



**LUISA DE MOURA LEÃO**

**RETROANÁLISE DA RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO DE  
BARRAGENS ALTEADAS À MONTANTE**

**LAVRAS-MG  
2021**

**LUIZA DE MOURA LEÃO**

**RETROANÁLISE DA RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO DE  
BARRAGENS ALTEADAS A MONTANTE**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Saneamento e Geotecnia Ambiental, para obtenção do título de Mestra.



Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro  
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Leão, Luisa de Moura.

Retroanálise da ruptura por liquefação de barragens alteadas a montante / Luisa de Moura Leão. - 2021.

158 p. : il.

Orientador(a): André Geraldo Cornélio Ribeiro.

Coorientador(a): Eduardo Souza Cândido.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Dam break. 2. Ruptura de barragens. 3. Mancha de inundação. I. Ribeiro, André Geraldo Cornélio. II. Cândido, Eduardo Souza. III. Título.

**LUISA DE MOURA LEÃO**

**RETROANÁLISE DA RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO DE BARRAGENS  
ALTEADAS A MONTANTE**

**RETRO-ANALYSIS OF RUPTURE OF DAMS LIQUEFACTION RUPTURE  
AMENDED TO THE UPSTREAM**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, área de concentração em  
Saneamento e Geotecnia Ambiental, para obtenção  
do título de Mestra.

APROVADA em 30 de julho de 2021.

Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro – UFLA

Dr. Eduardo Souza Cândido – UFLA

Dr. Eduardo Antônio Gomes Marques – UFV

Dra. Adilene Gomes Guimarães – UNIFEI

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro  
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2021**

*À minha querida mãe, Luciana, e aos meus saudosos avôs Vítório e Irany,  
que sempre incentivaram os meus estudos.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tantas bênçãos que me foram dadas, e pela alegria de poder concluir mais esta conquista em minha vida pela sua divina providência.

Aos meus orientadores, professores André Ribeiro e Eduardo Cândido, agradeço pela dedicação e pela abertura às minhas ideias para a concepção deste projeto, neste tema que amo tanto. Aos demais professores e técnicos, agradeço pela transmissão de conhecimento.

Aos amigos queridos que ganhei neste mestrado (Lucélia, Gabriel Alvarenga, Gabriel Ruela, Jaqueline, Mateus, Paulo César, Renata e Giselly), obrigada pelos momentos de descontração e leveza que tivemos. Agradeço em especial ao meu amigo-irmão Heriberto Figueiredo, que sempre esteve ao meu lado nos melhores e nos piores momentos.

Às minhas queridas companheiras de vida em Lavras: Pâmela, Patrícia e Vitória, agradeço imensamente pelo apoio no dia-a-dia e pelos momentos de quebra de rotina que tivemos. À Claudiana Alvarenga e Santiago, agradeço pelos momentos de auxílio na pesquisa. Agradeço muito ao meu amigo Bruno Manassés, que teve paciência e disponibilidade para me ensinar a modelagem das rupturas.

Aos amigos de Formiga: Kethlen Reutmann, André Tomé, Cíntia Rocha, Gisa Garcia, Ana Paula Guimarães, Denise Esteves e Viviane Gonçalves, obrigada por sempre acreditarem na minha dedicação, e nunca pouparem palavras de incentivo para que eu não desanimasse.

À minha Família, agradeço pelo apoio e incentivo. Agradeço também aos meus amores que já não estão mais aqui. Meu pai Sérgio, meu avô Vitório e minha avó Irany, sei que torcem por mim do céu. Em especial a minha avó, meu eterno amor, obrigada por tanto!

À minha mãe querida, Luciana, agradeço tudo o que eu sou e consegui até hoje. Tudo isso é fruto do seu trabalho, minha mãe, pela sua dedicação incansável em zelar pelos meus sonhos. Mãe, você é minha maior riqueza e orgulho.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), a qual deu o apoio para realização desde presente trabalho.

*“Queixas-te daquilo que te devia dar a maior felicidade. Onde estaria o teu mérito se tivesses que lutar apenas quando sentisses coragem? O que conta é quando não tiveres nenhuma, mas agires como se tivesses!”*

(Santa Teresinha do Menino Jesus)

## RESUMO

A utilização da disposição de rejeitos de mineração em meio úmido, tal como em barragens, tem sido amplamente utilizada na história da mineração em Minas Gerais, e a presença destas estruturas gerou a necessidade da criação de uma legislação nacional própria ao conhecimento da sua segurança. Da Lei nº 12.334 (2010), a Política Nacional de Segurança de Barragens, até a sua atualização pela Lei nº 14.066 (2020), houve uma década de discussões e proposições de melhorias sobretudo após os rompimentos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), onde os Planos de Segurança das Barragens – PSB, passaram a exigir estudos de *dam break*, ou rompimento hipotético mais rigorosos, sobretudo visando as situações de piores condições. Neste âmbito, este presente trabalho visou a concepção de um estudo de *dam break* em retroanálise destes dois casos, a partir de dados retirados de documentos originais da gestão e auditoria destas barragens. Os hidrogramas foram criados a partir do *software* Hec-HMS® 4.7.1, para diversos métodos de aferição do volume mobilizado na ruptura, obtendo um valor de vazão máxima para Mariana, de 22.082,8 m<sup>3</sup>/s para 32 Mm<sup>3</sup> de rejeitos mobilizados. Para Brumadinho, foi encontrada a vazão máxima de 27.178,9 m<sup>3</sup>/s, para 9,7 Mm<sup>3</sup> dispersados. As manchas de inundação foram obtidas através do *software* Hec-RAS® 6.0, baseado nos modelos digitais de elevação SRTM (resolução de 30 m) e Alos Palsar (resolução de 12.5 m), obtendo uma melhor aferição dos resultados hidrodinâmicos e maior fidelidade à situação real pelo modelo de 12.5 m em ambos os casos de estudo, nas aferições do tempo de chegada da onda, a velocidade e a profundidade máxima da alcançada do fluxo, sobretudo na simulação de risco. Concluiu-se por fim, que houve limitações com o uso do Hec-HMS® devido ao modo de ruptura do *software* só contemplar falhas por *piping* e *overtopping*, porém obteve-se como uso do modo “*piping*”, resultados satisfatórios. O uso do Hec-RAS® com o novo módulo para fluidos não newtonianos mostrou-se muito satisfatória necessitando de poucos ajustes em detrimento do módulo anterior newtoniano, a qual necessitava de ajustes para calibração. As zonas de risco foram bem delimitadas quando comparadas aos dados técnicos disponíveis e aos conceitos de interpretação de engenharia, corroborando para utilização destas técnicas com material gratuito e livre, para estudos de *dam break*.

**Palavras-chave:** Dam Break, Ruptura Hipotética, Hidrograma de Ruptura, Mancha de Inundação.



## ABSTRACT

The use of mining tailings disposal in a wet environment, such as in dams, has been widely used in the history of mining in Minas Gerais, and the presence of these structures generated the need for the creation of a national legislation proper to the knowledge of their safety. From Law No. 12334 (2010), the National Dam Safety Policy, until its update by Law No. 14066 (2020), there was a decade of application and proposals for improvements, especially after the disruptions in Mariana (2015) and Brumadinho (2019), where the Dam Safety Plans - PSB started to require more rigorous studies of dam failure, or hypothetical failure, primarily in the worst situations. In this context, this present work aimed to design a study of dam breakage in retro-analysis of these two cases, based on data taken from original management and audit documents of these dams. The hydrographs were created using the Hec-HMS® 4.7.1 software, for various methods of measuring the volume mobilized at the rupture, obtaining a maximum flow rate for Mariana, of 22,082.8 m<sup>3</sup>/s for 32 Mm<sup>3</sup> of mobilized tailings. For Brumadinho, it was found a maximum flow of 27,178.9 m<sup>3</sup>/s, for 9.7 Mm<sup>3</sup> dispersed. Flood spots were overcome by the Hec-RAS® 6.0 software, based on the digital elevation models SRTM (30 m resolution) and Alos Palsar (12.5 m resolution), obtaining a better measurement of hydrodynamic results and greater fidelity to the real situation by the 12.5 m model in both case studies, in the measurements of the wave arrival time, the velocity and the maximum flow depth reached, especially in the risk simulation. Finally, it was concluded that there were limitations with the use of Hec-HMS® due to the software's rupture mode only contemplating failures due to piping and overtopping, but satisfactory results were obtained using the “piping” mode. The use of Hec-RAS® with the new module for non-newtonian fluids has been shown to be very satisfactory, requiring few adjustments at the expense of the previous Newtonian module, which needs adjustments for calibration. The risk zones were well delimited when compared to the available technical data and engineering interpretation concepts, corroborating the use of these techniques with free and free material, for studies of dam failure.

**Keywords:** Dam Break, Hypothetical Rupture, Rupture Hydrogram, Flood Spot.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico simplificado, com a localização das principais minas e municípios.....	4
Figura 2 - Fluxograma típico do tratamento de minérios.....	6
Figura 3 - Alteamentos (a) montante, (b) jusante e (c) linha de centro.....	8
Figura 4 - Lançamento dos rejeitos no método a montante.....	9
Figura 5 - Lançamento de rejeitos no método a jusante.....	10
Figura 6 - Lançamento de rejeitos no método de linha de centro.....	11
Figura 7 - Distribuição de spigots, em (a) em único ponto e em (b) múltiplos pontos.....	14
Figura 8 - Composição de um hidrociclone (a), atuação dos hidrociclones (b).....	15
Figura 9 - Galgamento com erosão por fenda superficial em material não coeso.....	18
Figura 10 - Galgamento com erosão por fenda frontal em material coeso.....	19
Figura 11 - Falha por erosão interna.....	20
Figura 12 - Constituição do fenômeno de liquefação: (a) proximidade da linha freática do.....	22
Figura 13 - Linha do tempo da legislação de segurança de barragens de rejeito no Brasil.....	25
Figura 14 - Geometria característica da brecha de ruptura.....	32
Figura 15 - Parte do Complexo de Germano em Mariana/MG.....	42
Figura 16 - Barragem do Fundão, vista geral no ano de 2008, após sua implantação.....	47
Figura 17 - Alteamento de montante do Dique 1.....	48
Figura 18 - Processo erosivo interno e surgência no talude da Barragem de Fundão.....	48
Figura 19 - Planta da locação do Dique 1A com representação dos despejos.....	49
Figura 20 - Interligação do reservatório de lama do Dique 2 para o fundo do Dique 1A.....	50
Figura 21 - Recuo da ombreira esquerda da Barragem do Fundão em (a), e surgência.....	51
Figura 22 - Trincas e saturação no recuo da ombreira esquerda.....	52
Figura 23 - Imagem das trincas de tração (A) e compressão (B) na região do eixo recuado.....	53
Figura 24 - Epicentro principal, às 14h13min51seg, na área do Complexo de Germano.....	56
Figura 25 - Macro efeito dos sismos na região da Barragem do Fundão.....	57
Figura 26 - Relação de eventos na ruptura da Barragem do Fundão.....	58
Figura 27 - Detalhamento do rompimento de Fundão.....	58
Figura 28 - Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus da Barragem do.....	59
Figura 29 - Parte da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG.....	66
Figura 30 - Geometria da Barragem I na seção de máxima altura.....	71
Figura 31 - Barragem B1 após rompimento.....	73
Figura 32 - Estrutura final da Barragem B1.....	73
Figura 33 - Relação da área afetada, em (a) pela instalação do DHP 15, e em.....	76
Figura 34 - Desenvolvimento da ruptura da Barragem B1, em Brumadinho.....	79
Figura 35 - Rompimento da Barragem I.....	82
Figura 36 - Correlação dos recalques dados pelo radar, e áreas de foco da ruptura.....	83
Figura 37 - Delimitação da brecha de ruptura por liquefação na Barragem do Fundão.....	96
Figura 38 - Delimitação da brecha de ruptura por liquefação na Barragem B1.....	96
Figura 39 - Decaimento do armazenamento em (a) Fundão e (b) B1.....	101
Figura 40 - Vazão máxima na ruptura em (a) Fundão e em (b) B1.....	102
Figura 41 - Complexo de Germano antes do rompimento.....	110
Figura 42 - Envoltória máxima de inundação por SRTM e Alos Palsar (a).....	116
Figura 43 - Tempo mínimo de chegada em SRTM (a) e Alos Palsar (b).....	118
Figura 44 - Velocidade máxima do fluxo em SRTM (a) e Alos Palsar (b).....	120
Figura 45 - Profundidade máxima da inundação em SRTM (a) e Alos Palsar (b).....	123
Figura 46 - Detalhamento da mancha de inundação em Bento Rodrigues.....	124

Figura 47 - Risco hidrodinâmico por SRTM (a) e Alos Palsar (b). .....	126
Figura 48 - Localização das barragens B1 e B VI.....	132
Figura 49 - Envoltória máxima de inundação por SRTM e Alos Palsar. ....	139
Figura 50 – Detalhamento da mancha de inundação na área administrativa .....	139
Figura 51 - Tempo de chegada por SRTM (a) e Alos Palsar (b).....	140
Figura 52 - Velocidade máxima do fluxo por SRTM (a) e em Alos Palsar (b). ....	142
Figura 53 - Profundidade máxima da inundação em SRTM (a) e Alos Palsar (b).....	144
Figura 54 - Mancha de inundação obtida por Ramam e Liu. ....	146
Figura 55 - Risco hidrodinâmico em SRTM (a) e Alos Palsar (b).....	147
Figura 56 - Mapa de risco hidrodinâmico segundo o PAEBM de B1.....	149

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do material contido na Barragem do Fundão.....	45
Tabela 2 - Análise quantitativa de minerais no rejeito.....	45
Tabela 3 - Parâmetros dos materiais contidos na Barragem do Fundão.....	46
Tabela 4 - Elevação da crista da barragem e velocidade de alteamento. ....	54
Tabela 5 - Sismos registrados pela Rede Sismográfica Brasileira, em 25/11/2015. ....	55
Tabela 6 - Resultados para composição de estudos em 2016.....	69
Tabela 7 - Resultados para composição de estudos em 2017 (Condição drenada). ....	69
Tabela 8 - Resultados para composição da DCE em setembro de 2018. ....	70
Tabela 9 - Relação entre volumes armazenados e mobilizados segundo alguns autores. ....	93
Tabela 10 - Geometria das brechas de ruptura. ....	97
Tabela 11 - Resultados obtidos para os hidrogramas. ....	100
Tabela 12 - Nível de perigo para edificações em função da velocidade do fluxo.....	122
Tabela 13 - Consequências de uma inundação em função do risco hidrodinâmico. ....	125
Tabela 14 - Nível de perigo para edificações em função da velocidade. ....	143
Tabela 15 - Classificação do risco hidrodinâmico. ....	147

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Minério de ferro extraído no Quadrilátero Ferrífero.....	4
Quadro 2 - Relação entre os tipos construtivos de barragens.....	12
Quadro 3 - Relações sobre os alteamentos a montante, jusante e linha de centro.....	13
Quadro 4 - Outros métodos de disposição de rejeitos. ....	16
Quadro 5 - Rompimentos de barragens de rejeito no estado de Minas Gerais.....	29
Quadro 6 - Equipamentos de auscultação e instrumentação de barragens. ....	30
Quadro 7 - Etapas do Estudo de Dam Break.....	31
Quadro 8 - Fontes para a revisão bibliográfica sobre o rompimento em Mariana. ....	44
Quadro 9 - Fontes para a revisão sistemática sobre o rompimento em Brumadinho. ....	68
Quadro 10 - Valores utilizados para entrada no Hec-HMS®.....	99
Quadro 11 - Escoamento em função da Concentração Volumétrica (Cv). ....	113
Quadro 12 - Perda de vidas em função do tempo de aviso. ....	119
Quadro 13 - Critérios para classificação do risco hidrodinâmico e da ameaça potencial. ....	149

# SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE.....</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo Geral .....	2
1.1.2	Objetivos Específicos .....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Mineração em Minas Gerais .....	3
2.2	Beneficiamento de Minério de Ferro .....	5
2.3	Barragens de Disposição de Rejeito.....	7
2.3.1	Tipos Construtivos de Barragens de Rejeito .....	8
2.3.2	Lançamento de Rejeitos em Aterros Hidráulicos .....	14
2.3.3	Outros Métodos de Disposição de Rejeitos.....	16
2.4	Formas de Ruptura de Barragens .....	16
2.4.1	Galgamento ( <i>Overtopping</i> ) .....	17
2.4.2	Erosão Interna ( <i>Piping</i> ) .....	19
2.4.3	Liquefação de Rejeitos .....	20
2.5	Segurança de Barragens .....	23
2.5.1	Legislação Federal e Estadual de Barragens de Rejeito.....	23
2.5.2	Plano de Segurança de Barragens de Mineração (PSB).....	26
2.5.2.1	Revisões Periódicas de Segurança - RPS .....	26
2.5.2.2	Inspeções Regulares e Especiais de Segurança.....	27
2.5.2.3	Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração (PAEBM).....	27
2.5.2.4	Zonas de Autossalvamento.....	28
2.5.2.5	Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) .....	28
2.6	Estudo da Ruptura de Barragens de Rejeito.....	28
2.6.1	Mecanismos de Controle e Inspeção .....	29
2.6.2	Estudos de Ruptura Hipotética .....	30
2.6.2.1	Definição da Brecha de Ruptura .....	31
2.6.2.2	Hidrograma da Ruptura .....	32
2.6.2.3	Propagação da Onda de Rejeitos .....	33
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....</b>	<b>42</b>
	<b>ARTIGO 1 – UMA ANÁLISE DOS RESULTADOS TÉCNICOS DE INVESTIGAÇÃO SOBRE O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO EM MARIANA/MG.....</b>	<b>42</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>42</b>

<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>44</b>
3.1	Caracterização Geotécnica .....	44
3.2	Histórico de Engenharia .....	46
3.3	Sismicidade na Região de Mariana .....	55
3.4	Evolução da Ruptura .....	57
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>ARTIGO 2 – HISTÓRICO E AGRAVANTES TÉCNICAS NA OPERAÇÃO DA BARRAGEM B1 EM BRUMADINHO-MG: UMA ANÁLISE POR RELATÓRIOS INDEPENDENTES.....</b>	<b>66</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>67</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>68</b>
3.1	Caracterização Geotécnica .....	68
3.2	Histórico de Engenharia .....	70
3.3	Gatilhos para Liquefação Estática.....	77
3.4	Evolução da Ruptura .....	78
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>
	<b>ARTIGO 3 – HIDROGRAMAS DE RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO DOS MAIORES ACIDENTES DE BARRAGENS DO BRASIL .....</b>	<b>90</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>91</b>
2.1	Falha nas Barragens do Fundão e B1 .....	91
2.2	Formação da Ruptura .....	92
2.3	Volumes Mobilizados .....	93
2.4	Hidrogramas da Ruptura .....	94
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>95</b>
3.1	Delimitação das Brechas de Ruptura .....	95
3.2	Diagramas de Cota-Volume e Volume Mobilizado .....	97
3.3	Geração dos Hidrogramas .....	97
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>99</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
	<b>ARTIGO 4 – ANÁLISE INVERSA DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM DO FUNDÃO DE MARIANA, MINAS GERAIS, BRASIL</b>	<b>110</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>110</b>

<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>112</b>
2.1	Modelagem de Ruptura pelo Software HEC-RAS® 6.0.....	112
2.2	Escoamento de Fluidos Não-newtonianos .....	112
2.3	Análise de Risco em Ruptura de Barragens .....	114
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>114</b>
3.1	Modelos Digitais de Elevação.....	114
3.2	Hidrograma de Ruptura.....	114
3.3	Modelagem da Mancha de Inundação.....	114
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>116</b>
4.1	Mancha de Inundação .....	116
4.2	Tempo de Chegada .....	117
4.3	Velocidade do Fluxo.....	120
4.4	Profundidade Máxima da Inundação .....	122
4.5	Risco Hidrodinâmico .....	125
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>126</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>128</b>
	<b>ARTIGO 5 – ANÁLISE INVERSA DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM B1 DE BRUMADINHO, MINAS GERAIS, BRASIL. ....</b>	<b>132</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>132</b>
2.1	Modelagem de Ruptura pelo Software HEC-RAS® 6.0.....	134
2.2	Escoamento de Fluidos Não-newtonianos .....	135
2.3	Análise de Risco em Ruptura de Barragens .....	135
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>136</b>
3.1	Modelos Digitais de Elevação.....	136
3.2	Hidrograma de Ruptura.....	136
3.3	Modelagem da Mancha de Inundação.....	136
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>138</b>
4.1	Mancha de Inundação .....	138
4.2	Tempo de Chegada .....	140
4.3	Velocidade do Fluxo.....	142
4.4	Profundidade Máxima da Inundação .....	144
4.5	Risco Hidrodinâmico .....	146
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>153</b>
	<b>TERCEIRA PARTE – CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>157</b>
<b>1</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>157</b>
<b>2</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>158</b>





## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

As atividades extrativas são fonte de desenvolvimento e crescimento econômico no país desde os tempos do Brasil-Colônia. As atividades mineradoras foram responsáveis pela ocupação do nosso território, primeiramente com a produção do ouro e dos diamantes, no período colonial, e com a extração e produção do ferro no Império e no início da República (THOMÉ; PASSINI, 2018).

A mineração está fortemente ligada à história do estado de Minas Gerais, e para Jeber e Profeta (2018) a história da atividade minerária se confunde com a própria história do estado. Tal renome em produção mineral perdura até os dias atuais, pois segundo dados da CODEMIG (2021), o estado é a única fonte nacional de produção de zinco, produtor de 40% dos minerais metálicos no país, e de 50% de todo ouro produzido, além de ser o responsável pela geração de 75% de todo o nióbio do mundo.

Mas, se por um lado a capacidade fornecedora do estado é grande parcela do seu desenvolvimento econômico ao longo dos anos, não devem ser esquecidos também, os elementos negativos recorrentes da exploração mineral como os vários impactos gerados no estado. A atividade mineradora usa de processos complexos de extração e beneficiamento do minério, que geram subprodutos como os rejeitos, que são retirados da mina juntamente com o minério, e precisam de destinação adequada para sua disposição e retorno ao meio ambiente. Dentre alguns meios de disposição de rejeitos, as barragens de contenção e sedimentação têm sido muito utilizadas ao longo dos anos, conhecidas como estruturas controversas.

O histórico de Segurança de Barragens no mundo remonta a diversas décadas atrás, contudo, observou-se nos últimos tempos uma crescente preocupação a respeito do tema e a necessidade de uma maior participação do estado brasileiro (NEVES, 2018), dando voz também para a sociedade particularmente impactada. Para Morris, West e Hassan (2018), o rompimento físico de uma barragem é um fenômeno difícil de prever e modelar, devido à complexa interação de propriedades hidráulicas, estruturais e geotécnicas.

No Brasil, aconteceram alguns casos catastróficos como as rupturas em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que trouxeram apreensão na população no entorno de barragens quanto à segurança destas estruturas. Muitas medidas estão sendo tomadas e aprimoradas pelos órgãos competentes para que acidentes como estes não mais ocorram. Ligado a isto, os problemas

relacionados à sua gestão e engenharia são cada mais postos em evidência, bem como os impactos sociais e ambientais inerentes à sua prática. A adoção de técnicas confiáveis de engenharia, métodos eficientes de controle e instrumentação, e a avaliação criteriosa dos responsáveis técnicos dos empreendimentos e dos agentes fiscalizadores, são ações que, em conjunto, trazem bons resultados.

Coube a Agência Nacional de Mineração – ANM, editar normas que regulamentassem as barragens de mineração, sobretudo após os eventos de Mariana e Brumadinho. Assim, surgiu a Resolução nº 13 (ANM, 2019), que trouxe medidas regulatórias para assegurar a estabilidade de barragens de mineração, principalmente as utilitárias do método "a montante" ou por método declarado como desconhecido.

Assim como as restrições do método a montante, foram exigidas por meio da Resolução nº 32 (ANM, 2020), que os estudos de ruptura hipotéticas barragens (estudos de *Dam Break*), que dão entre outros, a perspectiva da inundação em caso de um possível desastre, fossem elaborados com um grau maior de detalhamento. Esta exigência de melhoria se deu diante das condições que devem ser previstas em caso de ruptura iminente, para alerta aos órgãos responsáveis e a população no entorno. A Resolução, portanto, alterou artigos antigos sobre o tema, menos restritos, da Portaria nº 70.389/2017 do antigo Departamento Nacional de Produção Mineral. O aprimoramento das técnicas dos estudos de ruptura hipotética ou *dam break*, estão em constante discussão nos tempos atuais (SABĂU, ȘERBAN, 2018; RAMAN, LIU, 2019; PILOTTI et al., 2020; URZICĂ et al., 2020), de modo que o aumento da precisão corrobora para melhoria de planejamento dos possíveis danos ambientais e sobretudo humanos nas Zonas de Autossalvamento – ZAS, localizadas próximas às barragens.

Os estudos de retroanálise tentam reaver tais técnicas, de forma de que se aprimorem os meios de execução da análise, em comparação com a situação real encontrada. Segundo Thomé e Passini (2018), quase a metade dos acidentes com barragens ocorridos no final do século XX e início do século XXI envolveu estruturas alteadas com a utilização do método a montante. Corroborando a menção dos autores, pode-se colocar as barragens de Mariana e Brumadinho como exemplos para executar uma retroanálise em busca das lições aprendidas nestes casos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Delimitar por meio de retroanálise as condições específicas de rompimento por liquefação de rejeitos da Barragem do Fundão em Mariana – MG, e da Barragem B1 em Brumadinho – MG, com a utilização de *softwares* e técnicas de modelagem da ruptura, verificando sua aplicabilidade e comparação com dados reais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos de realização deste trabalho são:

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre os aspectos técnicos das rupturas em Mariana (2015) e Brumadinho (2019);
2. Formular hidrogramas de rupturas de ambas as barragens empregando o *software* Hec-HMS®;
3. Compor a análise unidimensional da mancha de inundação criada a partir do *software* Hec-RAS® para ambas as barragens, e observar a precisão do Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado para a simulação; e
4. Comparar os resultados obtidos na simulação com a situação real das rupturas.

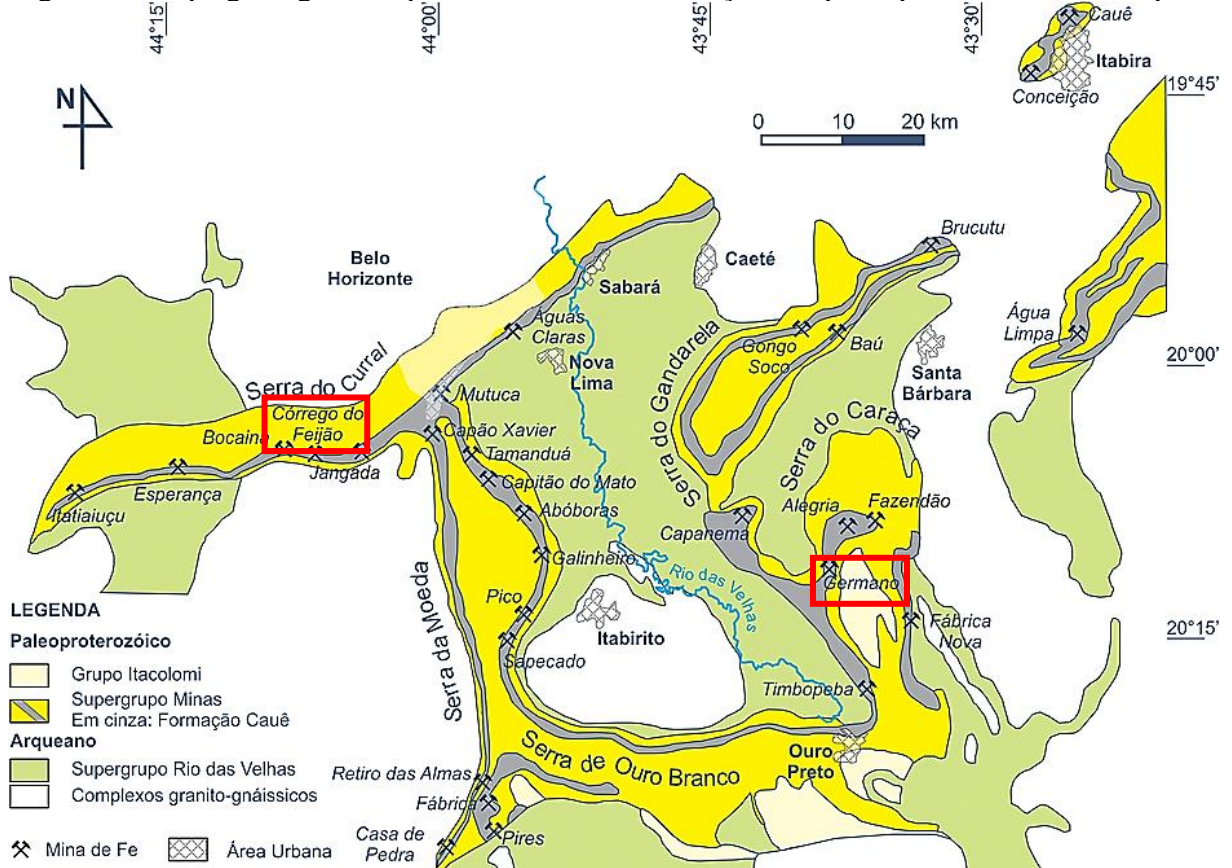
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Mineração em Minas Gerais

A história de Minas Gerais é fortemente ligada a mineração começando no ciclo do ouro, e mais tarde, na descoberta da sua riqueza em minério de ferro. A extração deste minério e Minas Gerais, é relacionada a importância do Quadrilátero Ferrífero – QF, região dada pelas cidades detentoras das jazidas. Localizado na região centro-sul do estado, O QF recebe destaque pelos recursos naturais existentes, mas que estão sob forte pressão pela exploração mineral e pela ocupação humana (OLIVEIRA et al., 2017).

Na Figura 1, é possível observar as muitas atividades mineradoras existentes no território pertencentes. O QF também foi detentor das mais recentes catástrofes ligadas ao rompimento de barragens no país nos últimos 10 anos. Próximo à delimitação da Serra do Curral, está a Mina de Córrego do Feijão em Brumadinho, que teve a Barragem B1 rompida em 25 de janeiro de 2019. Nas proximidades da Serra do Caraça, há o Complexo de Germano, cenário do rompimento da Barragem do Fundão em 05 de novembro de 2015 (FIGURA 1).

Figura 1 - Mapa geológico simplificado, com a localização das principais minas e municípios.



Fonte: Adaptado de Lobato e Costa (2018).

Com base Figura 1 e na grande incidência de extração de minério de ferro, apresenta-se no Quadro 1 os principais grupos de minério de ferro explorados no QF.

Quadro 1 - Minério de ferro extraído no Quadrilátero Ferrífero.

TIPO	CARACTERÍSTICAS
Minério Itabirítico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alternância entre bandas constituídas de óxidos de ferro e bandas de sílica, de espessuras que variam de milimétricas a centimétricas, e teores de ferro variando entre 20% e 55% de Fe total.</li> <li>• O minério itabirítico compacto contém elevados teores de Fe.</li> </ul>
Minério Hematítico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os corpos de minério hematítico são mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita, portanto, ricos em ferro (teores superiores a 64%), encontrados em proporções variáveis em lentes imersas nas camadas de itabirito.</li> </ul>

(Continua)

Quadro 1 - Minério de ferro extraído no Quadrilátero Ferrífero. (Continuação)

Canga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É um minério secundário, constituído de brecha de hematita cimentada por limonita, originado por processo de lixiviação e intemperismo passado pelos corpos de minério.</li> <li>• Apesar de seu teor de ferro mais baixo e teor de fósforo elevado, tem sido utilizado pelas usinas a carvão vegetal em razão de sua porosidade, que torna sua redução mais fácil.</li> </ul>
Minério de Rolamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É um minério fragmentário, acumulado nos taludes das elevações das formações ferríferas, composto por cascalhos de itabirito enriquecido em ferro pela perda parcial de silício e hidratado.</li> <li>• Esse tipo de minério é de reduzida importância econômica.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2014).

