos de barragem possuem uma cota máxima de alteamento, uma vez que as barragens têm a sua capacidade de armazenamento aumentada com ele. Ou seja, conforme há a produção de rejeitos, ocorre a necessidade de altear para aumentar a capacidade da barragem. Sendo assim, havendo uma produção de rejeito muito rápida, mais curto será o tempo de vida de uma barragem. Isso vai variar também de acordo com o momento da mina; caso a mina esteja em um nível em que a fase mais rica do minério já tenha acabado e agora na relação entre estéril/minério haja mais rejeito do que minério, a mineradora terá que acondicionar esse volume maior de rejeito que é produzido.

O outro fator que influencia no tempo de vida da barragem é a impossibilidade de licenciar uma nova área para instalar uma nova barragem, com isso o tempo de vida da barragem pode vir a ser estendido, para que mais tarde a mineradora possa continuar a acondicionar o rejeito em outra barragem.

No caso da Barragem I, na Mina Córrego do Feijão, que rompeu no dia 25/01/2019, a falta de histórico da barragem também pode ser citada como fator relevante. De acordo com

CBDB (2012), a barragem foi implementada em 1976 e a Vale adquiriu os direitos minerários e o controle acionário dela em 27/04/2001. No relatório que atestava a estabilidade da barragem, o item que descreve o histórico da barragem e os alteamentos mostra que há uma confusão em relação a nomenclatura utilizada para a atividade de alteamento e relata que há divergências documentais quanto aos primeiros alteamentos (TUV SUD, 2017). Situações semelhantes podem ocorrer quando uma empresa adquire os ativos de outra, e a mesma não possui o “*as built*” da barragem ou um histórico de como foram os alteamentos, ou então, uma avaliação da condição ou capacidade das instalações de rejeitos existentes, ou mesmo uma avaliação do passivo acumulado ou da qualidade da depósitos minerais não minerados restantes.

Percepção limitada do risco – Segundo Dekker (2011), os desastres são eventos incubados ao longo de um período, e geralmente o potencial para algum desastre não é reconhecido por quem está por dentro e até por quem está por fora. De acordo com Brasiliano (2019), a estrutura organizacional da Vale para o acidente ocorrido em Brumadinho em 2019, a tornou míope ao risco. Dekker (2014) afirma que o uso de tecnologias incertas, o conhecimento incompleto sobre onde estão os limites, entre outros aspectos (pressão e competição), podem fazer com que organizações, órgãos reguladores e outras partes interessadas não interrompam ou sequer consigam ver que estão trilhando um caminho para o desastre.

Durante o monitoramento de uma barragem de rejeitos, a aquisição de dados, entre elas o *as built* e as demais informações que são geradas neste momento, por exemplo os relatórios das auditorias de estabilidade, são importantes para que as pessoas da empresa possam montar um modelo mental da situação. Somado a isso, a interpretação, o entendimento das informações, possibilita uma projeção de cenário que fará com que as pessoas tomem uma decisão. Essas ações de obtenção de informação, compreensão e projeção de um estado, é conhecido como Consciência Situacional (CS), que é uma habilidade cognitiva que influencia na segunda habilidade que é a tomada de decisão (Endsley, 1995).

A consciência situacional pode ser compreendida como o estado de conhecimento que uma pessoa possui sobre um ambiente dinâmico e uma construção multifacetada que envolve a manutenção e a antecipação de eventos críticos de desempenho de tarefas. (Endsley, 1995; Shrestha et al., 1995).

Dekker (2014) aponta como a perda da Consciência Situacional quando ocorre uma diferença entre o que a pessoa deveria saber e o que ela realmente sabe (figura 47). Quando ocorre alguma obtenção defeituosa da Consciência Situacional, devido a vários fatores, as informações do ambiente podem ser mal interpretadas, diagnosticadas ou ignoradas, o que resultaria em uma imagem mental incorreta e resultaria em erros de cálculos nos níveis de risco. (Flin *et. al.*, 2008)

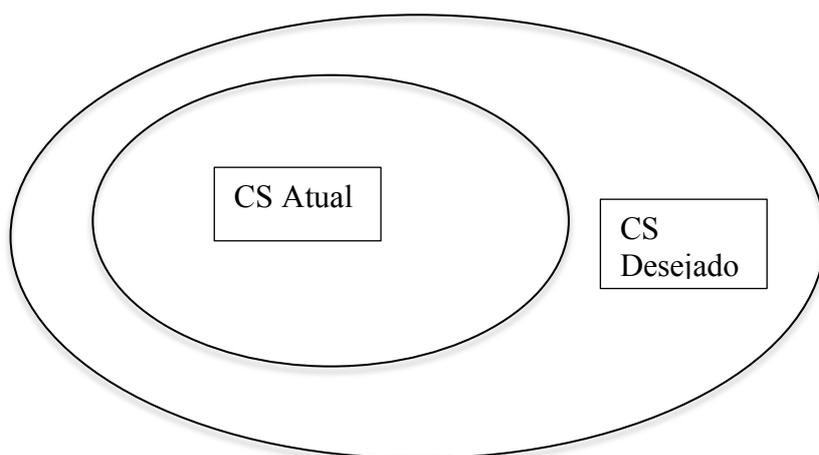


Figura 47: Uma caracterização comum da conscientização da situação. O círculo maior representa a percepção ideal, enquanto o círculo menor representa a percepção real  
Fonte: Dekker (2014)

Falha no monitoramento - As falhas no monitoramento, podem ser diversas, podem ser um equipamento quebrado que ainda não foi repostado, pode ser um erro humano. Neste caso, a tendência é que cada vez que a série de risco seja ampliada, o erro humano irá aparecer cada vez mais.

Equipamentos quebrados/sensores não operantes - Normalmente os equipamentos instalados no monitoramento de barragens são piezômetros, medidores de nível d'água e inclinômetros. Por motivos diversos esses equipamentos podem se encontrar quebrados e não operantes e caso a empresa não tome medidas para que todos os equipamentos se tornem funcionais, a observação do comportamento da água no interior da barragem fica comprometido e também se houve alguma alteração na inclinação da barragem. No acidente do Fundão, um dos piezômetros que indicava uma leitura anormal, o piezômetro 16LI017, durante a investigação Morgenstern *et. al.* (2016) o resultado foi que a partir de entrevistas e de informações fornecidas pela empresa indicam que a leitura estava errada.

Indefinição de zonas saturadas de água – As barragens de rejeito são estruturas que precisam ser monitoradas no dia a dia. Os instrumentos que nos darão informação direta sobre os sinais de recalque e sobre o comportamento da água no interior da estrutura, são: piezômetros, marcos topográficos, medidores de nível d'água. Além deles, também é usado o levantamento batimétrico, que tem como objetivo avaliar como está o preenchimento do lago (Albuquerque, 2019).

Os instrumentos citados acima compõem o método tradicional de monitoramento de barragem. Este método tem como característica de ser pontual no maciço. Devido a essa característica, esses podem falhar em mostrar o perigo (regiões saturadas) (Rocha, 2019). A forma de monitoramento dos dados gerados por esses aparelhos ocorre de duas formas: 1ª- um funcionário tem que ir até os equipamentos para poder fazer a leitura; 2ª – os equipamentos enviam os dados por telemetria para um computador, no qual com auxílio de um software o funcionário consegue identificar leituras fora do normal.

Falta de uso de métodos geofísicos aplicados – Os métodos empregados atualmente são ineficientes. Uma vez que, como evidenciado por Robertson et al (2019), os métodos empregados na Barragem I, que era uma combinação de marcos topográficos ao longo da crista da barragem, inclinômetros para medir deformações internas, radares de solo para monitorar as deformações de superfície da face da barragem e piezômetros para medir mudanças nos níveis internos de água, entre outros instrumentos, não foram capazes de detectar deformações ou alterações significativas antes do rompimento.

Os métodos geofísicos aplicados são métodos não destrutivos, com grande potencial, que possibilita uma investigação do comportamento da água no interior da barragem. A indicação do método a ser empregado na fase de monitoramento, entraria como parte das medidas a serem adotadas para reduzir o risco.

Os métodos geofísicos que podem ser empregados são dois, eletrorresistividade e medição de microssismos. O uso deste último método permitiria o monitoramento em tempo real qualquer alteração na estabilidade física da barragem. Ambos os métodos serão apresentados no Item 4.2 deste capítulo, que irá propor as inibições da Série de Risco.

Erro de Leitura dos equipamentos - Os erros de leitura dos equipamentos, neste caso são os erros humanos, já que a barragem necessita constantemente de um monitoramento cuidadoso e que boa parte é feita por equipamentos.

Negligência do operador - A negligência de um operador em determinada atividade, cuja depende da leitura de algum equipamento, pode fazer com que a informação daquele momento falte ou que ele assuma um valor, devido a constância dos valores naquele ponto.

Falta de treinamento - Os equipamentos utilizados para monitorar o comportamento da água a barragem, irá fornecer informações dos pontos em que eles estão instalados. No caso do acidente do Fundão, um dos piezômetros (16LI017) indicava uma leitura anormalmente baixa, que caso, fosse verdadeira poderia ser indicativa de um vazão ou cavidade (Morgenstern et. al. 2016). Caso o operador não tenha o treinamento adequado, não poderá notar essas diferenças.

Erro de Procedimento - Procedimentos são escritos para que as atividades sejam realizadas de forma segura, erros no procedimento ou mesmo a ausência de um, pode diminuir a segurança.

Não identificação dos sinais de falhas - Durante a operação da barragem, deve-se ficar atento aos sinais que podem indicar um incidente e aos incidentes. A aparição de trincas, saturação no pé do talude, observar a presença de animais que venham a construir uma toca na barragem, o crescimento de alguma vegetação que pode vir a causar algum problema na barragem.

Falta de procedimento - Alguns procedimentos são escritos para garantir a segurança de determinada atividade, a falta de um, pode levar a atividade ter acidentes fatais ou catastróficos.

Falta de treinamento - A falta de treinamento de um operador, pode levar a pessoa a ter erros cognitivos na atividade, que poderão levar a um evento catastrófico.

Negligência do operador - Ao negligenciar os sinais, o operador assume um risco cuja tendência é um evento com acidente podendo ser fatal ou catastrófico.

## 5.2 INIBIÇÕES

As inibições utilizadas na Série de Risco, são medidas de engenharia ou administrativas que tem como objetivo prevenir que os fatos analisados que contribuem para que o acidente ocorra ou mitigar a as consequências do acidente.

Na Série de Risco, de acordo com as conexões a direita do Evento Principal, as causas e as conexões a esquerda deste evento, as consequências, deve-se alocar medidas que visem a



eletrorresistividade e microssismos, que já vêm mostrando bons resultados no monitoramento.

O método geofísico da eletrorresistividade é baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais. Na leitura dos dados, quando há a presença de água no maciço a resistividade tende a ser baixa. Ao aplicar este método em uma fiscalização, torna-se possível a determinação das zonas onde deve existir água e as zonas que não devem ter água. Nas figuras 49 (imagem 2D) e 50 (imagem 3D), o autor aplicou este método na Barragem de Rejeito BR no Complexo de Mineração de Tapira em Minas Gerais, indicando o estado do maciço e da praia em relação a saturação por água destas, a cor azul e a sua tonalidade utilizada nas figuras ilustra a presença de água, quanto mais escuro o azul, mais água tem.

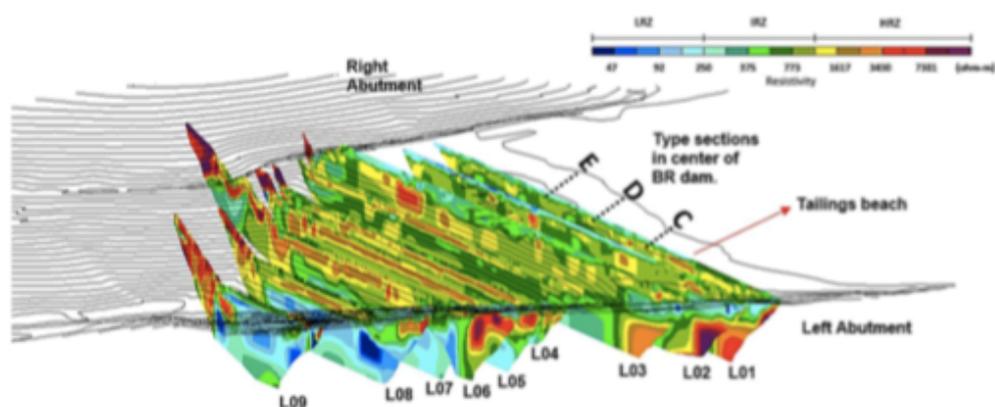


Figura 49: Resultado em 2D dos dados obtidos por Rocha (2019)

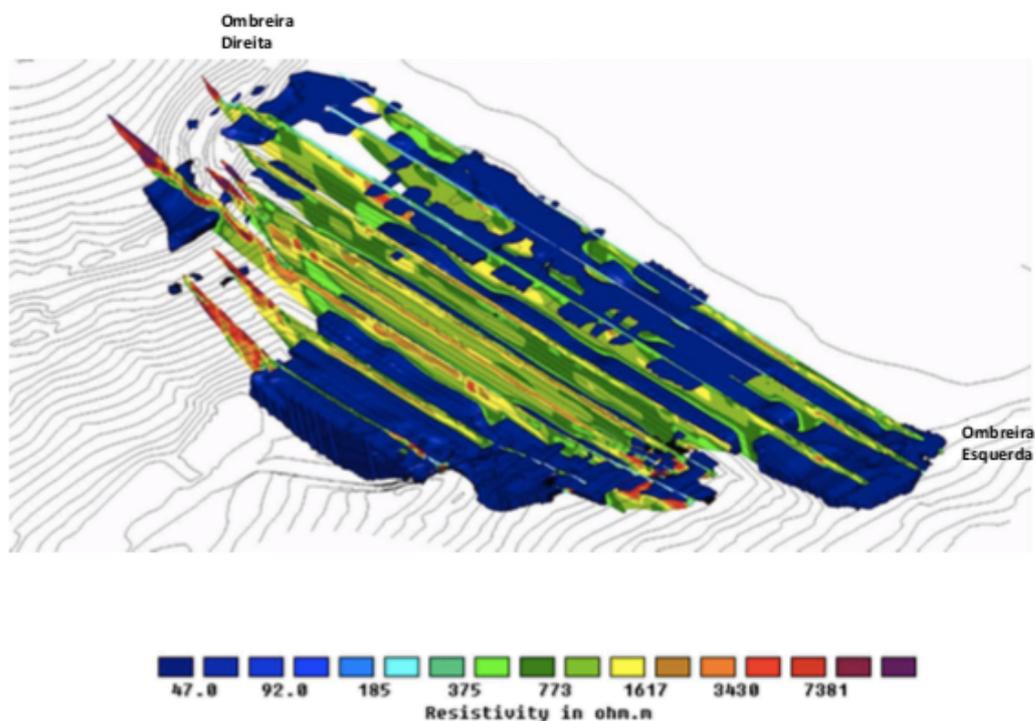


Figura 50: Resultado em 3D dos dados obtidos por Rocha (2019)

A aplicação da eletroresistividade seria mais indicada nas etapas de auditoria da barragem que são realizadas para verificar a sua estabilidade. Uma vez que, sempre que este método é aplicado, seria como “tirar um raio-x” da barragem. O resultado seria do momento em que a eletroresistividade foi aplicada. Desta forma, essas auditorias teriam que acontecer duas vezes ao ano, uma no período de chuvas e a outra no período de seca para verificar como está o comportamento

O método geofísico de microssismos, essencialmente utiliza as vibrações sísmicas ambientais, que podem ser induzidas por mudanças de estresse, saturação de fluidos, danos e poropressão, para criar fontes sísmicas virtuais. Permitindo a medição de pequenas mudanças na velocidade sísmica na parede da barragem. Este monitoramento ocorre comparando as velocidades sísmicas encontradas com as taxas de vazão de infiltração, precipitação diária e nível de água no reservatório. Desta forma possibilita a compreensão ao longo do tempo da estabilidade estrutural da barragem (Oliver et. al., 2017).

O método de microssismos foi aplicado na barragem Princess Creek, localizada próxima a Queenstown na Tasmânia, Austrália. Esse estudo foi realizado por Oliver et. al. (2017). Na figura 51, mostra a localização dos *geophones*, dos piezômetros, vertedouro (*V-notch flow*) e locais onde foram observadas infiltrações.



Figura 51: Localização dos equipamentos e dos pontos de infiltração.  
Fonte: Oliver et. al. (2017)

A figura 52 mostra o resultado encontrado por Oliver et. al. (2017). O decaimento na velocidade das ondas sísmicas, evidencia que na região que foi detectada, ocorreu infiltração na barragem. Outro resultado encontrado pelos autores quando aplicaram o método de microsismos, foi a indicação de algumas mudanças da subsuperfície na parede da barragem, em locais consistentes com observações de aumento da infiltração entre o contato da topografia local e a parede da barragem de terra.

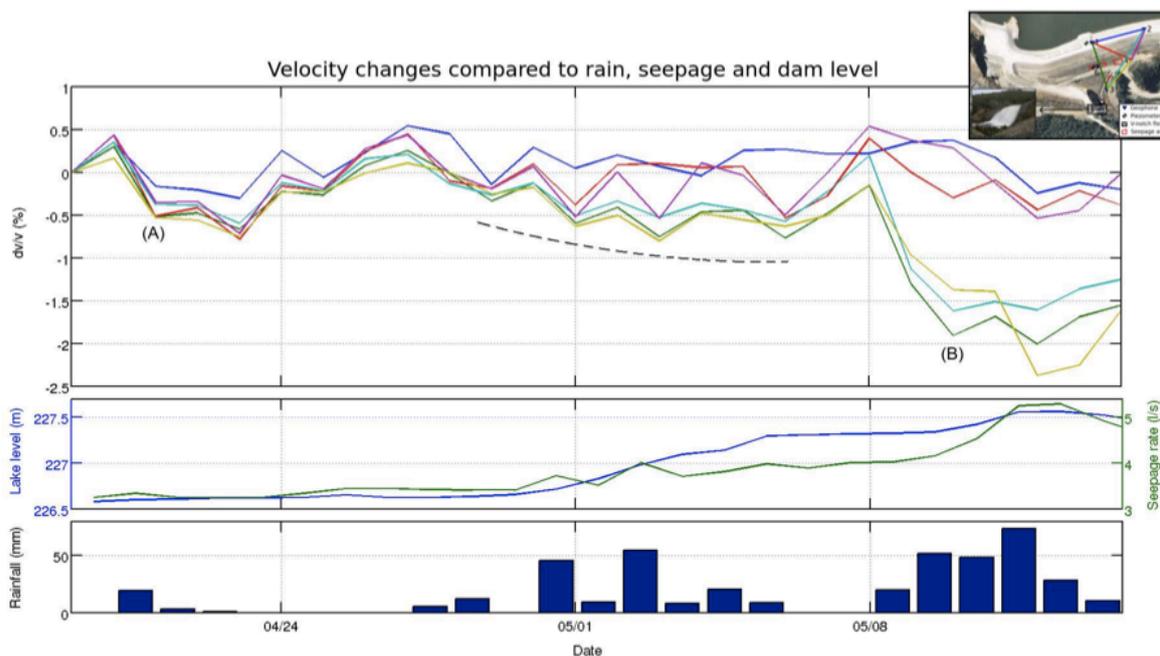


Figura 52: Correlação das velocidades de onda sísmicas com os dias de chuva e o nível d'água na barragem.  
Fonte: Oliver et. al. (2017)

O emprego do método de microssismos se somaria aos métodos já empregados, para um monitoramento em tempo real das condições de “saúde” da barragem.

As empresas teriam que inverter em mão-de-obra capacitada para estar realizando a leitura dos resultados gerados pelos *geophones* e realizar o cruzamento com os resultados da pluviosidade e alteração do nível da água no lago.

Uma das causas apontadas na falha de monitoramento é a falta do histórico da barragem. As empresas ao comprarem uma mina de outra empresa, devem exigir o documento *as built* da barragem. Caso a barragem seja antiga e esse documento não existir, a empresa deve realizar uma investigação minuciosa do estado da barragem.

Os resultados gerados ao longo do monitoramento pelo método de microssismos devem compor os relatórios de auditoria que irão realizar o emprego da eletrorresistividade. Desta forma, além das análises já realizadas, os resultados desses métodos irão aumentar a percepção do real estado de “saúde” da barragem.

Com a melhoria do monitoramento, as empresas poderão realizar reforços na barragem ou intervenções

### **5.2.2 Inibição 2 – Emprego de imagens de satélite para monitoramento**

Um estudo elaborado por Lumbroso et. al. (2019), mostra o uso de imagens de satélite para monitorar as barragens. Os autores buscaram desenvolver um sistema de baixo custo para possibilitar que órgãos reguladores possam monitorar as barragens de rejeito. A tabela 8 mostra o potencial que trabalhar com dados baseados em imagens de satélite para monitorar as barragens de rejeito. Os autores nomearam o sistema de DAMSAT, e permite um sistema de alerta para os usuários enviando um e-mail ou mensagens SMS.

Os autores apontam que o DAMSAT possui dois níveis. O primeiro trabalha com imagens de satélite que podem ser obtidas gratuitamente e o segundo nível trabalha com imagens de alta resolução que pode ter um custo elevado. Esse custo deve ser repassado para empresa.