Ainda que sejam altos os retornos financeiros pelos quais a atividade mineradora recompensa o estado, há a geração de impactos ao meio ambiente seja na fase de pesquisa, ou na de produção, bem como no descarte de rejeitos e estéreis advindos da exploração em pilhas ou a solução economicamente mais viável, as barragens.

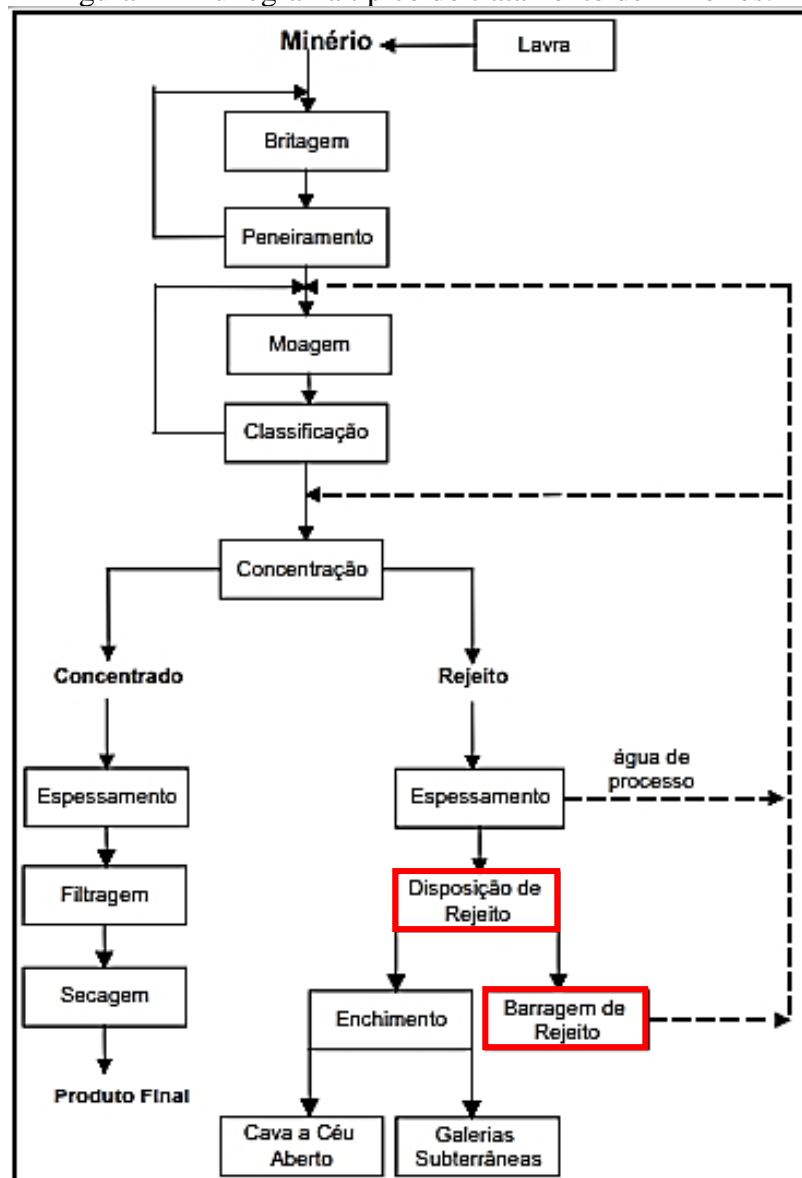
## 2.2 Beneficiamento de Minério de Ferro

A definição de minério segundo Luz e Lins (2010), é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, que podem ser aproveitados economicamente. O minério enquanto parte valiosa retirada, é tornado um bem útil para indústria, e a parte não aproveitada é chamada de estéril.

O processo de separação e seleção envolve as propriedades do material de interesse como a massa específica, magnetismo, condutividade elétrica, granulometria, entre outros, por algumas etapas de separação do material de interesse. Nos últimos anos, em função do aumento da demanda por insumos minerais, houve um grande crescimento das atividades mineradoras, havendo, inclusive, viabilidade à lavra e ao beneficiamento de minérios com teores sucessivamente mais baixos (IBRAM, 2016). O material coadjuvante dos processos como os estéreis e os rejeitos, devem ser dispostos adequadamente.

A Figura 2 ao mostrar as etapas de beneficiamento de minério, e evidencia que não há como explorar tal produto revolvendo solo sem alterar o equilíbrio do meio (PEREIRA; LOURES, 2018), onde o material não aproveitável necessita de disposição final

Figura 2 - Fluxograma típico do tratamento de minérios.



Fonte: Adaptado de Luz e Lins (2010).

Luz e Lins (2010), relatam que o minério quando retirado em forma bruta, é denominado ROM, de “*run of mine*”, e passa por diversas etapas para retirada da parte comercial:

1. Cominuição (britagem e moagem);
2. Peneiramento (separação por tamanhos);
3. Classificação (ciclonação, classificação em espiral);
4. Concentração (gravítica, magnética, eletrostática, flotação, etc);
5. Desaguamento (espessamento e filtragem);
6. Secagem (secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado);
7. Disposição de rejeito.

Os estéreis obtidos no processo são gerados pelas atividades de extração ou lavra, como os minerais escavados e retirados para atingir os veios do minério (BOSCOV, 2008). Não apresentam minério ou seu teor de minerais ou elementos úteis fica abaixo do teor de corte, não podendo ser aproveitada como minério bruto (CPRM, 2021a), sendo geralmente disposto em pilhas. Os rejeitos, por sua vez, são resultantes do beneficiamento a que são submetidos os minérios, para regularizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade (BOSCOV, 2008). São produtos finais não econômicos que são, geralmente, empilhados ou lançados em bacias de acumulação (CPRM, 2021b).

Tanto os rejeitos quanto os estéreis têm tido uma geração crescente nos processos da indústria de mineração. Com isto, a disposição final e o gerenciamento dos mesmos constituíram tema cada vez mais importante nessa indústria (IBRAM, 2016). Como opção mais favorável economicamente para o fechamento do ciclo de beneficiamento, historicamente tem-se feito a disposição dos rejeitos em barragens e dos estéreis em pilhas, porém a quantidade de métodos de disposição de rejeitos alternativos aos métodos de barragens está crescendo cada vez mais (STELA; DUARTE; PEREIRA, 2020), diante dos últimos incidentes envolvendo estas estruturas. Como fator atrelado à insegurança, as barragens de contenção de rejeito tomam como base este material construtivo, que pode não ter um controle técnico adequado devido às suas características próprias destoantes (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016). Dependendo do método construtivo adotado, o risco de instabilidade e de propensos problemas estruturais pode ser considerável (THOMÉ; PASSINI, 2018).

### **2.3 Barragens de Disposição de Rejeito**

Uma barragem, segundo a Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010), é qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

A maior parte da disposição de rejeitos da mineração mundial se faz por barragens de rejeitos, cuja função principal é a contenção dos mesmos, tendo por objetivo secundário a reservação de água para o reuso na mina e/ou no beneficiamento (IBRAM, 2016). Há uma pressão crescente na mineração para que os rejeitos de beneficiamento, ao invés de danificarem os terrenos, sejam usados, por exemplo, para preenchimentos de minas (*back-fill*), visando à restauração das áreas mineradas, ou que sejam cuidadosamente dispostos (LUZ; LINS, 2010).

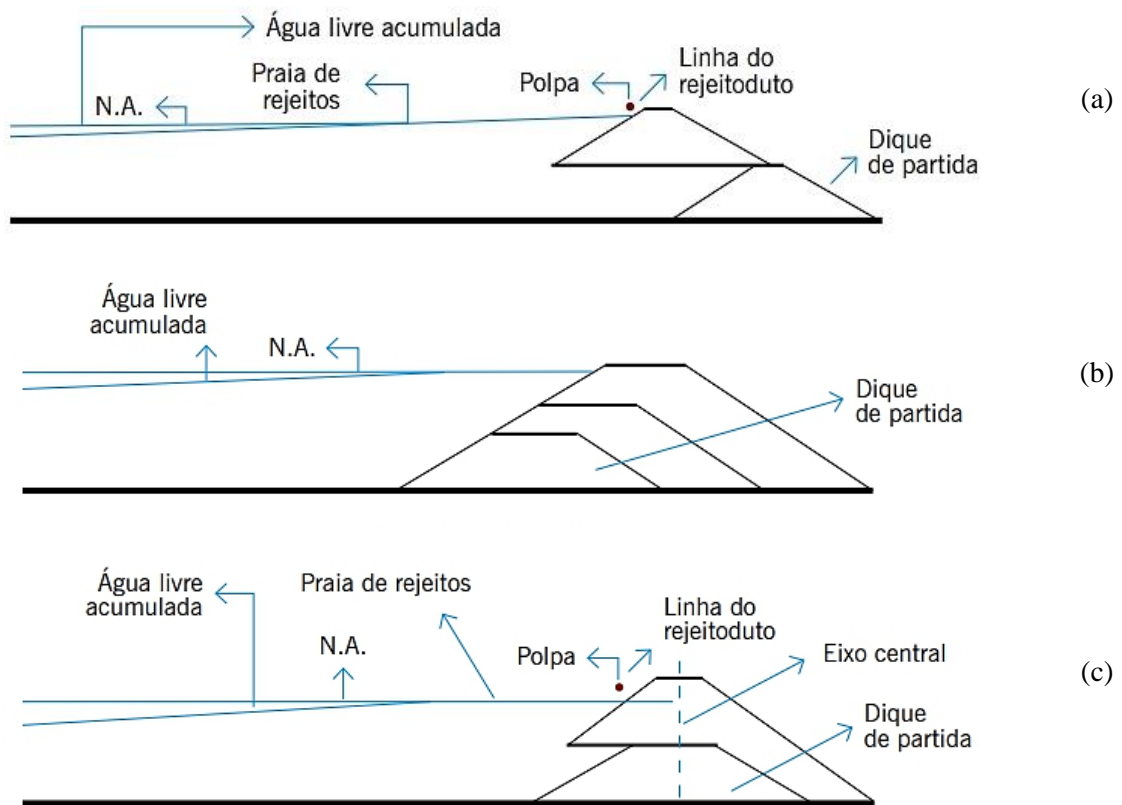


Os impactos ambientais e os riscos associados às barragens de rejeitos e depósitos de estéril estão entre os mais significativos para a indústria da mineração. Não são incomuns os acidentes com ruptura de barragens de rejeito, algumas das vezes causados por problemas de gestão de segurança (IBRAM, 2016), e falta de técnicas apropriadas de seu monitoramento.

### 2.3.1 Tipos Construtivos de Barragens de Rejeito

As barragens construídas com rejeitos podem ser classificadas quanto aos três métodos mais comuns: montante, jusante e linha de centro (FIGURA 3), que nada mais são que nomenclaturas associadas a forma com que se desloca o eixo da barragem nas obras de alteamento.

Figura 3 - Alteamentos (a) montante, (b) jusante e (c) linha de centro.

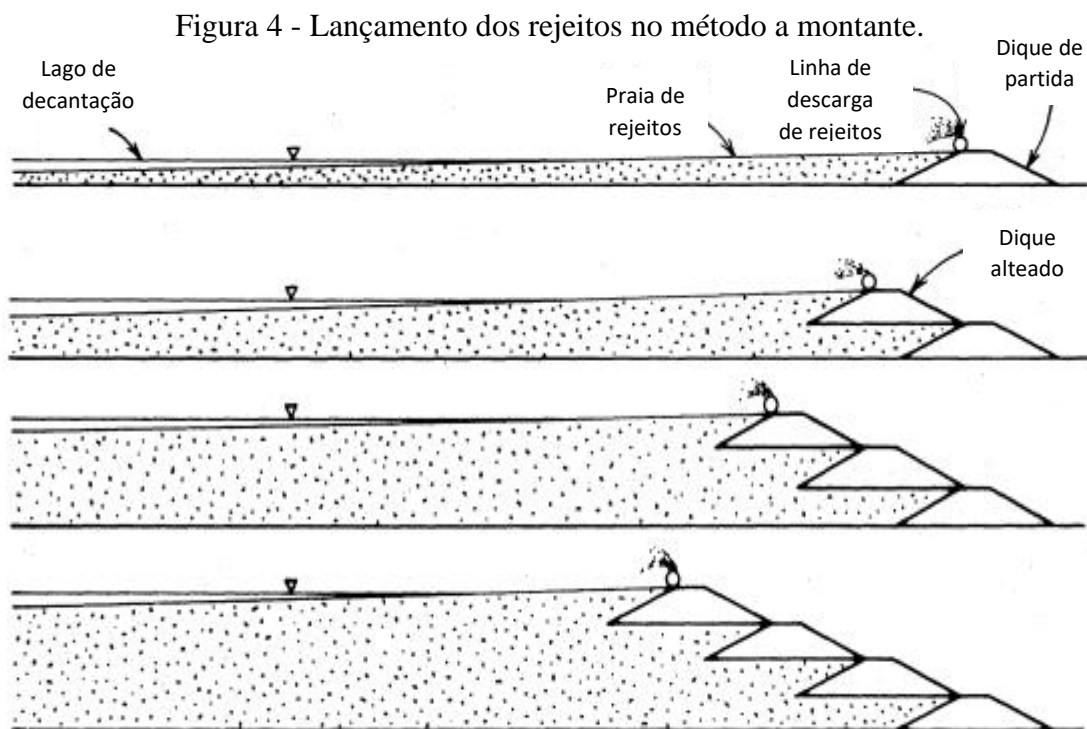


Fonte: Espósito (2000).

O método de montante é o mais antigo, simples e econômico método de construção de barragens (ARAÚJO, 2006). Consiste na construção de diques sobre as praias formadas pela decantação do próprio rejeito (THOMÉ; PASSINI, 2018) sempre a montante sobre o rejeito já consolidado (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016). Esse método é caracterizado pelo

menor custo de construção, maior velocidade de alteamento e pouca utilização de equipamentos de terraplanagem (THOMÉ; PASSINI, 2018).

O rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique (FIGURA 4), formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento (ARAÚJO, 2006). Soares (2010), relata que durante o lançamento dos rejeitos ocorre a segregação granulométrica, ficando a fração mais grossa depositada próxima ao maciço, e as frações mais finas (lamas) fluem em direção ao lago de decantação ou são lançadas no mesmo (LOZANO, 2006).



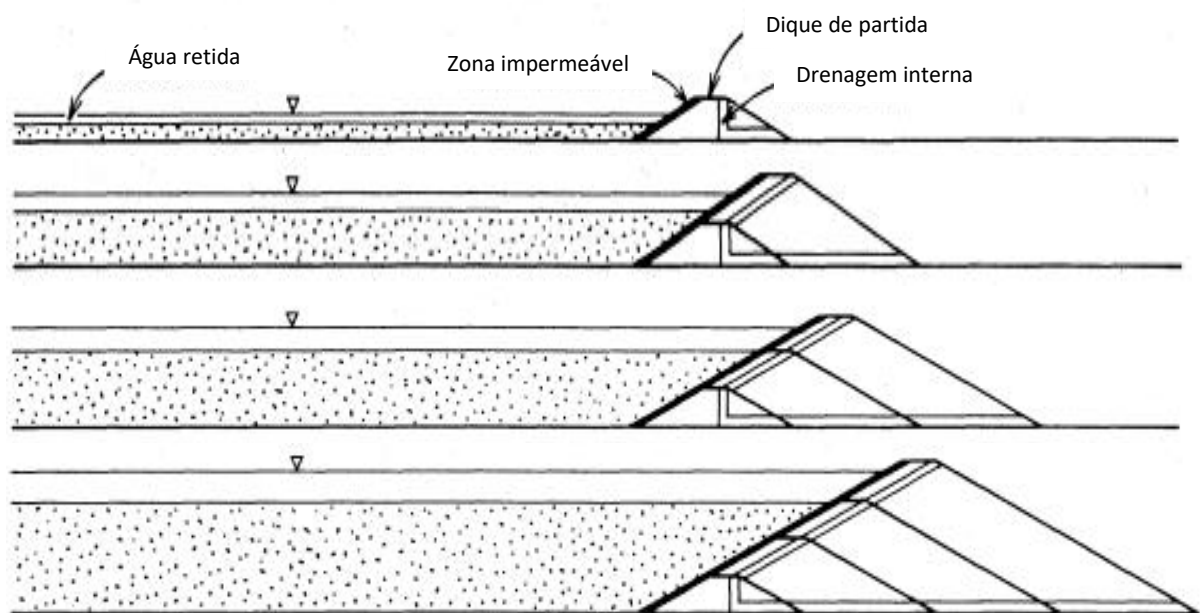
Fonte: Adaptado de Vick (1990).

Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida (ARAÚJO, 2006). Este método é abordado na literatura técnica como de grande risco e as suas desvantagens se devem a uma menor segurança pela capacidade de liquefação da massa de rejeitos saturada e em virtude da possibilidade de proximidade da linha freática ao talude de jusante (THOMÉ; PASSINI, 2018). Essa saturação próxima ao talude leva ao enfraquecimento da estrutura, favorecendo a erosão da mesma. Sua escolha deve ser pautada por um maior nível de detalhamento na engenharia dos rejeitos, sejam eles utilizados como fundação ou como material de construção, bem como nos elementos de drenagem interna e análise para solicitações de carregamento não drenado, para a NBR 13.028 (ABNT, 2017).

No caso do método da linha de jusante, há o deslocamento do eixo de construção na direção oposta ao do lago de decantação (THOMÉ; PASSINI, 2018) (FIGURA 5). Neste método se faz necessária a construção de um dique inicial, impermeável, empregando-se normalmente material argiloso compactado. Este dique inicial deve ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante), além de ter seu talude de montante impermeabilizado com argila compactada ou mantas plásticas específicas para impermeabilização (SOARES, 2010).

Depois de realizada esta etapa, os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do dique de partida. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida (ARAÚJO, 2006). Neste método somente os rejeitos grossos são utilizados no alteamento, e a barragem pode ser projetada para grandes alturas, incorporando sempre, neste alteamento, o sistema de impermeabilização e drenagem. Os rejeitos são hidroclonados, e o *underflow* é lançado no talude de jusante sobre compactação e controle construtivo (SOARES, 2010).

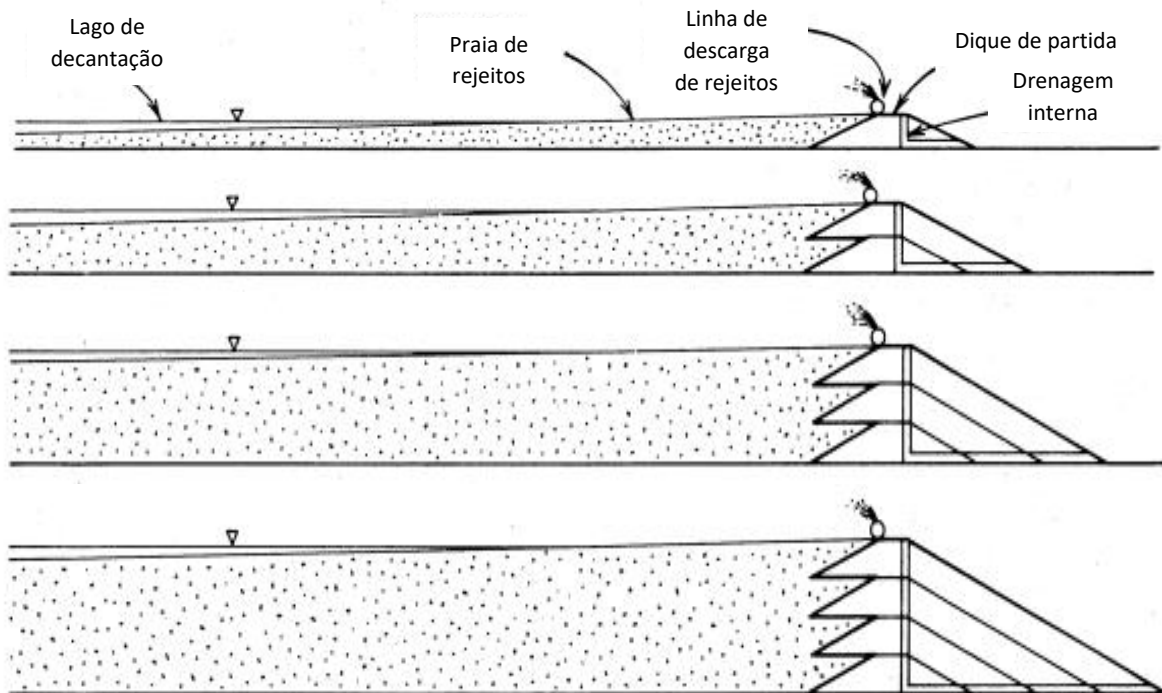
Figura 5 - Lançamento de rejeitos no método a jusante.



Fonte: Adaptado de Vick (1990).

Por fim, o método da linha de centro (FIGURA 6) utiliza uma técnica intermediária (JÚNIOR; MOREIRA; HEINECK, 2018), que concatena a segurança do método para jusante com o custo e velocidade do alteamento para montante (THOMÉ; PASSINI, 2018).

Figura 6 - Lançamento de rejeitos no método de linha de centro.



Fonte: Adaptado de Vick (1990).

Consiste de construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, acompanhando um eixo vertical, sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento a jusante (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016).

O comportamento estrutural das barragens construídas por este método aproxima-se mais ao método de jusante (SOARES, 2010). Nele, as construções subsequentes são executadas em parte sobre a praia formada pela deposição de rejeitos, em parte sobre o talude de jusante do alteamento anterior. Mantém-se, dessa forma, o alinhamento do eixo em relação ao dique inicial (THOMÉ; PASSINI, 2018), o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes são coincidentes (LOZANO, 2006).

O método da linha de centro caracteriza-se pela facilidade construtiva, com a inconveniência de apresentar uma área a montante passível de escorregamento, de não permitir adequação da superfície de talude a jusante com cobertura vegetal e drenagem superficial, além de necessariamente utilizar hidrociclones (THOMÉ; PASSINI, 2018).

Araújo (2006) concluiu em seu trabalho que uma das vantagens deste método quando comparado ao alteamento de montante é a redução das tensões de tração conforme há alteamento da barragem. Em barragens alteadas pelo método de montante, as tensões de tração se mantêm porque a crista se desloca para montante. O Quadro 2 mostra uma relação entre os preceitos de engenharia utilizados e o Quadro 3 mostra uma relação de vantagens e desvantagens dos três métodos.

Quadro 2 - Relação entre os tipos construtivos de barragens.

<b>ASPECTOS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>LINHA DE CENTRO</b>
Tipo de rejeito	Mais de 40% de areia. Baixa densidade para segregação	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Resistência sísmica	Baixa em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável
Restrições de alteamento	Sugere-se menos de 5 a 10 m/ano	---	Pouca
Requisitos de alteamento	Solo natural ou rejeito arenoso	Rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril
Custo relativo do aterro	Baixo (Vm)	Alto (3Vm)	Médio (2Vm)
*Vm = Volume da barragem pelo método de montante.			

Fonte: Adaptado de Nieble (1976) apud Soares (2010).

Diante dos três métodos IBRAM (2016), resume que os métodos de alteamento a montante e por linha de centro têm vantagens econômicas, pois apresentam redução do custo de implantação e têm os custos de construção e operacional distribuídos no tempo. Entretanto, têm na água dos poros do rejeito e do reservatório o principal elemento instabilizador. E isto se dá pela forma com que o rejeito é disposto nestes métodos.

Quadro 3 - Relações sobre os alteamentos a montante, jusante e linha de centro.

	VANTAGENS	DESvantagens
<b>Montante</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menor custo de construção;</li> <li>2. Maior velocidade de alteamento;</li> <li>3. Menores volumes no alteamento;</li> <li>4. Pouco uso de equipamentos de terraplenagem.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menor coeficiente de segurança, em função da linha freática situada muito próxima ao talude de jusante;</li> <li>2. A superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados;</li> <li>3. Possibilidade de entubamento, com surgimento de água no talude de jusante, e risco de liquefação por efeito de sismos ou vibrações.</li> </ol>
<b>Jusante</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maior segurança por alteamento;</li> <li>2. Menor probabilidade de entubamento e de rupturas pela maior resistência ao cisalhamento;</li> <li>3. Maior resistência a vibrações por sismos e vibrações por explosivos nas frentes de lavra;</li> <li>4. Instalação de sistema de drenagem e à medida que se processa o alteamento.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Custo mais elevado, maior volume de material a ser movimentado;</li> <li>2. Menor velocidade de alteamento da barragem;</li> <li>3. Não possibilita a proteção com cobertura vegetal e drenagem superficial durante a fase construtiva, pela superposição dos rejeitos;</li> <li>4. Requer o emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento de pé para conter o avanço do <i>underflow</i>.</li> </ol>
<b>Linha de Centro</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Facilidade construtiva;</li> <li>2. O material para o alteamento pode vir de áreas de empréstimo, estéril ou do <i>underflow</i>;</li> <li>3. Permite o controle da linha freática no talude de jusante.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. A área a montante é passível de escorregamentos;</li> <li>2. Há necessidade do uso de hidrociclones;</li> <li>3. Este método, além do dique inicial, requer um enrocamento de pé para conter o avanço do <i>underflow</i>;</li> <li>4. Não permite tratamentos da superfície do talude de jusante.</li> </ol>

Fonte: Adaptado de Soares (2010).

### 2.3.2 Lançamento de Rejeitos em Aterros Hidráulicos

O lançamento de rejeitos de forma hidráulica é o método mais comum para disposição dos rejeitos da indústria mineral e o seu lançamento se dá em lagos de decantação (aterros hidráulicos) represados por barragens (THOMÉ; PASSINI, 2018). Neste caso, as características físicas e propriedades geotécnicas e de sedimentação dos rejeitos, como granulometria, resistência ao cisalhamento e permeabilidade (ABNT, 2017), definem o processo de deposição, a velocidade do fluxo de rejeitos e a concentração da lama, que tendem a afetar o comportamento dos depósitos de rejeitos (ARAUJO, 2006).

O lançamento dos rejeitos a montante da superfície da água do lago de decantação, forma praias distribuídas ao longo do perímetro da barragem (SOARES, 2010). Normalmente, o lançamento é realizado com a utilização de canhões (*spigots*) (FIGURA 7), ou hidrociclones. No caso do uso de canhões, à medida que a polpa é despejada para a montante do dique, as partículas presentes no rejeito tendem a assentar no fundo da represa (THOMÉ; PASSINI, 2018). Na prática, o processo construtivo se dá por meio de tubulações que transportam o material em forma de polpa até a barragem. O transporte pode ser feito por bombeamento ou por gravidade (RUSSO, 2007).

Figura 7 - Distribuição de *spigots*, em (a) em único ponto e em (b) múltiplos pontos.



(a)

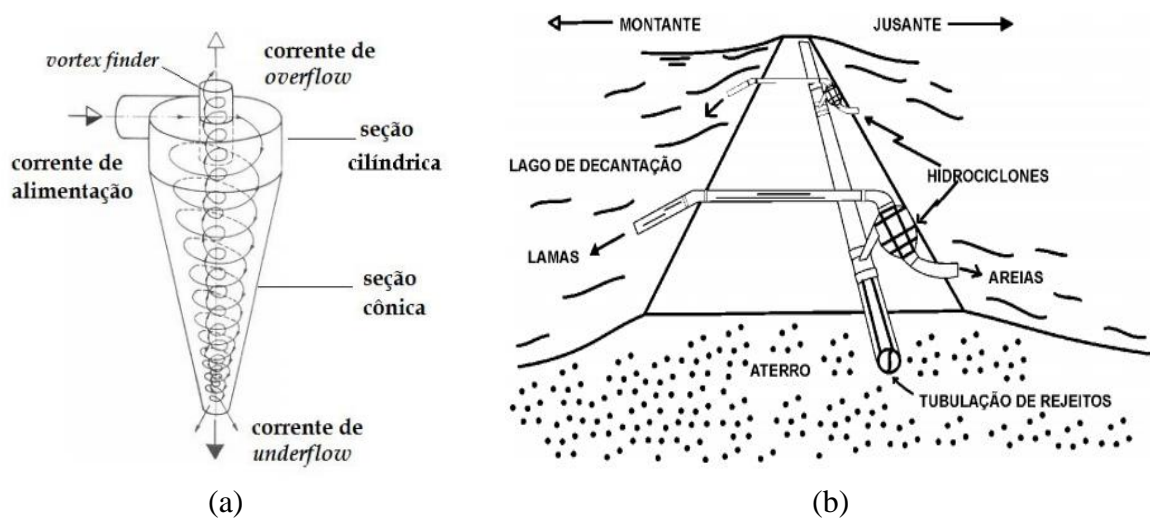
(b)

Fonte: Tailings Info, 2021.

No lançamento com *spigots*, acontece uma grande variabilidade em virtude da concentração do rejeito lançado e a ocasião da sua disposição. Esse tipo de seleção do material é função do processo de segregação ocorrido na praia e conduz à formação de zonas com propriedades geotécnicas distintas, principalmente no que se refere ao valor da densidade e granulometria do depósito formado (SANTOS; RIBEIRO, 2007).

Em razão de uma diferença na velocidade de decantação dos sólidos em suspensão, aqueles de maior granulometria tendem a se acumular nas proximidades do ponto de descarga, formando praias, enquanto os finos são carreados pelo fluxo d'água (THOMÉ; PASSINI, 2018). Ao contrário da utilização de *spigots*, nos hidrociclones (FIGURA 8a), a classificação granulométrica é feita antes do lançamento no reservatório.

Figura 8 - Composição de um hidrociclone (a), atuação dos hidrociclones (b).



Fonte: Svarovsky, 1984 (a); Soares, 2010 (b).

As partículas mais grossas e mais densas são arremessadas às paredes e descarregadas na abertura inferior, o *apex*, constituindo o *underflow* (UF). Já as partículas mais finas, menos densas e grande parte da fase líquida são dirigidas para o centro do hidrociclone e saem por um cilindro na parte superior do aparelho, denominado *vortex finder*, constituindo o *overflow* (OF) (SOUZA JÚNIOR; MOREIRA; HEINECK; 2018). Com esse material produzem-se as praias de rejeitos. Os materiais mais grossos são utilizados na construção do corpo (maciço) da barragem, destinando a fração mais fina ao lago de decantação resultante do barramento (FIGURA 8b). Possibilita assim, a seleção e adequação dos materiais construtivos (SOARES, 2010), é um método comumente utilizado nos alteamentos a jusante e linha de centro.

Já o método de uso de canhões, é particularmente utilizado nos alteamentos a montante, uma vez que administra todo o material para dentro do reservatório sob o qual será feito o alteamento, como visto anteriormente. É um processo construtivo econômico, sendo capaz de transportar e depositar grandes volumes de rejeito diariamente (RUSSO, 2007). A aplicação do método no alteamento a montante é um fator preponderante em problemas da qualidade e segurança do maciço construído. Isto se dá pela segregação granulométrica que segundo Santos



e Ribeiro (2007), tende a provocar uma seleção das partículas em função do tamanho, forma e da densidade das partículas, gerando uma variabilidade estrutural e alterando, significativamente, as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade.

### 2.3.3 Outros Métodos de Disposição de Rejeitos

Algumas técnicas de disposição de rejeitos têm sido adotadas como forma de oposição ao uso de barragens, diante dos problemas encontrados nestas estruturas. As opções tentam substituir a necessidade de um barramento de contenção de água e sedimentos, para um método que reduza a saturação da polpa de rejeitos com uso de drenagem e disposição do material seco. Tem-se vantagens como a redução do custo a longo prazo, o reaproveitamento de água e aumento da segurança pela facilidade de fechamento da estrutura, e menor risco de rompimento e possível contaminação do ambiente. O Quadro 4 mostra algumas destas alternativas.