Tabela 8: O uso de dados baseados em satélite para monitorar barragens de rejeito (Lumbroso et. al., 2019) continua

Tipo de tecnologia de observação da terra	Dados fornecidos	Uso da tecnologia nas barragens
Radar de Abertura Sintética Interferométrica (InSAR)	Deslocamento relativo da barragem ou estrutura com precisão de 2 mm – 3mm	Monitoramento de deformação anormal da estrutura.
	Avaliação da extensão da água	Monitoramento do movimento do solo natural nas principais áreas de risco como pilares da barragem ou na borda do reservatório.
	Criação de Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução horizontal de 0,5 m	Avaliação de rejeitos e níveis de água
	MDT com resolução vertical de 10 cm e precisão absoluta aproximando-se de 3,5 m sem controle de solo	
Tipo de tecnologia de observação da terra	Dados fornecidos	Uso da tecnologia nas barragens
Dados de satélite baseados em óptica	Identificação de recursos e ortomapeamento, com crescentes períodos de retorno combinados com a alta resolução de até 40 cm de baixa órbita terrestre, os dados ópticos fornecem um contexto sinótico, preciso e novo mapeamento de um site inteiro a um custo muito baixo por km quadrado	Detecção de lixiviação de rejeitos da estrutura indicada pelo declínio da saúde da vegetação ou do aumento de vestígios de óxidos de ferro
	Classificação espectral – indicadores de terra contaminada, como a morte da vegetação e a descoloração da água pode ser determinada a partir destes	Alterações no teor de umidade do solo do corpo da barragem que poderiam indicar problemas estruturais futuros
	Detecção de alterações – alta, quase diretamente, visitar os locais oferece a oportunidade para monitorar a mudança de paisagem para detectar e mapeamento rápido dos processos e das mudanças	Alterações nas taxas de infiltração que podem indicar problemas de erosão interna

Tabela 8: O uso de dados baseados em satélite para monitorar barragens de rejeito (Lumbroso et. al., 2019)  
continuação

		Medição da largura da praia. A praia tem como objetivo manter o lago longe da barragem e a superfície freática baixa, reduzindo assim o risco de falha
		Detecção de falha de declive, relevante especialmente para locais fechados, usando uma combinação de parâmetros (por exemplo: umidade do solo, turvação, características da superfície, mudança de inclinação)
Tipo de tecnologia de observação da terra	Dados fornecidos	Uso da tecnologia nas barragens
Satélite de Sistema de Navegação Global (GNSS)	O GNSS pode ser usado para calcular autonomamente vetores de movimento tridimensionais de vários pontos, usando receptores GNSS padrão localizados no local, com uma precisão de alguns milímetros.	Monitoramento da deformação anormal de pontos específicos da estrutura em tempo real (requer a instalação de uma estação base).
Modelos de previsão meteorológica global	Previsões de variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, por exemplo, do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF) ou da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA).	Previsões de escoamento superficial que podem ser usadas para avaliar a probabilidade de <i>overtopping</i> ou um potencial aumento perigoso no conteúdo de umidade do corpo da barragem que pode afetar a estabilidade.

### **5.2.3 Inibição 3 – Garantia de operação apropriada do sistema de drenagem**

Os projetos devem prever a drenagem e este mecanismo deve estar sempre com o funcionamento em suas perfeitas condições. Morgenstern et. al. (2016) apontou que uma drenagem adequada para o projeto da barragem do Fundão, era uma peça chave.

Com isso as empresas devem garantir que o sistema de drenagem esteja sempre operando. Para exemplificar, podemos citar um fato ocorrido na barragem do Fundão, citado por Morgenstern et. al. (2016). O dique de partida e o sistema de drenagem da barragem foram concluídos em outubro de 2008, em abril de 2009 com a barragem já recebendo rejeitos, um processo de *piping* ocorreu. A empresa interveio e na investigação de suas causas, foi detectado uma falha de construção no dreno de fundo e em seus filtros, incluindo um trecho da saída que não foram concluídos. Porém o período de chuvas impediu que a empresa conseguisse restaurar as condições originais dos drenos e acabaram selando-os.

Este evento ocorrido nunca deveria ter acontecido. A empresa deveria ter um sistema de fiscalização quando o Dique 1 e os seu sistema de drenos, estavam sendo construídos para garantir a qualidade do sistema.

### **5.2.4 Inibição 4 – Garantia da distância mínima da praia**

A praia de rejeitos já é uma inibição, uma vez que tem como objetivo manter a distância do lago da barragem. Desta forma a praia de rejeitos trabalha visando a mitigação dos processos de infiltração. Sempre que a empresa não obedece a distância que vem especificada no projeto, e essa distância diminui, o risco de infiltração aumenta.

Desta maneira a empresa deve estruturar um sistema de qualidade que garanta a distância da praia.

Uma forma de fiscalização, seria de acompanhamento da evolução da distância da praia de rejeito, seria com a utilização de imagens de satélite. Essas imagens teriam que ser de alta resolução para evitar erros.

### **5.2.5 Inibição 5 – Desenvolvimento de Plano de Contingência para minimizar o número de mortos**

O objetivo desta inibição é minimizar o número de mortos em acidentes que envolvam o rompimento de uma barragem de rejeitos. Para isso serão adotadas algumas medidas para evitar um cenário com número de mortos altos, como por exemplo o acidente da Barragem I, em Brumadinho/MG, onde 306 foram perdidas.

Entre as medidas a serem adotadas está o mapeamento das áreas impactadas pela onda de lama, a partir do mapa de inundação exigido pela Agência Nacional de Mineração através da Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017, possibilitando a elaboração das rotas de fuga e estabelecer as zonas de salvamento. Também caso seja possível, o deslocamento de determinadas instalações, como por exemplo as instalações administrativas da Mina do Córrego do Feijão, onde, devido o acidente, as edificações administrativas foram atingidas.

A segunda medida a ser tomada é utilizando o sistema DAMSAT, sugerido na Inibição 2, tem como objetivo agilizar a comunicação. O sistema permite a comunicação por meio de SMS, com todas as partes, seja para alertar as pessoas da comunidade e para alertar as autoridades. Então essa medida se somaria ao alerta pelas sirenes.

Por último, a medida seria a realização de simulados com a todos os envolvidos, inclusive com a comunidade que pode vir a ser impactada. Esses simulados têm como objetivo treinar todas as partes de interesse, nas ações de emergência se serem tomadas. Desta forma a população saberá como agir e para onde devem se encaminhar para ficarem seguros.

Com mapa de inundação exigido pela Agência Nacional de Mineração através da Portaria No 70.389, DE 17 DE MAIO DE 2017, é possível elaborar as rotas de fuga e estabelecer as zonas de salvamento.

Com o apoio do sistema DAMSAT, sugerido na Inibição 2, é possível agilizar a comunicação com a comunidade que pode ser atingida pela onda de lama.

Somado a essa melhoria de comunicação, a empresa deve realizar simulados com todos os potencialmente atingidos, para tentar assegurar o mínimo de fatalidades.

## 6. CONCLUSÃO

O capítulo Histórico de Acidentes, mostra a evolução dos acidentes de rupturas de barragens ao longo de 104 anos. Sendo preocupante o aumento dos acidentes graves e muitos graves. De acordo com esse histórico, a frequência de rupturas é de 3,51 por ano. Há uma expectativa de que os acidentes graves e muito graves se tornem ainda mais frequentes, devido à alguns fatores: 1) as barragens estão maiores; 2) os valores das commodities tornam viáveis a mineração em minas menos ricas em minério; 3) minas menos ricas em minério, resultam em um volume maior de rejeitos.

Assim como em qualquer outra indústria, os rejeitos da mineração merecem os devidos cuidados, pois fazem parte do processo e como evidenciado, os impactos podem ser gigantescos.

Desta forma, o gerenciamento de risco desses empreendimentos deve ser executado de forma séria e buscando sempre o seu amadurecimento. Como evidenciado em acidentes anteriores, apontam que na época, já havia conhecimento suficiente para evita-los. Essa repetição de acidentes, reforça que esses acidentes possuem as suas origens em lapsos institucionais, gerenciais e regulatórios sérios e sistemáticos. Para reforçar ainda mais que o conhecimento já existia há muito tempo, o fenômeno da liquefação já é estudado desde 1930.

Outro fator que corrobora com a afirmação acima é o fato de que a estruturação da Série de Risco apresentada nesta dissertação, só foi possível devido ao conhecimento gerado nas áreas de geotecnia e nos artigos e laudos técnicos que investigaram os acidentes da barragem do Fundão em 2015 e da Barragem I em 2019.

Neste trabalho também fica claro a importância do monitoramento, uma vez que, é nesta etapa que a consciência situacional pode melhorar. Já que é a partir desta etapa que ocorre a obtenção de informações a respeito da saúde da barragem. Desta forma, como indicado no Capítulo 5, item 5.2, há a indicação do emprego de métodos geofísicos para que o monitoramento possa melhorar, já que, como apontado, os métodos geotécnicos empregados atualmente não são suficientes. Os métodos geofísicos e geotécnicos devem ser empregados em conjunto.

Essas falhas no monitoramento, reforçam os lapsos institucionais, gerenciais que podem ocorrer, visto que ainda não foi evidenciado um comportamento que faça com que as mineradoras atuem de forma a ampliar a consciência situacional.

Estruturar a Série de Risco possibilitou verificar que um dos fatores que influenciam na saúde da barragem é a imprevisibilidade da pluviosidade, o que está ligado às mudanças climáticas. O mapeamento dos riscos climáticos pelas empresas tem mostrado como as mudanças climáticas podem impactar os negócios. Como apontado no Capítulo 5, item 5.1, há uma tendência de aumento da pluviosidade para região do Estado de Minas Gerais, que concentra 365 barragens. Também está claro que este mapeamento dos riscos climáticos é importante, já que as barragens de rejeitos são mais indicadas para regiões de clima árido ou semi-árido.

O método da Série de Risco utilizado também permitiu conhecer os impactos que um rompimento de barragem de rejeitos pode trazer para a empresa. Demonstrou também a importância de as empresas executarem o estudo do *Dam Break*, exigido pela LEI Nº 12.334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010, que gera o mapa de inundação. Com isso, as empresas podem traçar planos de evacuação e estratégias de recuperação das áreas impactadas. Para áreas de vegetação atingidas pode-se utilizar técnicas de recuperação natural, plantio direto entre outras.

Assim, é possível afirmar que a Série de Risco se mostrou uma excelente ferramenta para poder gerenciar os riscos de uma barragem, pois permite a análise de causas e consequências, além das proposições das inibições nas causas na prevenção do acidente e para mitigar as consequências. Também como evidenciado no item 3.5, a Série de Risco se mostrou uma ferramenta superior, quando comparada com os métodos Árvore de Falhas, Árvore de Eventos, Análise de Modos de Falhas e Efeitos e Bow tie, pois permite uma análise mais completa.

O uso das imagens de satélite se mostra útil para avaliar parte dos impactos e devido ao grande número de informações presentes nessas imagens, julga-se como uma excelente ferramenta para apoiar as análises das consequências de forma rápida e barata, já que as imagens utilizadas não tiveram custo algum.

A dissertação foi finalizada com a sugestão de algumas inibições, que possuem como objetivo prevenir os acidentes ou mitigar as suas consequências. Entre as inibições sugeridas, a 3 e a 4 chamam a atenção, pois ambas são mecanismos pensados ainda no projeto para prevenir que a barragem venha a sofrer com a infiltração. Já a inibição 1, chama atenção por possuir tecnologias disponíveis que permitem uma evolução dos meios de monitoramento da barragem.

A partir da Série de Risco, podemos afirmar que para haver o rompimento da barragem pelo fenômeno da liquefação existe um período de incubação, devido a degradação da segurança ao longo do tempo, onde determinados acontecimentos podem não ser percebidos, devido a falta de fiscalização por parte do governo e devido as falhas de monitoramento.