Quadro 4 - Outros métodos de disposição de rejeitos.

MÉTODO	CONDIÇÕES
Empilhamento drenado	Em detrimento da estrutura impermeável de barramento, adota-se uma estrutura drenante; com saída de água livre até o sistema de drenagem: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maciço não saturado, mais estável e denso, de maior vida útil;</li> <li>2. Menor potencial de dano em uma eventual ruptura; maior facilidade para o fechamento e recuperação ambiental;</li> <li>3. Aplicação segura do método de montante, com baixo risco de liquefação e de ruptura.</li> </ol>
Disposição de finos com secagem	Conhecido como “ <i>Dry Stacking</i> ”, muito utilizado nos processos de mineração de alumina; <ol style="list-style-type: none"> <li>1. O rejeito fino é adensado de forma que o teor de sólidos seja aumentado, e é levado para um reservatório onde é exposto à evaporação.</li> </ol>

Fonte: Adaptado de IBRAM (2016).

### 2.4 Formas de Ruptura de Barragens

É fato que as barragens são de grande importância para o desenvolvimento de qualquer sociedade, contudo, essas estruturas podem aumentar a exposição da sociedade a níveis de riscos considerados relevantes (NEVES, 2018). A segurança da barragem é obviamente o princípio preponderante. Dela dependem vidas humanas, bens comunitários e individuais e deve ser garantida (MASSAD, 2010). Portanto, devem ser tomados alguns cuidados, tais como

a (1) segurança hidráulica contra o transbordamento; (2) mecanismos de drenagem contra o *piping*; (3) adoção de *rip-rap* contra o efeito das ondas em dias de ventos fortes no talude de montante; e (4) proteção do talude de jusante contra o efeito erosivo das águas das chuvas.

A Resolução nº 144 (CNRH, 2012), traz para os casos de falha as definições de incidentes e acidentes envolvendo barragens:

Acidente – comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou estrutura anexa; Incidente – qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que, se não for controlada, pode causar um acidente (CNRH, 2012).

No Brasil, pode-se relatar como incidentes envolvendo barragens de mineração o caso da falha no vertedouro da Barragem Casa de Pedra da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN em Congonhas/MG no ano 2014 deixando 40 famílias desalojadas, e o fraturamento hidráulico da Barragem B1 com extravasamento de água e vertimento de sólidos com erosão do talude em julho de 2018. Os acidentes foram amplamente divulgados como o rompimento por *piping* na Barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases em Mirai/MG no ano de 2007, e o rompimento por liquefação da Barragem da Herculano Mineração em 2014 na cidade de Itabirito/MG.

Fenômenos de ruptura são vistos quanto a possibilidade de perda de vidas e propriedades, dependendo principalmente do tempo necessário para avisar os ocupantes a jusante, e pela simulação numérica precisa do fluxo de ruptura da barragem, que é complexa e envolve matemática avançada e modelagem (SEYEDASHRAF; MEHRABI; AKHTARI, 2018). O rompimento pode facilmente, num espaço de tempo muito curto, gerar uma vazão que excede o valor de pico da cheia decamilenar (FERREIRA; ANDRZEJEWSKI, 2015), por resultar de uma combinação de diferentes fatores, por exemplo, ocorrência de falhas devido a fatores meteorológicos (chuvas intensas, furacões, acumulação de gelo etc.), associação com *overtopping*, infiltração, falha de fundação ou má gestão das estruturas (SOUZA JUNIOR; MOREIRA; HEINECK, 2018).

#### **2.4.1 Galgamento (*Overtopping*)**

Uma falha de galgamento pode ocorrer quando um fluxo instável, como uma onda, percorre a crista de uma barragem, causando o transbordamento gradual de água sobre a crista da barragem, devido à capacidade inadequada do vertedouro (MORRIS; WEST; HASSAN, 2018). Os sistemas extravasores, de acordo com a NBR 13.028 (ABNT, 2017), devem ter dimensões definidas a partir do estudo de vazões máximas (vazão de cheia para determinado

período de retorno - TR) a ser utilizada no dimensionamento hidrológico-hidráulico destes, garantindo a segurança dos sistemas decorrente de eventos extremos de cheia.

No caso de falha no dimensionamento, o transbordamento dado faz com que a água verta à jusante da barragem causando erosão em sua face. Com o aumento da erosão da barragem a jusante, o lado a jusante do núcleo é gradualmente exposto e torna-se oco (ZHONG; CHEN; DENG, 2018), o que leva ao colapso. De acordo com Morris, West, Hassan (2018), dois tipos importantes de erosão de aterro podem ocorrer durante uma falha de galgamento/transbordamento, sendo a erosão por corte superficial, onde a erosão superficial normalmente ocorre em barragens formadas de material não coeso (cascalho e areia), conforme a Figura 9, e a erosão por corte frontal, que usualmente ocorre em materiais coesivos (argila e silte argiloso), conforme a Figura 10.

Figura 9 - Galgamento com erosão por fenda superficial em material não coeso.



Fonte: Morris (2011).

Para atendimento da segurança contra o transbordamento, são necessários estudos hidrológicos que envolvam as características físicas da bacia hidrográfica em estudo, elementos do ciclo hidrológico, como avaliação das precipitações, e a determinação da vazão de projeto (OLIVEIRA; NUNES; MENDES, 2019), e adequada consideração do tempo de retorno.

Figura 10 - Galgamento com erosão por fenda frontal em material coeso.



Fonte: Hanson, Cook e Hunt (2005).

Os casos de galgamento podem ser neutralizados por uso de vertedores projetados de forma conservadora, com margens generosas de folga/borda livre, evitando áreas onde deslizamento de terras possam afetar o reservatório (FAO, 2011).

#### 2.4.2 Erosão Interna (*Piping*)

O *piping* ou erosão regressiva tubular, pode ocorrer no talude da barragem ou nas suas fundações, e consiste segundo Massad (2010), no carreamento de partículas de solo pela água em fluxo, com o passar do tempo, forma-se um tubo de erosão, que pode evoluir para cavidades relativamente grandes no corpo das barragens, levando-as ao colapso.

Pode ser causado “por muitos fatores, incluindo defeitos de fundação, métodos de construção inadequados, materiais porosos da barragem e falha da cobertura e das camadas de proteção” (MORRIS, WEST, HASSAN, 2018). A Figura 11 mostra o processo de erosão interna de uma barragem experimental, que pode ser dividido em duas etapas.

Em uma primeira etapa, é formada a erosão tubular do aterro com ação progressiva em função da abertura criada pelo fluxo, aumentando o tamanho da brecha. A segunda etapa é dada quando a brecha chega ao talude de jusante, e induz a estrutura ao colapso pela instabilidade.

De acordo com Massad (2010), para que o *piping* seja evitado, devem ser adotadas medidas para minimizar as fugas de água, a saber: (1) Conhecer o tipo de solo e as condições de compactação do mesmo; (2) Adotar a presença de enrocamento à jusante (*rip-rap*); (3)

Adequação da inclinação do talude de jusante, que influencia a velocidade do fluxo; (4) Verificação da altura da lâmina d'água; além da implantação do filtro vertical.

Figura 11 - Falha por erosão interna.



Fonte: Hanson et al. (2010).

Evita-se esta situação seguindo procedimentos de projeto e construção corretos, enchimento de rachaduras à medida que vão aparecendo e a introdução de drenagem a jusante através de filtros e drenos como os DHP's (drenos horizontais profundos), se a percolação se tornar excessiva (FAO, 2011).

### 2.4.3 Liquefação de Rejeitos

A liquefação é um processo de “*strain-softening*” (perda de resistência com a deformação) apresentado por solos sem coesão, contráteis e saturados, durante o cisalhamento não drenado (FREIRE NETO, 2009). Numa concepção geral, há perda elevada da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões, sob carregamentos não drenados



(FERREIRA, 2018). A ação do acréscimo de pressão em uma condição limite gera a perda de resistência do maciço, que tende a se comportar como um líquido.

Esta situação ocorre sobretudo em barragens que usam o próprio rejeito como material de construção, pois os materiais usados no alteamento das barragens de rejeitos sempre contêm porcentagem mais elevada de água (SOARES, 2010). O lançamento dos rejeitos nas barragens alteadas a montante, usualmente realizada por meio da técnica de aterro hidráulico, implica acréscimos contínuos de rejeitos saturados no âmbito da estrutura, que causa uma possível liquefação destes materiais sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas (SILVA, 2010).

A liquefação dinâmica se refere à indução do fenômeno pela atividade sísmica do local, detonações, passagem de equipamentos pesados, compressores, correias transportadoras e outras, que promovem a perda de resistência destes materiais (MIRANDA, 2018). Já na liquefação estática, trata-se de um fenômeno iniciado por carregamentos estáticos como: sobrecarga, aumento repentino da superfície freática, elevada precipitação pluviométrica, dentre outros (PENNA et al., 2010). Os princípios gerais do fenômeno da liquefação estão intimamente associados às premissas do comportamento de solos granulares submetidos a esforços cisalhantes (SILVA, 2010), devido ao seu alto índice de vazios dado pela segregação das partículas.

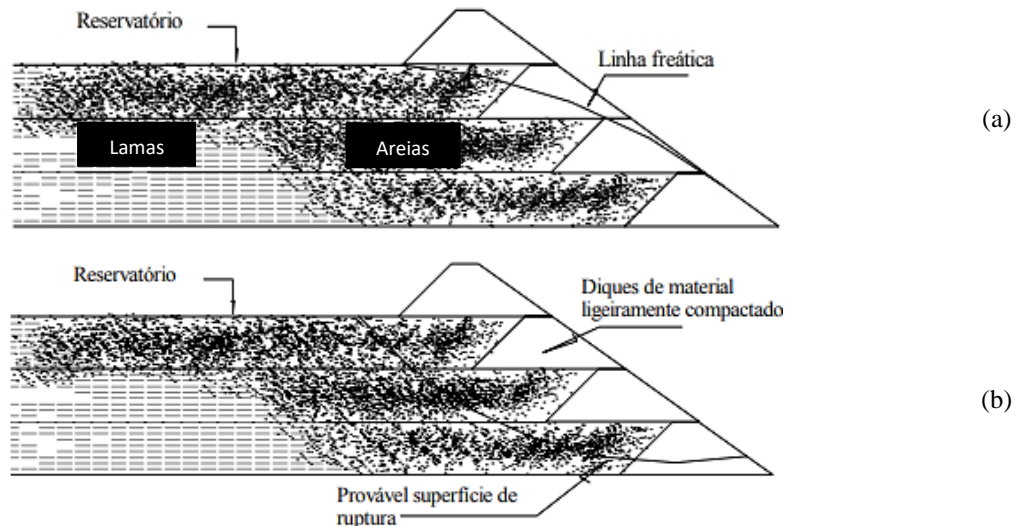
A segregação do material lançado é um processo natural, segundo o qual a separação dos sedimentos contidos no rejeito se dá em função de sua densidade, granulometria e forma das partículas (SOARES, 2010). Dessa forma, no lançamento dos rejeitos a fração de partículas granulares tende a se sedimentar próximo do ponto de lançamento, e por outro lado, as partículas finas tendem a se moverem para outros lugares, conforme a diminuição do seu tamanho (SILVA, 2010). Esta situação é mostrada na Figura 12.

Por isso são indispensáveis informações sobre o “coeficiente de uniformidade” das partículas, o que refletirá se o material depositado terá comportamento relativamente homogêneo ou se terá suas propriedades variando, consideravelmente, em função de sua distância do ponto de lançamento (SILVA, 2010). Em termos reológicos, a permeabilidade e a resistência ao escoamento da polpa diminuem, conforme aumenta a distância do ponto de lançamento (SOARES, 2010). Tais fatos são constatados pela seção vertical do depósito.

O processo de segregação resulta na formação de praias, cujo ângulo de deposição depende da porcentagem de sólidos contidos no rejeito. Quanto menor for a porcentagem de sólidos na polpa, menor seu ângulo de repouso (SOARES, 2010). O método de segregação granulométrica impõe em baixa segurança, pois mantém a linha freática do material granular reservado muito próxima do talude de jusante, isto se dá de acordo com Lozano (2006), pelos

alteamentos dos rejeitos terem fundações constituídas em cima de areias saturadas fofas, o que torna a superfície crítica de deslizamento passa pelos rejeitos sedimentados.

Figura 12 - Constituição do fenômeno de liquefação: (a) proximidade da linha freática do talude de jusante e (b) provável superfície de ruptura criada.



Fonte: Adaptado de Silveira e Reades (1973) apud Lozano (2006).

Para o controle das extensões das praias em barragens alteadas para montante, torna-se necessário a implantação de estruturas hidráulicas (extravadores), de modo a garantir a efetiva captação da água sobrenadante para o sistema de recirculação da planta ou por adução de sistemas de bombeamento (SILVA, 2010). Como o processo de liquefação está intimamente ligado ao alteamento pelo método a montante, Soares (2010), elaborou uma lista de medidas para mitigação dos riscos, a saber:

- (1) Controle do nível da água do reservatório mediante adoção de sistemas de drenagem que considerem a vazão do rejeito e a do regime pluviométrico;
- (2) Descarte sumário do método [a montante] em regiões sujeitas a vibrações;
- (3) Evitar-se a erosão do talude de jusante, provocada pela ação da chuva, com condução das águas por canaletas, além do uso de cobertura vegetal (SOARES, 2010).

Nos depósitos de rejeitos, os potenciais gatilhos para liquefação estática são o aumento das poropressões por uma subida repentina da linha freática; ou carregamento rápido excessivo, como uma obra de alteamento; e movimentos rápidos da fundação passíveis de gerar uma condição não drenada nos rejeitos susceptíveis à liquefação (MIRANDA, 2018). Em condições reais, esta perda súbita e substancial de resistência induz rupturas potencialmente catastróficas, caracterizadas por deslocamentos rápidos e de grande extensão das massas mobilizadas (os chamados 'fluxos de ruptura') (SILVA, 2009). Para a NBR 13.028 (ABNT, 2017), em

barragens com potencial de liquefação, deve-se avaliar a segurança utilizando envoltórias de resistências não drenadas, que apresentem comportamento contrátil, por meio de ensaios de laboratórios e/ou ensaios de campo, quando disponíveis.

## **2.5 Segurança de Barragens**

### **2.5.1 Legislação Federal e Estadual de Barragens de Rejeito**

A Legislação Federal que compreende as questões relacionadas à segurança de barragens, vêm dos Artº. 20 e 225 da Constituição Federal (BRASIL, 1988). O Artº 20 mostra que são bens da União os recursos naturais inclusive os do subsolo, e o Artº 225 mostra que através de Estudo de Impacto Ambiental – EIA, é obrigado ao explorador de recursos minerais, recuperar o meio degradado conforme a solução técnica exigida. A partir desta concepção foram criadas muitas leis que definem a gestão da finalidade, objeto e riscos das barragens.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, trouxe delimitações nunca antes tratadas para o tema. Antes da promulgação da PNSB, não havia a indicação direta de responsabilidades, em âmbito nacional, pela fiscalização da segurança das barragens (NEVES, 2018). A Agência Nacional de Mineração (ANM) (anteriormente, DNPM – Departamento Nacional de Proteção Mineral), ficou com o controle das atividades inerentes às barragens de mineração. Em seu Artigo 3º, a PNSB define entre vários objetivos, a garantia da observância de padrões de segurança de barragens de maneira a fomentar a prevenção e a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências. Define também a entrega do Plano e Relatório de Segurança da Barragem e a inserção de dados no Sistema de Informações sobre Barragens, dentre outros.

A ANM formalizou um sistema para divulgação de dados das barragens de mineração, o SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (ANM, 2021), que dispõe de informações atualizadas quinzenalmente pelos empreendedores. Enquanto a Categoria de Risco (CRI) é dada em função do histórico de engenharia da barragem, o Dano Potencial Associado (DPA) segundo Ferreira e Andrzejewski (2015), pode ser classificado em alto, médio ou baixo é dado em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

A Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019 (MINAS GERAIS, 2019), intitulada Política Estadual de Segurança de Barragens, veio trazer medidas mais rigorosas para as barragens no estado de Minas Gerais após o rompimento em Brumadinho, e o antecedente em Mariana. A



lei veio para atingir barragens com altura maior ou igual a 10 metros, ou reservatório maior ou igual a um milhão de metros cúbicos, ou que tenham reservatório com resíduos perigosos, ou com DPA médio ou alto. Na PNSB, com as alterações dadas pela Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020), estavam incluídas apenas as barragens acima de 15 metros, ou reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos, ou reservatório com resíduos perigosos, ou DPA médio ou alto, ou ainda, CRI alto de acordo com o órgão fiscalizador.

Na Política Estadual de Segurança de Barragens, entre outros, os empreendedores de barragens de resíduos ou rejeitos alteadas a montante são obrigados a descaracterizá-las no território mineiro em três anos a partir da promulgação da lei. Acompanhando também a referida lei, no âmbito federal tanto a Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020) quanto a Resolução nº 13 (ANM, 2019) proibiram cada qual a sua forma, o alteamento a montante no território nacional realizando e a descaracterização das barragens existentes.

A Lei nº 14.066 também definiu em território nacional, novas disposições a respeito do PAE – Plano de Ação de Emergência, que deve ser disponibilizado para a comunidade e autoridades no entorno, visando o pior cenário encontrado para o mapa de inundação feito a partir dos estudos de *dam break*. A referida lei passou a obrigar também, que todos os empreendimentos detentores de barragens de mineração são obrigados a elaborar o Plano de Ação de Emergência Para Barragens de Mineração (PAEBM).

Para regulamentar a Política Nacional de Barragens, diversas outras normatizações foram editadas para auxiliar no controle dos órgãos competentes à nível estadual e federal. As principais modificações feitas estão contidas em síntese na Figura 13.

Figura 13 - Linha do tempo da legislação de segurança de barragens de rejeito no Brasil.



Fonte: A autora (2021).

## **2.5.2 Plano de Segurança de Barragens de Mineração (PSB)**

O Plano de Segurança da Barragem é contemplado pela Portaria nº 70.389 (DNPM, 2017), em seus artigos 8º a 12 (Plano de Segurança) seguido pelos artigos 13º a 15º (Revisões Periódicas), dos artigos 16º a 28º (Inspeções Regulares e Especiais de Segurança) e artigos 29 a 41 (Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração). Dentro do Plano de Segurança, o responsável pela barragem tem que prover o mesmo, contendo cinco volumes: (1) Informações Gerais; (2) Planos e Procedimentos; (3) Registros e Controles; (4) Revisão Periódica de Segurança de Barragem – RPS; (5) Plano de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração – PAEBM.

O PSB deve ser elaborado até o início do primeiro enchimento da barragem, a partir de quando deverá estar disponível no empreendimento, preferencialmente no escritório da equipe de segurança da barragem, ou em local mais próximo à estrutura, para utilização pela Equipe de Segurança de Barragem e para os órgãos fiscalizadores. Deve ser sempre atualizado conforme cada mudança de projeto.

### **2.5.2.1 Revisões Periódicas de Segurança - RPS**

A Revisão Periódica de Segurança da Barragem é parte integrante do PSB, visando conhecer o estado geral de segurança da barragem e suas possíveis alterações, bem como propor medidas de adequações e manutenções. Deve ser executada quando:

1. Houver modificações estruturais (alteamentos, novos rejeitos, etc);
2. A cada 2 anos ou a cada 10 metros alteados, independente do Dano Potencial Associado, sempre o que ocorrer primeiro;
3. Houver processo de reaproveitamento de rejeitos;
4. Em função da periodicidade máxima do DPA, caso não se tenha entrado em nenhuma especificidade dos itens acima: (a) DPA alto a cada 3 (três) anos; (b) DPA médio a cada 5 (cinco) anos; (c) DPA baixo a cada 7 (sete) anos.

Realizada a RPS, deve ser feito o Relatório para compor o Plano de Segurança da Barragem, que também deve conter em finalização a Declaração de Condição de Estabilidade, enviada via Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) à ANM.

### **2.5.2.2 Inspeções Regulares e Especiais de Segurança**

As Inspeções Regulares de Segurança de Barragens (IRSB), são feitas quinzenalmente para preenchimento de “Fichas de Inspeção” e produção de um “Relatório Semestral” para a Declaração de Condição de Estabilidade, além da elaboração do “Extrato de Inspeção Regular”, via SIGBM.

As Inspeções Especiais de Segurança de Barragem (IESB), são atividades de fiscalização de maior frequência e detalhamento, que ocorrem em face da existência de alguma anomalia de pontuação máxima de 10 pontos dentro da Categoria de Risco da barragem, para que sejam acompanhadas as atividades de controle e extinção do problema. Para tanto, são realizadas de forma diária com elaboração de um “Extrato de Inspeção Especial” e um “Relatório Conclusivo” dada a extinção da anomalia.

### **2.5.2.3 Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração (PAEBM)**

O Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração – PAEBM, visa a compilação de dados que auxiliem na tomada de decisão diante de uma situação de emergência. É um documento técnico e de fácil entendimento no qual estão identificadas as situações de emergência da barragem, e as ações a serem executadas nesses casos, e os agentes a serem notificados, para minimizar danos e perdas de vida, deve conter, entre outros (NEVES, 2018):

1. Identificação e contatos dos responsáveis: empreendedor, coordenador do PAE [ou PAEBM] e das entidades constantes do fluxograma de notificações;
2. Descrição geral da barragem e estruturas associadas; detecção, avaliação e classificação das situações de emergência em níveis 1, 2 e/ou 3;
3. Ações esperadas para cada nível de emergência, descrição dos procedimentos preventivos e corretivos; recursos materiais e logísticos disponíveis;
4. Procedimentos de notificação (Fluxograma de Notificação) e Sistema de Alerta;
5. Síntese do estudo de inundação com mapas, indicação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e Zona de Salvamento Secundária (ZSS).

Trata-se, portanto, de um documento para ser usado em questão de urgência, devendo ter capa vermelha e linguagem de fácil entendimento para tomada de decisões. Deve estar na administração da barragem, nas prefeituras e nas defesas civis afetadas (BRASIL, 2010).

O coordenador do PAEBM deve ser profissional, designado pelo empreendedor da barragem, com autonomia e autoridade para mobilização de equipamentos, materiais e mão de obra a serem utilizados nas ações corretivas e/ou emergenciais, devendo estar treinado e capacitado para o desempenho da função (NEVES, 2018).

#### **2.5.2.4 Zonas de Autossalvamento**

A Zona de Autossalvamento (ZAS) é uma região a jusante do barramento, que deve predispor de mecanismos de alerta para situações de emergência, pois considera-se que neste local não há tempo disponível para intervenção das autoridades e do empreendedor, com base na mancha de inundação gerada em estudo de ruptura hipotética (*dam break*). A Portaria nº 70.389 (ANM, 2017), delimita a ZAS pela adoção da maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km. Para Neves (2018), é o local onde o empreendedor deve se incumbir de avisar para que as mortes sejam minimizadas única e exclusivamente por sua atuação.

É considerado Zona de Salvamento Secundária (ZSS), o trecho constante do mapa de inundação não definido como ZAS (BRASIL, 2020), onde define-se que existe tempo suficiente para que após treinamento, as pessoas executem seu próprio salvamento e se dirijam aos pontos de encontro deliberados pelo empreendedor.

#### **2.5.2.5 Declaração de Condição de Estabilidade (DCE)**

É um instrumento obrigatório, entregue em duas campanhas ao longo do ano. A entrega prevista entre 1º e 30 de setembro de cada ano, deve ser elaborada obrigatoriamente por equipe externa contratada. Já a entrega entre 1º e 31 de março pode ser elaborada por equipe de profissionais do quadro de pessoal do empreendedor (NEVES, 2018). Se não houver apresentação da DCE, as atividades são interditas.

### **2.6 Estudo da Ruptura de Barragens de Rejeito**

A ruptura de uma barragem é um evento catastrófico. Em razão disso, é de suma importância a simulação e o conhecimento do desenvolvimento do processo de ruptura, desde a formação da brecha até a propagação da onda de cheia que se formará a jusante (OLIVEIRA; NUNES; MENDES, 2019), especialmente se estiver relacionado à ocorrência de

acontecimentos imprevistos, colocando a vida de pessoas em risco (SEYEDASHRAF; MEHRABI; AKHTARI, 2018).

A maioria das pesquisas existentes de ruptura hipotética a nível internacional concentra-se em análise de estabilidade de barragens por liquefação e resistência sísmica (TIAN *et al.*, 2021), tal qual aconteceu recentemente no Brasil tendo um número de rompimentos de barragens nos últimos anos considerável, principalmente no estado de Minas Gerais onde 6 barragens de rejeitos de mineração romperam nos últimos 35 anos (QUADRO 5).

Quadro 5 - Rompimentos de barragens de rejeito no estado de Minas Gerais.

ANO	BARRAGEM E LOCAL	FALHA	DETALHES
1986	Fernandinho Itabirito/MG	Liquefação	7 mortes.
2001	Macacos Nova Lima/MG	Liquefação	5 mortes, descarregamento de 600 mil m <sup>3</sup> de rejeitos.
2007	Rio Pomba Miraí/MG	Piping	Mais de 4000 desabrigados ou deslocados, 2 milhões de m <sup>3</sup> de rejeitos vertidos.
2014	Herculano Itabirito/MG	Liquefação	3 mortes, atingimento de vários cursos d'água
2015	Fundão Mariana/MG	Liquefação	19 mortos, 600 desabrigados, interrupção do abastecimento de água a várias cidades e poluição do Rio Doce e do mar no estado do Espírito Santo.
2019	B1 Brumadinho/MG	Liquefação	270 vítimas, impactos no patrimônio histórico e cultural, no meio ambiente e economia local.

Fonte: Adaptado de Alves (2015); Almeida (2019); Pacheco et al. (2020).

Os dois últimos acidentes ocorridos no estado de Minas Gerais foram os mais catastróficos em sua história, e serão evidenciados mais adiante.

### 2.6.1 Mecanismos de Controle e Inspeção

A auscultação de uma barragem envolve um conjunto de procedimentos de monitorização baseados em métodos geotécnicos, geodésicos e instrumentação, visando a fiscalização, monitorização e verificação de medidas corretivas das suas condições de segurança (PACHECO et al., 2020), conforme exemplos dados no Quadro 6.

Quadro 6 - Equipamentos de auscultação e instrumentação de barragens.

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E SENSORES
Medidas geotécnicas e estruturais de deformações e deslocamentos locais	Pêndulos, bases alongamétricas, medidores triortogonais, extensômetros, inclinômetros, piezômetros, radar, estação total, entre outros.
Levantamentos geodésicos	Levantamentos de terreno, posicionamento por satélite, fotogrametria e algumas técnicas especiais (interferometria, nivelamento hidrostático e outras).

Fonte: Adaptado de USACE (1995).

As inspeções em barragens de mineração são operações obrigatórias e devem ser realizadas a partir de uma análise preliminar das condições de instrumentação e da verificação de problemas locais na área monitorada, com maior ou menor prazo entre inspeções. A instrumentação pode atingir esses objetivos ao fornecer dados quantitativos para acessar informações úteis, como pressão piezométrica, deformação, estresse total e níveis de água, que fornecem indicativos de boas condições ou ameaças à estabilidade.

### 2.6.2 Estudos de Ruptura Hipotética

Estudos de ruptura hipotética de barragem vêm sendo produzidos intensamente em atendimento à legislação vigente na forma da PNSB, a qual define a necessidade de levantamento, por parte do agente, dos danos potenciais causados em cada situação de emergência (FERREIRA; ANDRZEJEWSKI, 2015).

Ferramentas de previsão rápida que fornecem valores de profundidade e velocidade do fluxo em momentos específicos na região imediatamente a jusante da barragem (SEYEDASHRAF; MEHRABI; AKHTARI, 2018), são muito valiosas para a concepção de modelos de reposta ao risco. A avaliação do rompimento de barragem de rejeitos é fundamental na sua forma prática, para a programação quanto a problemas e questões potenciais de falha (CHEN; MA, 2021).

Dentro desta necessidade Rocha (2015) em seu estudo, definiu os critérios básicos para formulação generalista de um estudo de ruptura hipotética de barragens (estudo de *Dam Break*), conforme Quadro 7, baseado em formas técnicas acessíveis e bem conceituadas na literatura.

Quadro 7 - Etapas do Estudo de Dam Break.

ETAPA	PARTE DO PROJETO
Etapa 1	Previsão dos parâmetros da brecha de ruptura utilizando equações de previsão – geralmente são adotadas as equações propostas por Froehlich (2016), Von Thun e Gillette (1990) e Xu e Zhang (2009).
Etapa 2	Utilização de modelo hidrológico para construção do hidrograma de ruptura por meio de análises paramétricas tendo como base os parâmetros da brecha obtidos – geralmente é adotado o modelo HEC-HMS (USACE, 2020a).
Etapa 3	Propagação do hidrograma de ruptura pelo vale a jusante, utilizando modelos gratuitos – geralmente é adotado o modelo Hec-RAS (USACE, 2020b), com seções topobatimétricas levantadas em campo ou extraídas diretamente de modelos digitais de elevação (MDEs) gratuitos ou de cartas topográficas.
Etapa 4	Definição das parcelas do volume de material presente no reservatório que irão ser propagadas para jusante e que ficarão retidas no reservatório – geralmente adota-se que 100% do material será propagado para jusante.
Etapa 5	Mapeamento da área inundável utilizando <i>softwares</i> de geoprocessamento – comumente é utilizado o aplicativo ArcGis® e o módulo Hec-GeoRAS, a partir do modelo digital de elevação.

Fonte: Adaptado de Rocha (2015).

Dentro dos estudos de ruptura hipotética, ocorre a consolidação dos estudos para simulação de possíveis cenários de ruptura da barragem. É definido um modelo hidrodinâmico para representar o início do movimento da lama e calcular a aceleração da onda (MPMG, 2019).

### 2.6.2.1 Definição da Brecha de Ruptura

A brecha de ruptura, sendo o mecanismo de abertura na ruptura da barragem, que dá passagem aos rejeitos contidos (FIGURA 14), tem suas dimensões usualmente encontradas através de equações empíricas, que segundo Rocha (2015), estimam com base em casos históricos observados, por meio de equações de regressão com duas variáveis.

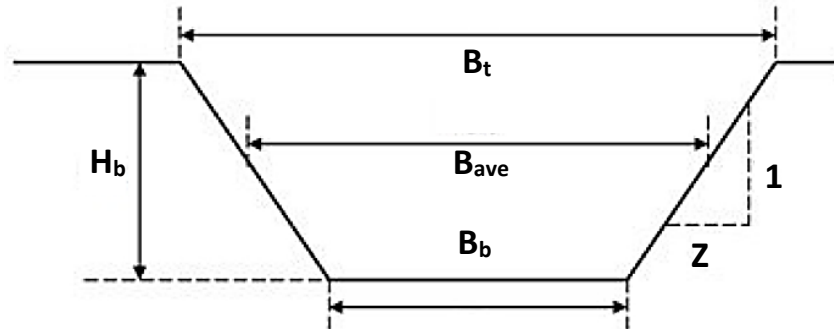
Na década de 1980, diversos autores elaboraram estudos de caso para prever parâmetros de brecha e vazão de pico. A maior parte das equações foi baseada em cerca de 20 a 50 barragens rompidas (FERREIRA; ANDRZEJEWSKI, 2015).

Modelos paramétricos, como Froehlich (2016), Xu e Zhang (2009) e Von Thun e Gillette (1990), permitem ir de encontro a geometria da ruptura, o tempo de formação e o pico de vazão (MORRIS; WEST; HASSAN, 2018). Porém, eles por si só apresentam grande



incerteza de aplicação para a precisão das situações de risco. A sua aplicação, portanto, fica mais restrita ao uso apenas da geometria da brecha, utilizada como base nos *softwares* de modelagem, que aumentam a precisão.