Entende-se então, que para evitar acidentes de barragens de rejeitos é necessária seriedade na análise e gerenciamento dos riscos, bem como o maior amadurecimento da legislação de segurança de barragens, em que o órgão licenciador arbitre os mecanismos de monitoramento.

**BIBLIOGRAFIA**

ANM, 2019. Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/classificacao-oficial-anm> (acessado: 29/12/2019)

ANM, 2017. Agência Nacional de Mineração. Disponível em <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao> (acessado: 07/06/2017)

ALBUQUERQUE, Roberto et al. Caracterização de barragens de rejeito usando geofísica rasa: aplicação na barragem B1 de Cajati, São Paulo. Anuário do Instituto de Geociências, v. 42, n. 1, p. 567-579, 2019.

AZAPAGIC, Adisa. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of cleaner production*, v. 12, n. 6, p. 639-662, 2004.

AZAM, S. and Qiren, L., Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Geotechnical News*, Vol. 28, No 4, pp 50–53, 2010

BAECHER, Gregory B. ANNOTATED READINGS IN THE. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Gregory\\_Baecher/publication/331552552\\_ANNOTATED\\_READINGS\\_IN\\_THE\\_HISTORY\\_OF\\_RISK\\_ANALYSIS\\_IN\\_DAM\\_SAFETY\\_USACE\\_RISK\\_MANAGEMENT\\_CENTER/links/5c7fcce9299bf1268d3eac13/ANNOTATED-READINGS-IN-THE-HISTORY-OF-RISK-ANALYSIS-IN-DAM-SAFETY-USACE-RISK-MANAGEMENT-CENTER.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gregory_Baecher/publication/331552552_ANNOTATED_READINGS_IN_THE_HISTORY_OF_RISK_ANALYSIS_IN_DAM_SAFETY_USACE_RISK_MANAGEMENT_CENTER/links/5c7fcce9299bf1268d3eac13/ANNOTATED-READINGS-IN-THE-HISTORY-OF-RISK-ANALYSIS-IN-DAM-SAFETY-USACE-RISK-MANAGEMENT-CENTER.pdf) (acessado: 08/08/2019)

BAHR, Nicholas J. *System safety engineering and risk assessment: a practical approach*. CRC press, 2018.

BOGER, D. V.; HART, B. C. Making an unsustainable industry more sustainable. In: 2008 International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Gaborone, Botswana. 2008. p. 3-5.

BOWKER, L.N.; Chambers, D.M. In the Dark Shadow of the Supercycle Tailings Failure Risk & Public Liability Reach All Time Highs. *Environments*, Vol 4, No 4, pp 1-21, 2017, <http://dx.doi.org/10.3390/environments4040075>.

BOWKER, L. N. (2019). Tailings dam failures 1915 - 2019. Center for Science in Public Participation; Bowker Associates, available at: <http://www.csp2.org/tsf-failures-1915-2019> (accessed: 22.05.19).

BRASILIANO, Antonio. *Brumadinho: Miopia na Gestão de Riscos por parte da Administração*. 2019.

CALDWELL, Jack; CHARLEBOIS, Lawrence. Tailings impoundment failures, black swans, incident avoidance, and checklists. In: *International Conference on Tailings & Mine Waste, Tailings and Mine Waste*. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2010. p. 33-39.

CASTRO, L. V. P. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante. Dissertação "Mestrado em Engenharia de Minas". Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

CBDB, 2012. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Barragens de rejeitos no Brasil. Rio de Janeiro

CCPS, 2018. CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety. Wiley-AIChE, 2018.

CGE-MG, Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais, 2019. Avaliação da conformidade dos processos de licenciamento ambiental da Barragem I, operada pela Vale S/A no município de Brumadinho-MG.

CHAMBERS, David M.; HIGMAN, Bretwood. Long term risks of tailings dam failure. Center for Science in Public Participation, Bozeman, Montana, 2011.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Monitoramento Especial do Rio Doce. 2015. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Eventos-Criticos/Monitoramento-Especial-do-Rio-Doce-4057.html>. Acessado: 18/01/2017

DAVIES, Michael; MARTIN, Todd; LIGHTHALL, Peter. Mine tailings dams: when things go wrong. Tailings Dams, p. 261-273, 2000.

DAVIES, Michael P. Tailings Impoundment Failures Are Geotechnical Engineers Listening?. GEOTECHNICAL NEWS-VANCOUVER-, v. 20, n. 3, p. 31-36, 2002.

DAVIES, Michael; MARTIN, Todd. Static liquefaction of tailings—fundamentals and case histories. 2002.

De Cicco, F.; Fantazzini, M. L. Tecnologias consagradas de gestão de risco. 2 ed. São Paulo: Risk. Tecnologia, 2003.

DEKKER, Sidney. Safety Differently: Human Factors for a New Era. CRC Press, 2014.

DO CARMO, Flávio Fonseca et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspectives in ecology and conservation, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

EDRAKI, Mansour et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. Journal of Cleaner Production, v. 84, p. 411-420, 2014.

ENDSLEY, Mica R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Human factors, v. 37, n. 1, p. 32-64, 1995.

ERICSON, Clifton A., Hazard Analysis Techniques for System Safety, John Wiley and Sons, 2005.

EXAME, 2019. Após Brumadinho Vale pode deixar de vender até 75 mi toneladas por ano. Publicado: 28/03/2019. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/apos-brumadinho-vale-pode-deixar-de-vender-ate-75-mi-toneladas-por-ano/> (acessado em 01/10/19)

FLIN, Rhona H.; O'CONNOR, Paul; CRICHTON, Margaret. Safety at the sharp end: a guide to non-technical skills. Ashgate Publishing, Ltd., 2008.

FOURIE, A. B.; BLIGHT, G. E.; PAPAGEORGIOU, G. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. Canadian Geotechnical Journal, v. 38, n. 4, p. 707-719, 2001.

FRANKS, Daniel M. et al. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. Resources policy, v. 36, n. 2, p. 114-122, 2011.

FREEMAN, Rebecca; BARKER, Malcolm; ENGINEER, Principal Dams. Would bowties and critical controls contribute to the prevention of high consequence/low frequency dam failures? Learnings from the global mining industry on catastrophic event management. 2016. Disponível em: <https://www.ancold.org.au/?product=2016-would-bowties-and-critical-controls-contribute-to-the-prevention-of-high-consequence-low-frequency-dam-failures> (acessado: 18/01/2018)

FREITAS, Carlos Machado de, et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 35, n. 5, e00052519, Mar. 2019. Disponível em: <http://cadernos.ensp.fiocruz.br/csp/artigo/734/da-samarco-em-mariana-vale-em-brumadinho-desastres-em-barragens-de-mineracao-e-sade-coletiva>. acessado em 24 Set. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-311X00052519>.

GARCIA, Leticia Couto et al. Brazil's worst mining disaster: corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. Ecological applications, v. 27, n. 1, p. 5-9, 2017.

IBAMA, 2015. Laudo técnico preliminar. Impactos sociais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias\\_ambientais/laudo\\_tecnico\\_preliminar.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf).

IBRAM, 2016. Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração.. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf> (accessed: 22/02/2018)

IBRAM, 2019. Relatório Anual – Julho 2018 | Junho 2019. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anual-2018-2019.pdf> (acessado: 29/12/2019)

ICOLD (International Commission on Large Dams). Tailings dams risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. Paris, 2001.

IEEIRP, Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, The Report on the Mount Polley Tailings Storage Facilities Breach. Vancouver, Province of British Columbia, 2015.

JAMES, Michael et al. A laboratory investigation of the dynamic properties of tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, n. 11, p. 1587-1600, 2011.

Kossoff, D., Dubbin W. E., Alfredsson M., Edwards S. J., Macklin M. G., Hunsin-Edwards K. A., Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, Vol. 51, pp 229-245, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010..>

LYU, Zongjie et al. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*, v. 2019, 2019.

MATOS, G. R. Historical Global Statistics for Mineral and Material Commodities (2015 Version). US Geological Survey Data Series, 2015, 896.

MARSHALL, Judith. Tailings Dam Spills at Mount Polley and Mariana: Chronicles of Disasters Foretold. Canadian Centre for Policy Alternatives, 2018.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 7a edição. São Paulo, Editora Atlas, 2010.

MANION, Mark; EVAN, William M. Technological catastrophes: their causes and prevention. *Technology in Society*, v. 24, n. 3, p. 207-224, 2002.

MMSD (Mining Minerals and Sustainable Development) (2002). Mining for the Future – Appendix A: Large volume waste working paper, No. 31. Commissioned by the MMSD project of the International Institute for Environment and Development (IIEA) and the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). <http://pubs.iied.org/pdfs/G00883.pdf> (accessed 04.02.2018).

MOURA, Raphael et al. Learning from accidents: Interactions between human factors, technology and organisations as a central element to validate risk studies. *Safety Science*, v. 99, p. 196-214, 2017.

MTPS, 2016. Ministério do Trabalho e da Previdência Social. RELATÓRIO DE ANÁLISE DE ACIDENTE ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS FUNDÃO EM MARIANA – MG. Disponível em: [http://ftp.medicina.ufmg.br/osat/relatorios/2016/SAMARCOMINERACAORELATORIOROMPIMENTOBARRAGEM20160502\\_09\\_05\\_2016.pdf](http://ftp.medicina.ufmg.br/osat/relatorios/2016/SAMARCOMINERACAORELATORIOROMPIMENTOBARRAGEM20160502_09_05_2016.pdf) (acessado: 12/12/2019)

MORGENSTERN, N. R. et al. Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão - Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão. 2016.

OLIVIER, Gerrit et al. Monitoring the stability of tailings dam walls with ambient seismic noise. *The Leading Edge*, v. 36, n. 4, p. 350a1-350a6, 2017.

PESCA AMADORA. Mais de nove toneladas de peixes mortos já foram recolhidas nas margens do rio Doce. Publicado: 29/11/201. Disponível em: <https://www.pescamadora.com.br/2015/11/mais-de-nove-toneladas-de-peixes-mortos-ja-foram-recolhidos-nas-margens-do-rio-doce/>. Acessado em 18/01/2018

PBMC. Contribuição do Grupo. ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil, p. 28, 2013.

Psarropoulos, P. N., Tsompanakis, Y. (2008). Stability of tailings dams under static and seismic loading, *Can. Geotech. J.* 45, 663–675. <https://doi.org/10.1139/T08-014>

PURI, Vijay K.; KOSTECKI, Todd R. Liquefaction of Mine Tailings. 2013.

RAFAEL, Herbert Miguel Angel Maturano –Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio/ 2012. Disponível em: [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=20720@1](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=20720@1) Acesso em: 16 de Outubro de 2018

RAFAEL, H. M. A. M.; ROMANEL, Celso. Potencial de Liquefação Estática no Alçamento de uma Barragem de Rejeito. In: Anais do Congresso brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, GO, Brasil. 2014.

RICO, Mayte; BENITO, Gerardo; DIEZ-HERRERO, Andres. Floods from tailings dam failures. *Journal of hazardous materials*, v. 154, n. 1-3, p. 79-87, 2008.

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

ROCHA, Demetrius Cunha Gonçalves da. APLICAÇÃO DA GEOFÍSICA RASA NA INVESTIGAÇÃO DA BARRAGEM DE REJEITO BR NO COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA - MINAS GERAIS, BRASIL. 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SAMARCO, 2008 – Relatório da Administração – 2008. Disponível: <https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/08/2008-Relatorio-da-Administra-o-e-Demonstra-es-Financeiras.pdf>. Acessado em: 31/01/2018.

SANTAMARINA, J. Carlos; TORRES-CRUZ, Luis A.; BACHUS, Robert C. Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, [s.l.], v. 364, n. 6440, p.526-528, 9 maio 2019. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aax1927>.

SANTOS, R. N. C., Caldeira, L. M. M. S., Serra, J. P. B., FMEA of a tailings dam. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol. 6, No. 2, pp 89-104, 2012. <http://dx.doi.org/10.1080/17499518.2011.615751>.

SANTOS, O. S. H. et al. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. *Journal of Environmental Quality*, v. 48, n. 2, p. 439-449, 2019.

SILVA, Washington Pirete da. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). 2010.

SHRESTHA, Lisa B. et al. Understanding situation awareness: Concepts, methods, and training. *Human/technology interaction in complex systems*, v. 7, p. 45-83, 1995.

SZNELWAR, Laerte Idal et al. Brumadinho: entre a prudência ea probabilidade, a tragédia. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, v. 17, n. 1, p. 4-12, 2019.

TUV SUD. Revisão periódica de segurança de barragem mina córrego feijão – Barragem i. Relatório Técnico. 2017.

UOL, 2019, Vale também perdeu valor após Mariana, mas triplicou os números em 3 anos. Publicado em 01/02/2019. Disponível: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2019/02/01/acoes-vale-valor-de-mercado-barragem-brumadinho-mariana.htm> Acessado 01/10/19).

Vale, 2018. Demonstrações Financeiras 31 de dezembro de 2018. Disponível: <http://www.vale.com/PT/investors/information-market/financial-statements/FinancialStatementsDocs/BRGAAP%20T18%20-%20Final.pdf> Acessado em 21/01/2019)

VALE, 2017. – Produção e vendas da Vale no 4T17 Disponível: [http://www.vale.com/PT/investors/information-market/Press-Releases/ReleaseDocuments/2017%20Q%20Production%20Report\\_p.pdf](http://www.vale.com/PT/investors/information-market/Press-Releases/ReleaseDocuments/2017%20Q%20Production%20Report_p.pdf) Acessado: 21/01/2020

VAN NIEKERK, H. J.; Viljoen, M. J., Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. *Land Degradation & Development*, Vol. 16, No. 2, pp 201-212, 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.681>.

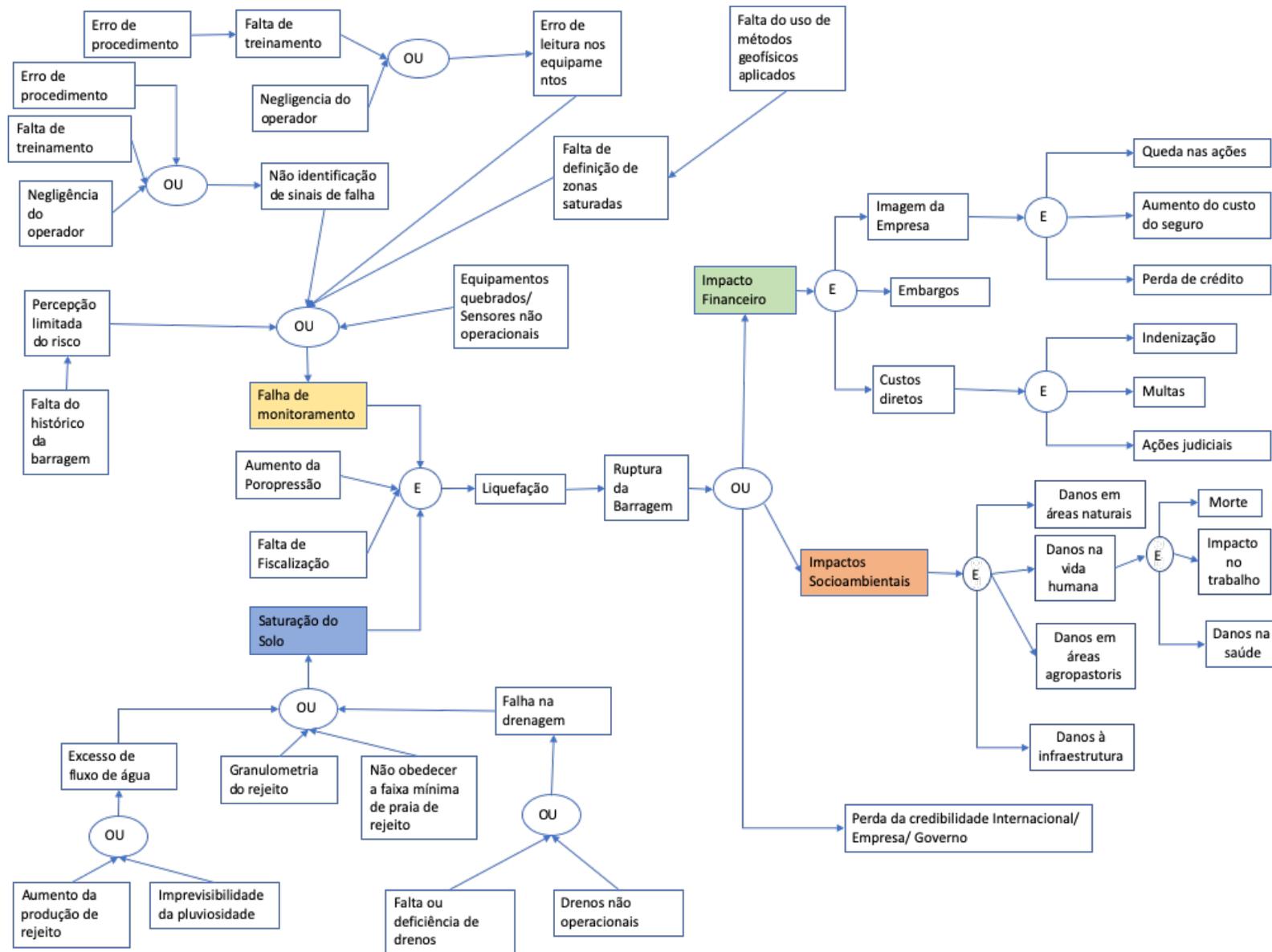
VOLPATO, Fernando; TAVARES, Márcia Ferreira Neves. Uma Análise dos reflexos nas demonstrações contábeis da Vale SA após o reconhecimento de Passivos ambientais pela Samarco SA. In: *Anais do Congresso UFPE de Ciências Contábeis-ISSN: 2525-7927*. 2016.

WILLS, Barry A.; FINCH, James. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann, 2015.

YIN, R. K. Um estudo de caso: planejamento e métodos. 3a edição. Porto Alegre, Bookman, 2005.

ZHENG, Xin et al. Risk Assessment of Tailings Dam Break Due to Overtopping. *EJGE*, v. 21, n. 7, p. 1641-1649, 2016.

## APÊNDICE 1 – Série de Risco do rompimento de uma barragem de rejeito por liquefação



## ANEXO 1 – Série histórica de acidentes de Barragens de Rejeitos 1915 a 2019

Este anexo é uma parte do conteúdo retirado do site CSP2 (Bowker, 2019).

<b>MINE/PROJECT &amp; LOCATION</b>	<b>COUNTRY</b>	<b>ORE TYPE</b>	<b>DATE</b>	<b>RELEASE (m3)</b>	<b>RUN OUT (km)</b>	<b>DEATHS</b>
Mina Córrego do Feijão, Ma#1 and Dam #6, Vale, Minas Gerais Brazil	Brazil	Fe	25/jan/19	12.000.000	8	300
Cerro Crona Mine, GoldFields, Cajamarca, Peru	Peru	Cu,Au	16/dez/18	0	0	0
Rosebery Mine 2 5 TSF, MMG, Tasmania, Australia	Australia	Zn/Cu/Au	10/out/18	0	0	0
Duke Energy, LV Sutton Power Station, Cape Fear North Carolina, unident1 of 3	USA	Coal	20/set/18	0	0	0
Duke Energy, HF Lee Power Plant , Goldsboro, North Carolina, 3 ashponds submerged	USA	Coal	xx-Sep-18	0	0	0
Duke Energy, LV Sutton Power Station, Cape Fear North Carolina, unident2 of 3	USA	Coal	13/set/18	0	0	0
Antamok Mine , TSF#3 Itogon Benguet Mining Corp, Phillipines	Phillipens	AU	18/Aug/18	0	0	0
Cineguita, Mexico	Mexico	AU/AG	5/Jun/18	439.000	26	5
Caserones Copper Mine, Lumina Copper, Chile	Chile	CU	20/Mar/18	15	0	0
Huancapatí Áncash , Peru Compañía Minera Lincuna SA (Grupo Picasso), Tailings Dam # 3	Peru		3/Mar/18	80.000	0	0
Cadia, NSW Australia, (Newcrest Mining Ltd)	Australia	AU,CU	9/Mar/18	0	0	0
Barcarena, Pará, Brazil , Alunorte(Hydro Alu	Brazil	Bauxite	17/Feb/18	0	0	0

Norte/Norsk Hydro ASA)						
Compartment 2 Heric Platinum Project (ferrochrome) South Africa	South Africa	PL	29/Dec/17	0	0	0
Kentucky Power & Light	USA	coal	5/Oct/17	0	0	1
Kokoya Gold Mine, MNG Gold Mining Ltd, Monrovia, Liberia Avesoro Holding	Liberia	AU	9/Sep/17	11.356	0	0
Vedanta Aluminium Limited Smelter Ash Pond, Jharsuguda, India	India	Al	28/Aug/17	2.625.000	0	0
Husab, Namibia (Swakop Uranium (Taurus Minerals))	Namibia	U	7/Jul/17	0	0	0
Highland Valley Copper, British Columbia, Canada ( Teck Resources)	Canada	Cu	8/Apr/17	850	0	0
Mishor Rotem, Israel (ICL Rotem)	Israel	P	30/Jun/17	100.000	20	0
Husab, Namibia (Swakop Uranium (Taurus Minerals))	Namibia	U	xx/May/17	0	0	0
Tonglvshan Mine, Hubei Province, China (China Daye Ltd.)	China	Cu Au Ag Fe	12/Mar/17	200.000	0	2
Antamok, Baguio, Philippines (Benguet Corp.)	Phillipens	Au?	28/Oct/16	50.000	0	0
Duke Energy Coal Ash Overt	USA	coal	1/Oct/16	0	0	0
New Wales plant, Mulberry, Polk County, Florida (Mosaic Co)	USA	P	27/Aug/16	800.000	0	0
Louyang Xiangjiang Wanji Aluminum, China	China	Al	10/Aug/16	2.000.000	0	0
Hpakant, Kachin state, Myanmar	Myanmar	Jade	21/Nov/15	0	0	115