Figura 14 - Geometria característica da brecha de ruptura.



Fonte: A autora (2021).

Sendo:

$H_b$  = Altura da brecha (m);

$B_t$  = Largura do topo (m);

$B_{ave}$  = Largura média (m);

$B_b$  = Largura da base (m);

$Z$  = Declividade usual dos taludes laterais, dada pelo método escolhido.

### 2.6.2.2 Hidrograma da Ruptura

Uma parte crítica desta avaliação da ruptura é a previsão do processo de violação, que determinará o hidrograma de vazão do reservatório. É crucial para o estágio seguinte de roteamento de inundação, que auxilia na avaliação de risco de inundação, planejamento de evacuação e planejamento de uso do solo (MORRIS; WEST; HASSAN, 2018).

Oliveira, Nunes e Mendes (2019), reuniram informações sobre programas ao longo do tempo, que realizam a modelagem hidrológica na ruptura. Os autores relatam que, o *software* HEC-HMS® é bastante eficaz para geração de vazões devido ao rompimento de barragens. O modelo oferece várias opções para simular processos de chuva e/ou escoamento em bacias hidrográficas com calibração associada em conjuntos de dados espaciais e temporais (SILVA; WEERAKOON; HERATH, 2014).

Neste *software* há a inserção de dados pelo usuário, onde são previstos os parâmetros de geometria da brecha que devem ser pré-determinados anteriormente, também considerando a expectativa de tempo para conclusão da ruptura a partir da formação da brecha.

A vantagem de se empregar o HEC-HMS® está na possibilidade de se adotar diferentes combinações de métodos para representar os processos hidrológicos tais como a interceptação, infiltração, escoamento direto e escoamento em canais, verificando quais os métodos representariam melhor a bacia como um todo (OLIVEIRA, NUNES E MENDES, 2019). O produto do *software*, é uma relação de vazões de saída do fluxo após o rompimento, que mostram a vazão máxima (pico), o decaimento de volume dada a ruptura, entre outros.

### 2.6.2.3 Propagação da Onda de Rejeitos

Em uma ruptura hipotética de barragem de contenção de rejeitos, é possível considerar que o comportamento do escoamento do material resultante desta ruptura seja mais semelhante aos fluxos hiperconcentrados (ou fluidos não-Newtonianos), como, por exemplo, fluidos de Bingham, que possuem propriedades reológicas específicas (MACHADO, 2017).

Júnior, Moreira e Heineck (2018) contam que para as modelagens de rupturas de barragens de rejeitos são utilizados modelos hidrodinâmicos a partir das equações de Saint-Venant, Navier-Stokes e outros. Alguns modelos que podem ser citados são DMBRK (1D), HEC-RAS (1D e 2D), MIKE 21 (2D), HYDRO (1D, 2D e 3D), MIKE 3(3D), FLUENT (3D) e demais outros. Os modelos analíticos se baseiam em diversas relações entre propriedades físicas associadas ao escoamento, sedimento, geometrias e materiais da barragem (FERREIRA; ANDRZEJEWSKI, 2015).

Modelos semi-fisicamente baseados, como HEC-RAS®, consideram a geometria da quebra e o tempo de formação, ou taxas de erosão do solo, como valores de entrada para produzir um hidrograma de quebra (MORRIS; WEST; HASSAN, 2018). O método se baseia nas equações de Saint-Venant para a erosão de fluxos que mobilizam materiais naturais (BATES; ANCEY, 2017). A associação do modelo hidrológico HEC-HMS e do hidráulico HEC-RAS para obtenção de resultados de mancha de inundação para fins diversos é comumente abordado na literatura em Kneb et al. (2005); Cabral et al. (2016); Divín e Mikita (2016) e Al-Zahrani, Al-Areeq e Sharif (2016).



## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 16 p.

AL-ZAHRANI, Muhammad; AL-AREEQ, Ahmed; SHARIF, Hatim. Flood Analysis Using HEC-RAS Model: A Case Study for Hafr Al-Batin, Saudi Arabia. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 7, p. 04024, 2016. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20160704024>.

ALVES H. R. **O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: Desastres mistos ou tecnológicos?** Belo Horizonte: Faculdade Dom Helder Câmara, 2015.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 17 maio 2017.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, 08 ago. 2019.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 32, de 11 de maio de 2020**. Altera a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 e dá outras providências. Brasília, DF.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração**. 2021. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico>. Acesso em: 15 jun. 2021.

ARAUJO, Cecília Bhering de. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BATES, B.M.; ANCEY, C. The Dam-Break Problem for Eroding Viscoplastic Fluids. **Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 243, p. 64-78, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.01.009>.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

BRASIL. **Constituição de 1988**: Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: 1988.

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

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, DF.

CABRAL, Samuellson Lopes *et al.* Integração do SIG, HEC/HMS E HEC/RAS no Mapeamento de Área de Inundação Urbana: Aplicação à Bacia do Rio Granjeiro-CE. **Geociências**, São Paulo, p. 90-101, jan. 2016.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração – Uma Revisão. **Holos**, Natal, v. 8, n. 32, p. 77-85, dez. 2016.

CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; et al. **Minério de Ferro**. Brasília: BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2014. 37 p.

CHEN, Congcong; MA, Bo. Risk Evaluation of Tailings Dam-Break Based on the Extension Matter-Element Model. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 253, p. 01056, 2021. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202125301056>.

CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 144 de 10 de julho de 2012.** Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Brasília, DF.

CODEMIG – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS. **Mineração**. 2021. Disponível em: <http://www.codemig.com.br/atuacao/mineracao/>. Acesso em: 27 fev. 2021.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Estéril**. 2021a. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/esteril.htm>. Acesso em: 03 jun. 2021.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Rejeito de Minério**. 2021b. Disponível em: [http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/rejeito\\_minerio.htm](http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/rejeito_minerio.htm). Acesso em: 03 jun. 2021.

DIVÍN, Josef; MIKITA, Tomáš. Effects of Land Use Changes on the Runoff in the Landscape Based on Hydrological Simulation in HEC-HMS and HEC-RAS Using Different Elevation Data. **Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, [S.L.], v. 64, n. 3, p. 759-768, 1 jul. 2016. Mendel University Press. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201664030759>.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Manual Sobre Pequenas Barragens de Terra**: Guia para a Localização, Projeto e Construção. Roma: ONU, 2011. 120 p.

FERREIRA, Daniel Bastos. **Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro**: Estudo de Caso: Sistema Pontal em Itabira/MG. 2018. 130 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

FERREIRA, Ana Luisa Moreira; ANDRZEJEWSKI, Edgar Alberti. Comparação de Métodos de Cálculo da Ruptura de uma Barragem Hipotética. In: Seminário Nacional De Grandes Barragens, 30., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015. p. 1-12.

FREIRE NETO, João Pimenta. **Estudo da Liquefação Estática em Rejeitos e Aplicação de Metodologia de Análise de Estabilidade**. 2009. 154 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FROEHLICH, D.C. Enhanced Predictions for Peak Outflow from Breached Embankment Dam. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 11, p. 04016041-1 - 04016041-15. 2016.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 01fev. 2021.

HANSON, G. J. et al. Internal **Erosion and Impact of Erosion Resistance**. 30th U.S. Society on Dams Annual Meeting and Conference. **Anais**. Sacramento, CA, p. 773-784, 2010.

HANSON, G. J.; COOK, K. R.; HUNT, S. L. Physical Modeling of Overtopping Erosion and Breach Formation of Cohesive Embankment. **Transactions of the ASAE**, [s. l], v. 48, n. 5, p. 1783-1794, jan. 2005.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. Brasília, 2016. 128 p.

JEBER, Adriana; PROFETA, André Luiz. **Meio Ambiente e Mineração**. Belo Horizonte: UFMG, 2018. 69 p.

JÚNIOR, Tennison Freire de Souza; MOREIRA, Eclesielter Batista; HEINECK, Karla Salvagni. Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil. **Holos**, [S.L.], v. 5, p. 2-39, 14 nov. 2018. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2018.7423>.

KNEBL, M.R. et al. Regional Scale Flood Modeling Using NEXRAD Rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A Case Study for the San Antonio River Basin Summer 2002 Storm Event. **Journal of Environmental Management**, v.75, p.325–336, 2005.

LOBATO, Lydia Maria; COSTA, Lydia Maria. **Recursos Minerais no Cenário Geológico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CODEMGE, 2018. 49 p.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeito Usando o Método de Análise Hierárquica**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade Federal de Minas Gerais, São Paulo, 2006.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2010. 20 p.

MACHADO, Nathália Couto. **Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Nathália Couto Machado, 2017.

MASSAD, Faiçal. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MINAS GERAIS. **Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019**. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens. Belo Horizonte, 26 fev. 2019.

MIRANDA, Tadeu Marçal. **Análise do Potencial de Liquefação de um Rejeito de Minério de Ferro por Meio de Ensaios de Laboratório e de Campo: Estudo De Caso: Sistema Pontal Em Itabira/MG**. 2018. 136 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MORRIS, M.W. **Breaching of Earth Embankments and Dams**. 2011. 360 p. Tese (Doutorado). The Open University, England, 2011.

MORRIS, Mark; WEST, Matthew; HASSAN, Mohamed. A Guide to Breach Prediction. **Dams and Reservoirs**, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 150-152, dez. 2018. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/jdare.18.00031>.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Procedimento Investigatório Criminal n.º MPMG-0090.19.000013-4**. Belo Horizonte: MPMG, 2019. 477 p.

NEVES, Luiz Paniago. **Segurança de Barragens: Legislação Federal Brasileira em Segurança de Barragens Comentada**. Brasília: ANM, 2018. 67 p.

OLIVEIRA, Janaína Silva de; et al. Spatial Analysis as a Support for the Environmental Planning of the Quadrilátero Ferrífero Region, Minas Gerais. **Geographia Meridionalis**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 134-156, 5 jul. 2017. Universidade Federal de Pelotas. <http://dx.doi.org/10.15210/gm.v3i1.9925>.

OLIVEIRA, Juliany Fernandes; NUNES, Elizon Dias; MENDES, Thiago Augusto. Uma Análise da Aplicação do Modelo HEC-HMS na Determinação de Vazões de Rompimento de Pequenos Barramentos: O Caso do Reservatório Lúzio de Freitas em Inhumas, GO. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 793, 4 abr. 2019. Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v8e12019793-813>.

PACHECO, Admilson da Penha; et al. Technical and Scientific Aspects of Dams in Brazil: A Theoretical Approach. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 15, n. 5, p. 1, 3 set. 2020. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2552>.

PENNA, Lorena Romã *et al.* Liquefação Estática em Depósitos de Rejeitos de Mineração. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15., 2010, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Gramado: COBRAMSEG, 2010. p. 1-7.

PEREIRA, Ryan Brwner Lima; LOURES, Jacqueline. Environmental Licensing of the Extraction of Iron Ore in the State of Minas Gerais. **Revista TCE/MG**, Belo Horizonte, v. 36, n. 1, p. 89-106, jun. 2018.

PILOTTI, Marco *et al.* Dam-Break Wave Propagation in Alpine Valley with HEC-RAS 2D: Experimental Cancano Test Case. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [S.L.], v. 146, n. 6, p. 05020003, jun. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001779](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001779).

RAMAN, Arun; LIU, Fei. An Investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC-RAS Simulation. **Computational Physics**, Nova York, v. 1, n. 1, p. 1-16, nov. 2019.

ROCHA, Felipe Figueiredo. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RUSSO, Pedro de Moraes. **Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo**. 2007. 331 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SABĂU, Daniel; ŞERBAN, Gheorghe. Arch Dam Failure Preliminary Analysis Using HEC-RAS and HEC-GEO RAS Modeling. Case Study Someşul Rece 1 Reservoir. **Forum Geografic**, [S.L.], n. 1, p. 44-55, 30 jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.5775/fg.2018.058.i>.

SANTOS, Alexandre Gonçalves; RIBEIRO, Luís Fernando Martins. Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 3, n. 60, p. 465-470, jul. 2007.

SEYEDASHRAF, Omid; MEHRABI, Mohammad; AKHTARI, Ali Akbar. Novel Approach for Dam Break Flow Modeling Using Computational Intelligence. **Journal Of Hydrology**,



[S.L.], v. 559, p. 1028-1038, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.001>.

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. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, M. M. G. T. de; WEERAKOON, S. B.; HERATH, Srikantha. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 800-806, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000846](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000846).

SOARES, Lindolfo. **Barragem de Rejeitos**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

SOUZA JÚNIOR, Tension Freire de; MOREIRA, Eclesielter Batista; HEINECK, Karla Salvagni. Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil. **Holos**, [S.L.], v. 5, p. 2-39, 14 nov. 2018. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2018.7423>.

STELA, Luis Henrique; DUARTE, Juliana Canto; PEREIRA, Camila Ortulan. Métodos de Disposição dos Rejeitos de Minério de Ferro Alternativos ao Método de Barragens: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 34-45, dez. 2020.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclone**. Eastbourne: Holt, Rinehart & Winston, 1984. 198p.

TAILINGS INFO. **Deposition Methods of Tailings**. Disponível em: <https://www.tailings.info/disposal/deposition.htm>. Acesso em: 03 mar. 2021.

THOMÉ, Romeu; PASSINI, Matheus Leonardo. Barragens de Rejeitos de Mineração: Características do Método de Alteamento para Montante que Fundamentaram a Suspensão de sua Utilização em Minas Gerais. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, Cândido Rondon, v. 34, n. 18, p. 49-65, jan. 2018.

TIAN, Zhong *et al.* Numerical Analysis of Sand Bed Degrading and Sediment Transport Rate Under Tailings Dam Break. **Frontiers In Earth Science**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-1, 14 jul. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/feart.2021.686277>.

URZICĂ, Andrei *et al.* Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania). **Water**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 57, 30 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13010057>.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS 4.5**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 12 ago. 2020a.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS 5.0.7**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 12 ago. 2020b.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **EM 1110-2-1908: Instrumentation of Embankment Dams and Levees**. Washington, 1995.

VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailing Dams**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 369 p.

VON THUN, J.L. GILLETTE, D.R. **Guidance on Breach Parameters**. Internal Memorandum, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver. 1990.

XU, Y. ZHANG, L.M. Breaching Parameters for Earth and Rock fill Dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 135, n.12, p.1957. 2009.

ZHONG, Qiming; CHEN, Shengshui; DENG, Zhao. A Simplified Physically-Based Model for Core Dam Overtopping Breach. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 90, p. 141-155, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.032>.

## SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

### ARTIGO 1 – UMA ANÁLISE DOS RESULTADOS TÉCNICOS DE INVESTIGAÇÃO SOBRE O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO EM MARIANA/MG

#### 1 INTRODUÇÃO

O Complexo de Germano é uma lavra a céu aberto de extração de minério de ferro (CBDB, 2011), onde eram gerados dois tipos de rejeitos distintos, as lamas e os rejeitos arenosos (MOGHADDAM; RIVEROS; FARHANGI, 2020). As areias consistiam em uma mistura de areia com silte mais fino e proporcionavam uma drenagem mais livre, porém mais suscetível à liquefação quando soltas e saturadas. As lamas, muito finas, eram semelhantes à argila com uma permeabilidade muito baixa (MORGENSTERN et al., 2016).

A Barragem de Germano, estava próxima da exaustão da capacidade do seu sistema de deposição de rejeitos, quando foi construída a Barragem de Fundão em 2008. Havia ainda no local a Barragem de Santarém, localizada a jusante dos reservatórios do Germano e do Fundão, servia de reservatório de água e contenção dos sedimentos provenientes destes reservatórios (CBDB, 2011). A Figura 15 apresenta a concepção do Complexo de Germano com as estruturas mencionadas, antes do rompimento de Fundão, e a proximidade do distrito de Bento Rodrigues.

Figura 15 - Parte do Complexo de Germano em Mariana/MG.



Fonte: Adaptado do Software Google Earth (2021).