Sepon Mine Western TSF Pipeline MMG as Lane Zane Minerals,Savannakhet Province Laos	Laos	Cu/AU		0	0	0
Fundao (Germano), Minas Gerais, Brazil ,Samarco( Vale & BHP)	Brazil	Fe	5/Nov/15	45.000.000	637	19
Gold King Mine, near Silverton, Colorado	USA	Au	5/Aug/15	11.356	0	0
Yellow Giant Mine, Banks Island, British Columbia, Canada	Canada	Au	25/Jun/15	240	1	0
Rosario Mine, San Luis Potosi Mexico, Santa Cruz Silver Mining LTD.	Mexico	Ag	xx/Jan/15	2.000	0	0
Queensland Nickel,Yabulu Refnery,( Clive Pamer), Townsville Australia	Australia	NI	04/xx/2014	0	0	0
Herculano Iron Mine, Itabirite, Minas Gerais, Brazil	Brazil	Fe	10/Sep/14	0	0	3
Buenavista del Cobre mine, Cananea, Sonora, Mexico (Grupo Mexico)	Mexico	Cu	7/Aug/14	40.000	0	0
Imperial Metals, Mt Polley, British Columbia, Canada	Canada	Cu Au	4/Aug/14	23.600.000	7	0
Dan River Steam Station, North Carolina (Duke Energy)	USA	Coal	2/Feb/14	334.000	0	0
Coalmont Energy Corporation, Basin Coal Mine	Canada	Coal	24/Aug/13	30	30	0
Arcelor Mittal, Minorca Mine ,Minnesota	USA			0	0	0
Arcelor Mittal, Minorca Mine ,Minnesota	USA			0	0	0
Arcelor Mittal, Minorca Mine ,Minnesota	USA			0	0	0
Minas De Bacis Mine Co, Mexico	Mexico			0	130	0

Durango, Mexico	Mexico		21/Jan/13	0	0	1
Zangezur Copper Molybdenum Combine, Armenia	Armenia	Cu Mo	15/Nov/13	0	0	0
Obed Mountain Coal Mine Alberta, Canada (Sherritt International)	Canada	Coal	31/Oct/13	670.000	0	0
Casa Berardi Mine, La Sarre, Abitibi region, Quebec (Hecla Mining Company)	Canada	Au	May/13	57.000	0	0
Gullbridge Mine Newfoundland	Canada	Cu	17/Dec/12	100.000	0	0
Sotkamo, Kainuu Province, Finland (Talvivaara)	Finland	Ni U	04/nov/12	240.000	0	0
Padcal No 3, Benquet Philippines (Philex)	Phillipens	Au Cu	2/Aug/12	13.000.000	0	0
Hudson Bay (HB) Mine, Salmo, British Columbia (Regional District of Central Kootenay & Teck)	Canada	Pb Zn	11/Jul/12	0	0	0
Johson Gold Mining Corporation at Baranggay Bangong-Bayan	Phillipens	Au	13/Apr/12	0	0	0
Mineracao Serra Grande Tailings Dam ,State of Goias Brazil, (Anglo Ashanti)	Brazil	AU		900	0	0
Mianyang City, Songpan County, Sichuan Province, China	China	Mn	21/Jul/11	10.000	0	0
Bloom Lake, Triangle Tailings Pond, Quebec, Canada (Cleveland Cliffs)	Canada	Fe	May/11	200.000	0	0
Ray Mine, Eder Gulch TSF, Asarco, Hayden, AZ, USA	USA	Cu	05/mai/11	3.600	0	0

Vales Point Ash Dam, Wyong (Delta), New South Wales	Australia	coal		0	0	0
Ajka Alumina Plant, Kolontár, Hungary (MAL Magyar Aluminum) #2	Hungary	Al	4/Oct/10	1.000.000	0	10
Zijin Mining, Xinyi Yinyan Tin Mine, Guangdong Province, China	China	Sn	21/Sep/10	0	0	22
Huancavelica, Peru, Unidad Minera Caudalosa Chica Mine	Peru	Ag, Cu, Pb, Zn	25/Jun/10	21.420	0	0
Las Palmas, Pencahue, VII Region, Maule, Chile (COMINOR)	Chile		27/Feb/10	0	1	4
Veta del Agua Tranque No. 5, Nogales, V Region, Valparaíso, Chile	Chile	Cu	27/Feb/10	80.000	0	0
Tranque Adosado Planta Alhué, Alhué, Region Metropolitana, Chile	Chile		27/Feb/10	0	0	0
Tranque Planta Chacón, Cachapoal, VI Region, Rancagua, Chile	Chile		27/Feb/10	0	0	0
Tranque Adosado Planta Alhué, Alhué, Region Metropolitana, Chile (Florida Mining)	Chile		27/Feb/10	0	0	0
Karamken, Magadan Region, Russia (cyanide-leach processing facility of gold mines in the region)	Russia	Au	29/Aug/09	1.200.000	0	1
Huayuan County, Xiangxi Autonomous Prefecture, Hunan Province, China	China	Mn	14/May/09	50.000	0	3
Coircancho, Gold Hawk, Peru Tailings	Peru	AgAUPBZN	8/May/17	0	0	0

Kingston fossil plant, Harriman, Tennessee, USA (TVA)	USA	Coal	22/Dec/08	4.100.000	4	0
Lixi Tailings Dam(?)Taoshi, Linfen City, Xiangfen county, Shanxi province, China (Tahsan Mining Co.)	China	Fe	8/Sep/08	268.000	3	254
Long Lake Cotainment Ektaki Mine, Northwest Territories, CA (BHP Billiton)	Canada	diam	1/May/08	0	0	0
Glebe Mines, UK	UK	F	22/Jan/07	20.000	0	0
Mineracao Rio Pomba Cataguases, Mirai, Minas Gerais, Brazil, Mineração (Industrias Quimicas Cataguases)	Brazil	Al	10/Jan/07	2.000.000	0	0
Dayton Power & Light	USA	coal	25/Jul/06	0	0	1
Fonte Santa ,Freixia De Espado a Cinta, Portugal	Portugal	?	27/Nov/06	1.600	3	0
Nchanga, Chingola, Zambia (Konkola Copper Mines - Vedanta)	Zambia	Cu	6/Nov/06	0	0	0
Miliang, Zhen'an County, Shangluo, Shaanxi Province, China	China	Au	30/Apr/06	0	5	17
Mineracao Rio Pomba Cataguases, Mirai, Minas Gerais, Brazil, Mineração (Industrias Quimicas Cataguases)	Brazil	Al	Mar/06	2.000.000	0	0
Prestea Gold Mine Bogosa Gold Ltd. Ghana inc#2 ,Golden Star Resources	Ghana	AU	18-Jun-05	0	0	0
Bangs Lake, Jackson County, Mississippi, USA (Mississippi Phosphates Corp)	USA	P	14/Apr/05	64.350	0	0

Pinchi Lake, BC, Canada (Teck Cominco Ltd.)	Canada	Hg	30/Nov/04	7.000	0	0
Prestea Gold Mine Bogoso Gold Ltd. Ghana inc#1	Ghana	Au	23-Oct-04	0	0	0
Riverview, Florida, USA	USA	P	5/Sep/04	227.000	0	0
Partizansk, United Energy Systems(Dalenergo),Primorski Krai, Russia	Russia	Coal	22/May/04	160.000	0	0
Malvési, Aude, France (Comurhex, Cogéma/Areva)	France	U	20/Mar/04	30.000	0	0
Cerro Negro, near Santiago, Chile, (5 of 5)	Chile	Cu	3/Oct/03	80.000	20	0
Sasa Mine, Macedonia	Macedonia	Pb-Zn	30/Aug/03	85.000	12	0
Mineracao Rio Pomba Cataguases, Mirai, Minas Gerais, Brazil, Mineração (Industrias Quimicas Cataguases)	Brazil	Al	2003	2.000.000	0	0
El Cobre, Chile - El Soldado (Exxon)	Chile	Cu	8/Nov/02	4.500	0	0
El Cobre, Chile, 2, 3, 4, 5 (Exxon)	Chile	Cu	22/Sep/02	8.000	0	0
San Marcelino Zambales, Philippines, Bayarong dam (Benguet Corp-Dizon Copper-Silver Mines Inc)	Phillipens	Cu Au	11/Sep/02	1.000.000	0	0
Thalanga Mine, Queensland Australia	Australia	Cu Pb Zn	xxAug2002	0	0	0
San Marcelino Zambales, Philippines, Camalca dam (Benguet Corp-Dizon Copper-Silver Mines)	Phillipens	Cu Au	27/Aug/02	0	0	0
Cuajone,Peri	Peru		23/6/2001	0	0	0
Tarkwa, Ghana (Goldfields)	Ghana	Au	16/Oct/01	0	0	0

Sebastião das Águas Claras, Nova Lima district, Minas Gerais, Brazil	Brazil	Fe	22/Jun/01	0	8	2
Nandan Tin mine, Dachang, Guangxi	China	Sn	18/Oct/00	0	0	28
Inez, Martin County, Kentucky, USA (Massey Energy subsidiary Martin Co. Coal Corp)	USA	Coal	11/Oct/00	1.068.500	120	0
Aitik mine, near Gällivare, Sweden (Boliden Ltd)	Sweden	Cu	8/Sep/00	1.800.000	5	0
Borsa, Romania (Remin S.A - govt)	Romania	Pb Zn	10/mar/00	9.140	0	0
Baia Mare, Romania	Romania	Au	30/Jan/00	100.000	100	0
Toledo City, Philippines (Atlas Con Mining Corp)	Phillipens	Cu	9/Aug/99	5.700.000	0	0
Red Mountain, BC	Canada	Au Ag	5/Jun/99	10.000	0	0
Surigao Del Norte Placer, Philippines (#3 of 3) (Manila Mining Corp)	Phillipens	Au	26/Apr/99	29.000	12	4
Huelva, Spain (Fertiberia, Foret)	Spain	P	31/Dec/98	50.000	0	0
Zamboanga Del Norte, Sibutad Gold Project (Philex Mining Corp)	Phillipens	Au	27/Jun/98	0	0	0
Los Frailes, near Seville, Spain (Boliden Ltd.)	Spain	Pb Zn	25/Apr/98	6.800.000	41	0
Mulberry Phosphate, Polk County, Florida, USA (Mulberry Phosphate)	USA	P	7/Dec/97	200.000	0	0
Zamboanga Del Norte, Sibutad Gold Project (Philex Mining Corp)	Phillipens	Au	6/Nov/97	0	0	0
Pinto Valley, Arizona, USA (BHP Copper)	USA	Cu	22/Oct/97	230.000	0	0
Tranque Antiguo Planta La Cocinera, IV Region, Vallenar, Chile	Chile	?	14/Oct/97	60.000	0	0

Algarrobo, IV Region, Vallenar, Chile	Chile	Fe	14/Oct/97	0	0	0
Algarrobo, IV Region, Vallenar, Chile	Chile	Fe	14/Oct/97	0	0	0
Maitén, IV Region, Vallenar, Chile	Chile	?	14/Oct/97	0	0	0
Laisfall(Boliden)	Sweden	Pb/Zn/Ag		0	0	0
Caraveli,Nazca, Peru	Peru			0	0	0
Amatista, Nazca, Peru	Peru	?	12/Nov/96	300.000	0	0
El Porco, Bolivia (Comsur-62%, Rio Tinto-33%)	Peru	Pb Zn	29/Aug/96	166.000	0	0
Marcopper Mine,Tapian Pit Marinduque Island, Philippines (#2 of 2) (Placer Dome and President Marcos)	Phillipens	Cu	24/Mar/96	1.600.000	26	0
Sgurigrad, Bulgaria	Bulgaria	Pb Zn	1996	220.000	6	0
Negros Occidental, Bulawan Mine Sipalay River, Philippines (Philex Mining Corp)	Phillipens	Au	8/Dec/95	0	0	0
Golden Cross, Waitekauri Valley, New Zealand (Coeur d'Alène Mines)	New Zeland	Au	Dec/95	100	0	0
Surigao del Norte Placer, Philippines (Manila Mining Corp)	Phillipens	AU	xx/apr/95	0	0	0
Surigao del Norte Placer, Philippines (#2 of 3) (Manila Mining Corp) 2nd event	Phillipens	Au	2/Sep/95	50.000	0	12
Omai Mine, Tailings dam No 1, 2, Guyana (Cambior)	Guyana	Au	19/Aug/95	4.200.000	80	0
Middle Arm, Launceston, Tasmania	Tasmania	Au	25/Jun/95	5.000	0	0
Riltec, Mathinna, Tasmania	Tasmania	Au	Jun/95	40.000	0	0
Tapo Canyon Northbridge California	USA		17/an/94	135.000	0	0

Hopewell Mine, Hillsborough County, Florida, USA	USA	P	19/Nov/94	1.900.000	0	0
Payne Creek Mine, Polk County, Florida, USA	USA	P	2/Oct/94	6.800.000	0	0
Fort Meade Phosphate, Florida, USA	USA	P	Oct/94	76.000	0	0
IMC-Agrico Phosphate, Florida, USA	USA	P	Jun/94	0	0	0
Mineracao Serra Grande Tailings Dam Anglo Ashanti, State of Goias Brazil	Brazil	AU	Feb/94	1.000	0	0
Merriespruit, near Virginia, South Africa (Harmony) - No 4A Tailings Complex	South Africa	Au	22/Feb/94	600.000	4	17
Olympic Dam, Roxby Downs, South Australia, (BHP)	Australia	Cu U	14/Feb/94	5.000.000	0	0
Minera Sera Grande: Crixas, Goias, Brazil	Brazil	Au	Feb/94	0	0	0
Fort Meade, Florida, Cargill phosphate (#3 of 3)	USA	P	Jan/94	76.000	0	0
Longjiaoshan, Daye Iron Ore mine, Hubei	China	Fe	Jan/94	0	0	31
Marcopper, Marinduque Island, Mogpog Philippines (12/6) (#1 of 2) (Placer Dome-President Marcos)	Phillipens	Cu	6/Dec/93	0	0	2
Gibsonton, Florida, USA (Cargill)	USA	P	Oct/93	0	0	0
TD 7, Chingola, Zambia	Zambia	Cu	Aug/93	42	0	0
Itogon-Suyoc, Baguio gold district, Luzon, Philippines (Benguet Corp)	Phillipens	Au Ag	26/Jun/93	0	0	0
Saaiplaas, South Africa, failure on south ring dyke (22Mar93)	South Africa	Au	22/Mar/93	100	0	0

Saaiplaas, South Africa, 2 failures on west ring dyke (18-19Mar93)	South Africa	Au	18/Mar/93	100	0	0
Ray Complex, Pinal County, Arizona, AB-BA Impoundment	USA	Cu	9/Jan/93	216.000	0	0
Marsa, Peru (Marsa Mining Corp)	Peru	Au	1993	0	0	6
Maritsa Istok 1, Bulgaria	Bulgaria	Coal	1/Mar/92	500.000	0	0
Tubu, Benguet, No.2 Tailings Pond, Luzon, Philippines - Padcal (Philex)	Phillipens	Cu	2/Jan/92	32.243.000	0	0
Ajka Alumina Plant, Kolontár, Hungary #1	Hungary	Al	3/Nov/91	43.200	0	0
Iron Dyke, Sullivan Mine, Kimberley, BC, Canada (Cominco, Inc)	Canada	Pb Zn	23/Aug/91	75.000	0	0
Magma Mine Tailings Dam #3	USA	Cu	4/Jan/91	8.000	0	0
Brewer Gold Mine Jefferson South Carolina	USA	Au	1/Nov/90	41.640	0	0
Matachewan Mines, Kirtland Lake, Ontario	Canada	U	17/Oct/90	190.000	0	0
Little Bay Newfoundland	Canada			500.000	0	0
Silver King, Idaho, USA (#2 see incident #109 1974)	USA	Ag Pb	5/Aug/89	100	0	0
Stancil, Maryland, USA	USA	Sand	1989	38.000	0	0
Southern Clay, Tennessee, USA	USA	Clay	1989	300	0	0
Thompson Creek, Idaho, USA (Cyprus)	USA	Mo	1989	0	0	0
Unidentified, Hernando, County, Florida, USA #2	USA	Limestone	Sep/88	4.600	0	0
Jinduicheng, Shaanxi Province., China	China	Mo	30/Apr/88	700.000	0	20
Consolidated Coal No.1, Tennessee, USA,	USA	Coal	19/Jan/88	250.000	0	0
Riverview, Hillsborough County, Florida	USA	P	1988	246	0	0

Unidentified, Hernando, County, Florida, USA	USA	Limestone	1988	0	0	0
Rain Starter Dam, Elko, Nevada, USA	USA	Au	1988	0	0	0
Surigao Del Norte Placer, Philippines (#1 of 3) (Manila Mining Corp)	Phillipens	Au	9/Jul/87	0	0	0
Montcoal No.7, Raleigh County, West Virginia, USA	USA	Coal	8/Apr/87	87.000	0	0
Bekovsky, Western Siberia	Siberia	Coal	25/Mar/87	0	0	0
Xishimen, China	China	Fe	21/Mar/87	2.230	0	0
Montana Tunnels, MT, USA (Pegasus Gold)	USA	Au	1987	0	0	0
Marianna Mine #58, PA	USA	Coal	19/Nov/86	0	0	0
Mankayan District, Luzon, Phillippines, No.3 Tailings Pond (Benguet Corp subsidiary Lepanto Con Mining Co)	Phillipens	Cu Au	17/Oct/86	100.000	0	0
Pico de Sao Luis, Minas Gerais, Brazil Fernandinho, Rio Acima	Brazil	Fe	2/Oct/86	0	0	0
Story's Creek, Tasmania	Tasmania	Sn	16/May/86	100	0	0
Rossarden, Tasmania	Tasmania	Sn	16/May/86	0	0	0
Itabirito, Minas Gerais, Brazil	Brazil	Fe	May/86	41.000	12	7
Mineral King, BC, Canada	Canada	Pb Zn	20/Mar/86	0	0	0
Huangmeishan, China	China	Fe	1986	0	0	19
Spring Creek Plant, Borger, Texas, USA	USA	Sand	1986	0	0	0
Bonsal, North Carolina, USA	USA	Sand	17/Aug/86	11.000	1	0
Prestavel Mine - Stava, North Italy, 2, 3 (Prealpi Mineraria)	Italy	F	19/Jul/85	200.000	8	269
La Belle, Pennsylvania, USA	USA	Coal	17/Jul/85	0	0	0

Cerro Negro No. (4 of 5)	Chile	Cu	3/Mar/85	500.000	8	0
Veta de Agua	Chile	Cu	3/Mar/85	280.000	5	0
Niujaolong, Shizhuyuan Non-ferrous Metals Co., Hunan	China	P	1985	731.000	4	49
Quintette, MaËmot, BC, Canada	Canada	Coal	1985	2.500.000	3	0
Olinghouse, Nevada, USA	USA	Au	1985	25.000	2	0
El Cobre No. 4 - El Soldado (Exxon)	Chile	Cu	1985	0	0	0
Marga, Chile - El Teniente (Codelco)	Chile	Cu	1985	0	0	0
Texasgulf 4B Pond, Beaufort, Co., North Carolina, USA	USA	P	Apr/84	0	0	0
Battle Mt. Gold, Nevada,	USA	Au	1984	0	0	0
Virginia Vermiculite, Louisa County, Virginia, USA	USA	Vermiculite	1984	0	0	0
Clayton Mine, Idaho, USA	USA	Ag Pb	2/Jun/83	0	0	0
Grey Eagle, California, USA	USA	Au	1983	100	0	0
Vallenar 1 and 2	Chile	Cu	1983	0	0	0
Sipalay, Phillippines, No.3 Tailings Pond (Maricalum Mining Corp)	Phillipens	Cu	8/Nov/82	11.618.257	0	0
Royster, Florida, USA	USA	Gypsum	1982	0	0	0
Ages, Harlan County, Kentucky, USA	USA	Coal	18/Dec/81	96.000	0	1
Dixie Mine, Colorado, USA	USA	Au	Apr/81	0	0	0
Balka Chuficheva, Russia	Russia	Fe	20/Jan/81	3.500.000	1	0
Texasgulf No. 1 Pond, Beaufort Co., North Carolina, USA	USA	P	1981	0	0	0
Veta de Aqua A	Chile	Cu	1981	0	0	0

Veta de Agua B	Chile	Cu	1981	0	0	0
San Nicolas Cajamarca Peru	Peru			0	0	0
Tyrone, New Mexico (Phelps Dodge)	USA	Cu	13/Oct/80	2.000.000	8	0
Sweeney Tailings Dam, Longmont, Colorado, USA	USA	Sand	May/80	0	0	0
Marga, Sewell, VI Region, Rancagua, Chile - El Teniente (Codelco)	Chile	Cu	Jun/05	0	0	0
Arena, Sewell, VI Region, Rancagua, Chile - El Teniente (Codelco)	Chile	Cu	Jun/05	0	0	0
Kyanite Mining, Virginia, USA	USA	Kyanite	1980	0	0	0
Churchill Copper, BC	USA	Cu	1/Dec/79	37.854	0	0
Churchrock, New Mexico, United Nuclear	USA	U	16/Jul/79	370.000	0	0
Union Carbide, Uravan, Colorado, USA	USA	U	Mar/79	0	0	0
Unidentified, British Columbia, Canada	Canada		1979	40.000	0	0
Suncor E-W Dike, Alberta, Canada	Canada	Oil Sands	1979	0	0	0
Arcturus, Zimbabwe	Zimbabwe	Au	31/Jan/78	39.000	0	1
Norosawa, Japan	Japan	Au	14/Jan/78	0	0	0
Mochikoshi Dike No 1 ( of 3), Sagami Bay Nr Izu Japan (2 of 2)	Japan	Au	14/jan/78	80.000	8	1
Mochikoshi Dike No 2 ( of 3),Sagami Bay Nr Izu Japan (2 of 2)	Japan	Au	14/jan/78	3.000	0	0
Mochikoshi Dike no 3(of 3), Sagami Bay Nr Izujapan (2 of 2)	Japan	Au	14/jan/78	0	0	0
Hirayama, Japan	Japan	Au	15/jan/78	0	0	0
Syncrude, Alberta, Canada	Canada	Oil Sands	1978	0	0	0

Madison, Missouri, USA	USA	Pb	28/Feb/77	0	0	0
Grants, Milan, New Mexico, USA mill site (Homestake Mining)	USA	U	Feb/77	30.000	0	0
Western Nuclear, Jeffrey City, Wyoming, USA #2	USA	U	1977	40	0	0
Pit No. 2, Western	Australia	REE	1977	0	0	0
Unidentified, Hernando, County, Florida, USA	USA	Limestone	1977	0	0	0
Kerr-McGee, Churchrock, New Mexico, USA	USA	U	Apr/76	0	0	0
Zletovo No. 4, Yugoslavia	Yugoslavia	Pb Zn	Mar/76	300.000	0	0
Dashihe, China	China	Fe	1976	0	0	0
Unidentified, Idaho, USA	USA	P	1976	0	0	0
Cadet No. 2, Montana,	USA	Barite	Sep/75	0	0	0
Silverton, Colorado, USA	USA	Au Ag	Jun/75	48.133	0	0
Madjarevo, Bulgaria	Bulgaria	Pb Zn	Apr/75	250.000	20	0
Carr Fork, Utah, USA (Anaconda)	USA	Cu Au	Feb/75	0	0	0
Mike Horse, Montana, USA (Asarco)	USA	Pb Zn	1975	150.000	0	0
Dresser No. 4, Montana,	USA	Barite	1975	0	0	0
Keystone Mine, Crested Butte, Colorado, USA	USA	Mo	1975	0	0	0
Heath Steele main dam, Brunswick, Canada (American Metals)	Canada	Pb Zn	1975	0	0	0
PCS Rocanville, Saskatchewan, Canada	Canada	K	1975	0	0	0
Unidentified, Green River, Wyoming, USA	USA	Trona	1975	0	0	0
Bafokeng, South Africa, MorenskyTailings dam (2nd occurrence)	South Africa	Pt	11/Nov/74	13.000.000	45	13
Golden Gilpin Mine, Colorado, USA	USA	Au	Nov/74	0	0	0

Deneen Mica Yancey County, North Carolina, USA	USA	Mica	Jun/74	38.000	0	0
Silver King, Idaho, USA	USA	Ag	16/Jan/74	6.000	0	0
Galena Mine, Idaho, USA #2 of 2 (ASARCO)	USA	Ag Pb	15/Jan/74	3.800	1	0
Berrien, France	France	Ag Pb	1974	0	0	0
GCOS, Alberta, Canada	Canada	Oil Sands	1974	0	0	0
Unidentified, Mississippi, USA #2	USA	Gypsum	1974	0	0	0
Unidentified, Canaca, Mexico	Mexico	Cu	1974	0	0	0
Ray Mine, Arizona, USA inc #2 (Kennecott)	USA	Cu	5/Feb/73	0	0	0
Bafokeng, South Africa, MorenskyTailings dam, #1 of 2	South Africa	Pt		40.000	..04	0
(unidentified), Southwestern USA	USA	Cu	1973	170.000	25	0
Earth Resources, N M,	USA	Cu	1973	0	0	0
Ray Mine, Arizona, USA	USA	Cu	2/Dec/72	0	0	0
Brunita,Spain,Caragena, Spain (SMM Penaroya)	Spain	Zn, Pb, Cu	20/Oct/72	70.000	0	1
Buffalo Creek, West Virginia, USA (Pittson Coal Co.)	USA	Coal	26/Feb/72	500.000	64	125
Galena Mine, Idaho, USA #1 of 2 (ASARCO)	USA	Ag Pb	1972	0	0	0
Atacocha, Peru	Peru			0	0	0
Cities Service, Fort Meade, Florida, phosphate	USA	P	3/Dec/71	9.000.000	120	0
Certej gold mine, Romania	Romania	Au	30/Oct/71	300.000	0	89
Pinchi Lake, BC, Canada	Canada	Hg	1971	0	0	0
Ticapampa, Alianza,Peru	Peru			0	0	0
Chungar Peru	Peru		xx/Mar/71	0	0	0

Western Nuclear, Jeffrey City, Wyoming, USA	USA	U	1971	0	0	0
Mfulira, Zambia (Roan Consolidated Mines)	Zambia	Cu	Sep/70	68.000	0	89
Maggie Pye, United Kingdom, clay	UK	Clay	Jan/70	15.000	0	0
Park, United Kingdom	UK	Clay	1970	0	0	0
Portworthy, United Kingdom	UK	Clay	1970	0	0	0
Unidentified, Mississippi, USA	USA	Gypsum	1970	0	0	0
Almivirca, Quiruvilca, Peru, #2inc	Peru		1970	0	0	0
Williamsport Washer, Maury County, Tennessee, USA	USA	P	1970	0	0	0
Buenaventura, Peru	Peru			0	0	0
Phoenix Copper, BC	Canada	Cu	12/set/69	11.356	0	0
Bilbao, Spain	Spain	Fe	1969	115.000	0	0
Monsanto Dike 15, TN,	USA	P	1969	0	0	0
Yauli-Yacu, Peru	Peru			0	0	0
Stoney Middleton, UK	UK	?	8/Feb/68	0	0	0
Hokkaido, Japan	Japan	Pb Zn	1968	90.000	0	0
Agrico Chemical, Florida, USA	USA	P	1968	0	0	0
IMC K-2, Saskatchewan, Canada	Canada	K	1968	0	0	0
Iwiny Tailings Dam, Poland	Poland		13/dez/67	4.600.000	0	18
Climax, Colorado, USA - Mill (Climax Molybdenum Co)	USA	Mo	2/Jul/67	12.000	0	0
Mobil Chemical, Fort Meade, Florida, phosphate	USA	P	Mar/67	2.000.000	0	0
Unidentified, United Kingdom	UK	Coal	1967	0	0	0
Unidentified, United Kingdom #3	UK	Coal	1967	0	0	0

Unidentified, United Kingdom #2	UK	Sand	1967	0	0	0
Aberfan, South Wales Colliery	UK	Coal	21/Oct/66	162.000	0	144
Geising/Erzgebirge, German Democratic Republic VEB Zinnerz	German	tin	09/10/1966	70.000	0	0
Mir Mine,(Placalnica) Sgorigrad, Bulgaria	Bulgaria	Pb Zn	May/66	450.000	8	488
Williamthorpe, UK	UK	Coal	24/Mar/66	0	0	0
Unidentified, Texas, USA	USA	Gypsum	1966	130.000	0	0
Gypsum Tailings Dam (Texas, USA)	USA	Gypsum	1966	85.000	0	0
Derbyshire, United Kingdom	UK	Coal	1966	30.000	0	0
Williamthorpe, UK #2	UK	Coal	1966	0	0	0
Tymawr, United Kindom Inc#2 ( see 1961)	UK	Coal	29/Mar/65	0	1	0
El Cobre Old Dam	Chile	Cu	28/Mar/65	1.900.000	12	200
El Cobre New Dam	Chile	Cu	28/Mar/65	350.000	12	0
La Patagua New Dam, Chile (La Patagua - private)	Chile	Cu	28/Mar/65	35.000	5	0
Los Maquis No. 3	Chile	Cu	28/Mar/65	21.000	5	0
Bellavista, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	70.000	1	0
Hierro Viejo, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	800	1	0
Ramayana No. 1, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	150	0	0
Cerro Blanco de Polpaico, Chile	Chile	Limestone	28/Mar/65	0	0	0
El Cerrado, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	0	0	0
Los Maquis No. 1	Chile	Cu	28/Mar/65	0	0	0
Sauce No. 1, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	0	0	0
Sauce No. 2, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	0	0	0
Sauce No. 3, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	0	0	0

Sauce No. 4, Chile	Chile	Cu	28/Mar/65	0	0	0
Cerro Negro No. (3 of 5)	Chile	Cu	1965	85.000	5	0
American Cyanamid, Florida #2	USA	P	1965	0	0	0
El Cobre Small Dam - El Soldado (Penarroya)	Chile	Cu	1965	0	0	0
N'yukka Creek, USSR	USSR	?	1965	0	0	0
Unidentified, Idaho, USA	USA	P	1965	0	0	0
Castano Viejo, Argentina, Minera Castano Viejo, National Lead Company S.A.	Argentina	Pb,ZN,Au		17.600	2	0
Alcoa, Texas, USA	USA	Al	Oct/64	0	0	0
Utah Construction, Riverton, Wyoming, USA	USA	U	16/Jun/63	100	0	0
Mines Development, Edgemont, South Dakota, USA	USA	U	11/Jun/62	3.300.000	0	0
Huogudu, Yunnan Tin Group Co., Yunnan	China	Sn	1962	11.356.230	5	171
American Cyanamid, Florida	USA	Gypsum	1962	37.854	0	0
Almivirca, Quiruvilca, Peru	Peru		1962	280	0	0
Union Carbide, Maybell, Colorado, USA	USA	U	6/Dec/61	0	0	0
Tymawr, United Kingdom #1	UK	Coal	xx/12/61	0	1	0
Jupille, Belgium	Belgium	Coal	1961	0	0	11
Luciana Tailings Failure Satanna Spain	Spain		01/ago/60	300.000	1	18
Lower Indian Creek, MO, USA	USA	Pb	1960	8.400	0	0
Union Carbide, Green River, Utah, USA	USA	U	19/Aug/59	600.000	0	0
Mailuu-Suu #7 tailings dam (Kyrgyzstan)	Kyrgyzstan	u	16/abr/58	600.000	40	3
Millpo, Peru	Peru			0	0	0
Grootvlei, South Africa	South Africa	Au	1956	0	0	0

Unidentified, Peace River, Florida, USA 3/52	USA	P	Mar/52	0	0	0
Casapalca,Minera Del Centro Peru,Huaro-chiri Province,Peru	Peru	PB/ZN		0	0	0
Chinchan, yauliyacou Mine, Peru	Peru	Ag		0	0	0
Unidentified, Alfaria River, Florida, USA 2/52	USA	P	Feb/52	0	0	0
Unidentified, Peace River, Florida, USA 9/51	USA	P	Sep/51	0	0	0
Unidentified, Peace River, Florida 7/51	USA	P	Jul/51	0	0	0
Unidentified, Peace River, Florida, USA 2/51	USA	P	Feb/51	1.100.000	0	0
Sullivan Mine, Kimberley, BC, Canada	Canadá	Pb Zn	1948	150.000	0	0
Castle Dome, Arizona, USA	USA	Cu	Sep/47	0	0	0
Hollinger, Canada	Canadá	Au	1944	40.000	0	0
Captains Flat Dump 3, Australia	Australia	Cu	1942	0	0	0
Kennecott, Utah, USA	USA	Cu	1942	0	0	0
Kennecott, Garfield, Utah, USA	USA	Cu	1941	0	0	0
St. Joe Lead, Flat Missouri, USA	USA	Pb	1940	10.000.000	0	0
Los Cedros, Tlalpujahua, Michoacán, México	México	Au Ag	May/37	0	11	300
Simmer and Jack, South Africa	África do Sul	Au	1937	2.800.000	0	0
Barahona, Chile	Chile	Cu	Oct/28	3.780.000	0	0
Unidentified, South Africa	África do Sul	Au	1917	180.000	0	0
Agua Dulce, Sewell, VI Region, Rancagua, Chile	Chile	Cu	Jun/15	0	0	0