Depois de vários problemas técnicos em sua história, a Barragem do Fundão rompeu-se no dia 25 de novembro de 2015, causando grande devastação. A ruptura foi condicionada a uma série de incidentes ao longo dos anos, começando em 2009, logo após o primeiro enchimento, o qual exigiu modificações nos projetos originais. Segundo Moghaddam, Riveros e Farhangi (2020) foram, (1) defeitos de construção no dreno de base com falha no sistema de drenagem e saturação das areias; (2) crista do barramento apoiada sobre a área de deposição de lamas na região da ombreira esquerda, enfraquecendo-a; (3) falha na galeria de drenagem de concreto abaixo da ombreira esquerda, e segundo GDS (2016), (4) ocorrência de terremotos de baixa magnitude nas proximidades da barragem.

A onda de lama percorreu, inicialmente, 2,0 km até a localidade de Bento Rodrigues, que foi quase totalmente destruída (COELHO, 2015). Demorou quarenta minutos após o rompimento para percorrer 10 km e chegar ao Distrito de Bento Rodrigues e, em 12 segundos, destruiu 80% de suas 257 construções, deixando 329 famílias desabrigadas e 19 pessoas mortas (DIAS et al., 2018).

A enorme quantidade de rejeitos sólidos acarretou sérios problemas em mais sete distritos do município de Mariana, tendo posteriormente atingido outro estado (OLIVEIRA; CINTRA, 2019). Isto se deu porque a lama ainda percorreu 55 km no rio Gualaxo do Norte, até desaguar no rio do Carmo, e percorreram outros 22 km até a sua junção com o rio Doce (COELHO, 2015). O despejo do rejeito de minério de ferro na Bacia do Rio Doce provocou o assoreamento de rios e riachos, comprometeu a biodiversidade local-regional, além do sustento e alimentação de pequenos agricultores, pescadores e de povos indígenas (BORGES, 2018). Foram lançados no ambiente aproximadamente trinta e cinco milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de mineração de ferro, sendo dezesseis carreados pelo rio Doce em direção ao mar (DIAS et al., 2018).

Para contribuir com o estudo proposto nessa dissertação, o presente capítulo constitui uma revisão sistemática sobre os resultados de laudos técnicos, relatórios independentes e painéis de especialistas a respeito do rompimento da Barragem do Fundão, voltados para o esclarecimento da sociedade e dos profissionais em geotecnia em geral, sobre os argumentos relacionados aos motivos da ruptura da estrutura.

## **2 METODOLOGIA**

Foi colocado como critério de anexação a esta revisão, trabalhos técnicos com explicações para as causas do rompimento, excetuando-se a identificação de condutas empresariais envolvidas no evento. Optou-se pelo uso de fontes baseadas no conhecimento de organismos independentes no assunto (QUADRO 8).

Quadro 8 - Fontes para a revisão bibliográfica sobre o rompimento em Mariana.

TIPO	QUANTIDADE	EXEMPLARES
Trabalho Investigativo	9	PCMG (2016); DNPM (2016); MTPS (2016); IGAM (2016); IBAMA (2016); Centro de Sismologia da USP (2015); EMBRAPA (2016); SEMAD (2016); Governo de Minas Gerais (2016).
Comissão Parlamentar de Inquérito - CPI	3	ALMG (2016); Senado Federal (2016); Câmara dos Deputados (2016).
Denúncia	1	MPMG (2016).
Investigação Independente	3	Morgenstern et al. (2016); GDS Case Study (2016); Barbosa e Souza (2018).
Trabalhos Acadêmicos	5	Machado (2017); Machado, Saliba e Baptista (2018); Matos, Eleutério e Baptista (2019); Moghaddam, Riveros e Farhangi (2020); Koppe (2020).
Trabalhos de Referência	3	Pimenta de Ávila Consultoria (2015); Amplo Engenharia (2017); CBDB (2011).
Total	24	

Fonte: A autora (2021).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Geotécnica

A barragem de rejeito de Fundão, possuía cerca de 55 milhões m<sup>3</sup>, e a de Santarém, cerca de 7 milhões m<sup>3</sup>, todas situadas no vale do córrego Santarém (ALMG, 2016). O projeto inicial de Fundão consistia em um dique inicial de terra compactada. As areias depositadas na praia de rejeitos ajudariam a reter as lamas de atingirem a barragem (MOGHADDAM; RIVEROS; FARHANGI, 2020), mantendo-as a uma distância mínima de 200 m do barramento.

O rejeito gerado no beneficiamento de minério de ferro no Complexo de Germano da Samarco era transportado em fluxos separados. De acordo com Morgenstern et al. (2016), as

areias, compostas por areias e siltes em proporções proximamente iguais, formavam uma praia por onde a água escoava rapidamente; e lamas, grãos finos de natureza argilosa, ficavam suspensos e estabeleceram-se em água parada produzindo um material macio e de baixa permeabilidade. No projeto original, a Barragem era destinada a receber e conter os rejeitos arenosos (70%) e lama (30%) do beneficiamento do minério de ferro (MACHADO, 2017). As características destes materiais c no relatório de Morgenstern et al. (2016), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Características do material contido na Barragem do Fundão.

PROPRIEDADE	AREIAS	LAMAS
Percentual menor que 0,074 mm (%)	40 - 45	98 - 100
Percentual menor que 0,002 mm (%)	< 2,0	20 - 25
Densidade Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,8 – 2,9	3,9 - 4,0
Índice de Plasticidade (IP)	Não plásticas	7 - 11
Permeabilidade (cm/s)	3x10 <sup>-4</sup>	< 10 <sup>-6</sup>

Fonte: Morgenstern et al. (2016).

A lama pode ser classificada como argila de baixa plasticidade a partir dos Limites de Atterberg, com baixa permeabilidade correspondente (MORGENSTERN et al., 2016). Os depósitos de areia eram normalmente soltos e não compactados, devido a sua colocação por meios hidráulicos. As lamas transportadas como uma pasta, foram classificadas como argilas de baixa plasticidade (GDS, 2016). A concentração de minerais derivados de ferro, nas lamas, imprime um alta massa específica, em torno de 3,9 – 4,0, que os distingue das areias mais leves, que possuem massa específica de 2,8 – 2,9 (MORGENSTERN et al., 2016) (TABELA 2).

Tabela 2 - Análise quantitativa de minerais no rejeito.

MINERAL	FÓRMULA	LAMA (%)
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	< 0,1
Goethita	α-Fe <sub>3</sub> +O(OH)	30,9
Hematita	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42,9
Ilita-Muscovita	KAl <sub>2</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1,4
Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	4,4
Plagioclásio	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> – CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	1,1
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	19,2
Total	-	100

Fonte: Adaptado de Morgenstern et al. (2016).

Segundo o MTPS (2016), ao longo dos anos os relatórios de análise de estabilidade da Barragem do Fundão apontam alterações nos parâmetros de resistência dos materiais constituintes (TABELA 3).

Tabela 3 - Parâmetros dos materiais contidos na Barragem do Fundão.

DOCUMENTO	c' (kPa)		$\phi$ (°)	
	Fundação	Aterro Argiloso	Fundação	Aterro Argiloso
Carta de Risco da Barragem do Fundão (2013)	30	20	28	28
Relatório Anual de Estabilidade (2013)	45	29	34,4	28
Relatório Anual de Estabilidade (2015)	40	Não citado	32	Não citado
Relatório Técnico – Projeto Detalhado na El. 940 m (2015)	10,5 (Residual de filito) e 30 (Saprólito de filito)	20	31 (Residual de filito) e 33 (Saprólito de filito)	30

Fonte: Adaptado de MTPS (2016).

Observa-se uma grande variação nos parâmetros de resistência dos solos ao longo dos anos, tal que interferem intimamente nos fatores de segurança adotados, principalmente observando as mudanças no intercepto coesivo ( $c'$ ).

### 3.2 Histórico de Engenharia

A concepção da Barragem do Fundão era baseada na separação dos rejeitos arenosos e finos em tanques específicos. Seu sistema construtivo foi realizado pelo método de alteamento a montante, com os próprios rejeitos arenosos. A construção do dique de partida foi concluída em outubro de 2008 e o primeiro enchimento se deu em abril de 2009 (GDS, 2016).

O Dique (1) de partida do sistema de alteamento de rejeitos arenosos (FIGURA 16) foi implantado em etapa única, e seu corpo foi composto por um aterro homogêneo de solo saprolítico compactado. Devido à pouca resistência dos saprólitos, a estrutura foi revestida com uma camada em solo argiloso (PCMG, 2016). O rejeito arenoso que continha era proveniente

da flotação convencional, possuindo alta permeabilidade, conferindo-lhe satisfatória resistência em condições drenadas (MACHADO, 2017).

Figura 16 - Barragem do Fundão, vista geral no ano de 2008, após sua implantação.



Fonte: Arquivo de VOGBR, apud MPMG (2016).

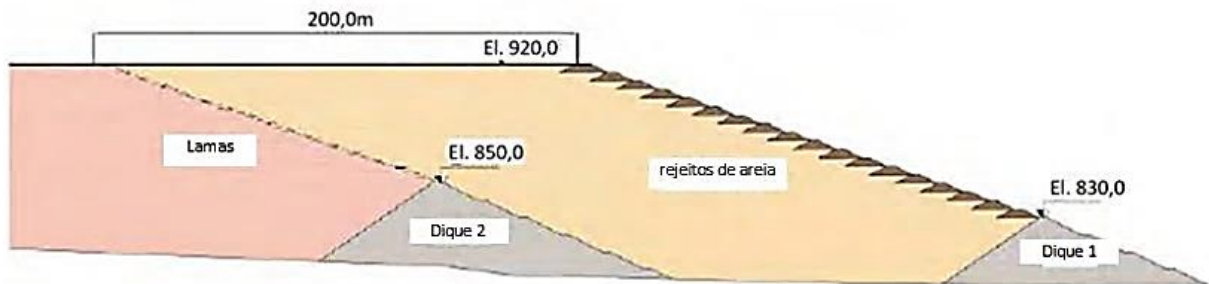
O Dique 2 foi implantado na forma de uma barragem de contenção de lama, na cota 803 m, e possuía uma altura de 47 m, atingindo altura de crista em torno de 850 m. Foi construído em aterro homogêneo de solo saprolítico, revestido por uma camada protetora em solo argiloso (PCMG, 2016). Recebia o rejeito fino (lama), proveniente da deslamagem e do processo de recuperação de minério de ferro nas colunas *'releaner'*, tinha baixa permeabilidade e resistência (MACHADO, 2017).

Dois métodos alternativos foram considerados para altear o Dique 1 depois de preencher o espaço entre os dois diques com areia. O primeiro, era de realizar um alteamento da barragem por linha de centro até a El. 920,0 m, com rejeitos arenosos. Porém, esta alternativa não foi selecionada, o conceito de alteamento à montante, mostrado na Figura 17 foi adotado em seu lugar (MORGENSTERN et al., 2016).

Em dezembro de 2008 iniciaram-se as atividades de operação do Sistema de Rejeitos do Fundão, através do qual ocorreu a disposição de rejeitos arenosos no reservatório do Dique 1 até abril de 2009, quando foi observada uma forte percolação no talude de jusante do Dique 1 (PCMG, 2016), uma condição sintomática de *piping* ou erosão interna (FIGURA 18).



Figura 17 - Alçamento de montante do Dique 1.



Fonte: Morgenstern et al. (2016).

Figura 18 - Processo erosivo interno e surgência no talude da Barragem de Fundão.



Fonte: Arquivo de VOGBR, apud MPMG, 2016.

A percolação de aproximadamente 1,0 m de diâmetro promoveu o carregamento de material do aterro, levando à decisão de interromper o lançamento de rejeitos e esgotar, emergencialmente, o reservatório que estava em fase inicial de enchimento (MTPS, 2016). Foi construído um aterro de blocos de itabirito na base do talude de jusante com camadas de transição, controlando a saída da percolação, mediante a filtragem e retenção dos finos carregados e mantido um volume de espera superior da barragem de Santarém (MPMG, 2016).

Em meados de 2009, com a ampliação de sua produção, houve falta de espaço para depositar os rejeitos de lama, uma vez que a capacidade da barragem de Germano estava próxima da exaustão e o reservatório do Dique 1 de Fundão precisou ser esvaziado (MPMG, 2016). Neste momento, foi definida a criação de um Dique (1A) na El. 825m (Figura 19), a montante do Dique 1, para que fossem permitidas as obras de regularização, possibilitando a continuidade do lançamento de lama e rejeito arenoso.

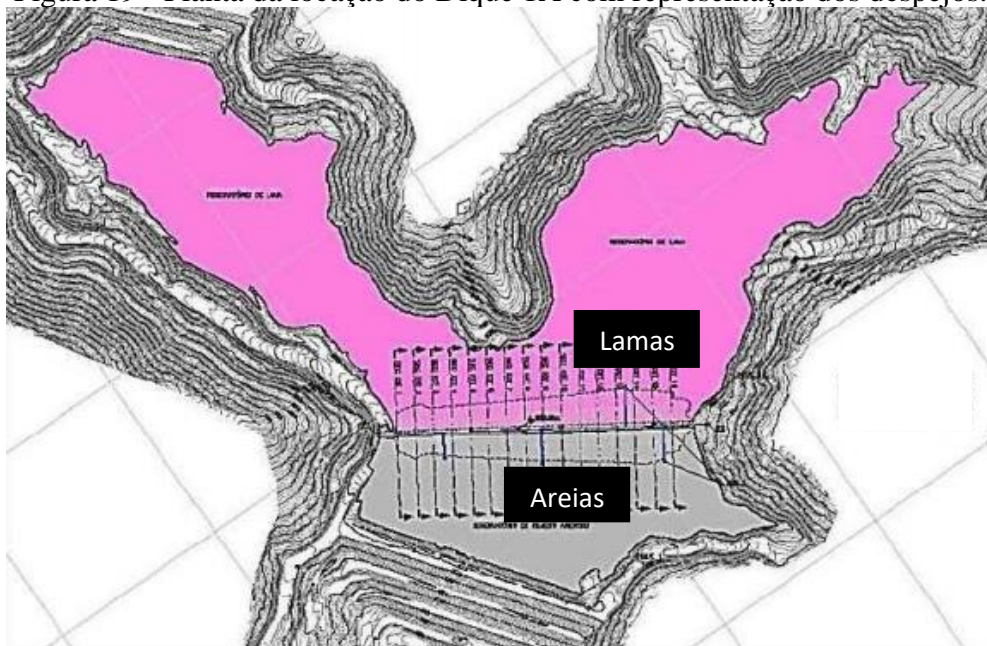
Investigações de engenharia revelaram mais tarde falhas de construção graves no dreno de fundo do Dique 1 e em seus filtros, incluindo um trecho da saída do dreno que nunca tinha sido concluído. Isso permitiu que a pressão de água dentro dele aumentasse até causar erosão e deslizamento do talude (MORGENSTERN et al., 2016).

Em 2010, ocorreu passagem de rejeito arenoso para jusante do Dique 1 através da galeria principal, desencadeando um cone de sucção (*sinkhole*), na região da ombreira direita, evidenciando a abertura de juntas de dilatação que possibilitavam a passagem de rejeitos para o interior da estrutura, em razão de recalque da fundação (MTPS, 2016).

Na galeria secundária foram verificadas trincas no concreto e juntas com vazamento, sendo descoberto a partir de análises que esta galeria não poderia suportar rejeitos acima da elevação 845 m, cerca de 10 m abaixo do nível já alcançado pelos rejeitos naquela época (MORGENSTERN et al., 2016).

O lançamento de rejeito granular no reservatório do Dique 1 foi novamente interrompido, e foi implantada uma ensecadeira a montante do Dique 1A, denominada Novo Dique 1A (FIGURA 19), para isolar a área da galeria principal, possibilitar o seu reparo e dar continuidade ao lançamento no Dique 1 (MPMG, 2016). Esta estrutura possibilitou um novo reservatório no Dique 2 e o Novo Dique 1A, sendo o Dique 2 já totalmente cheio.

Figura 19 - Planta da locação do Dique 1A com representação dos despejos.

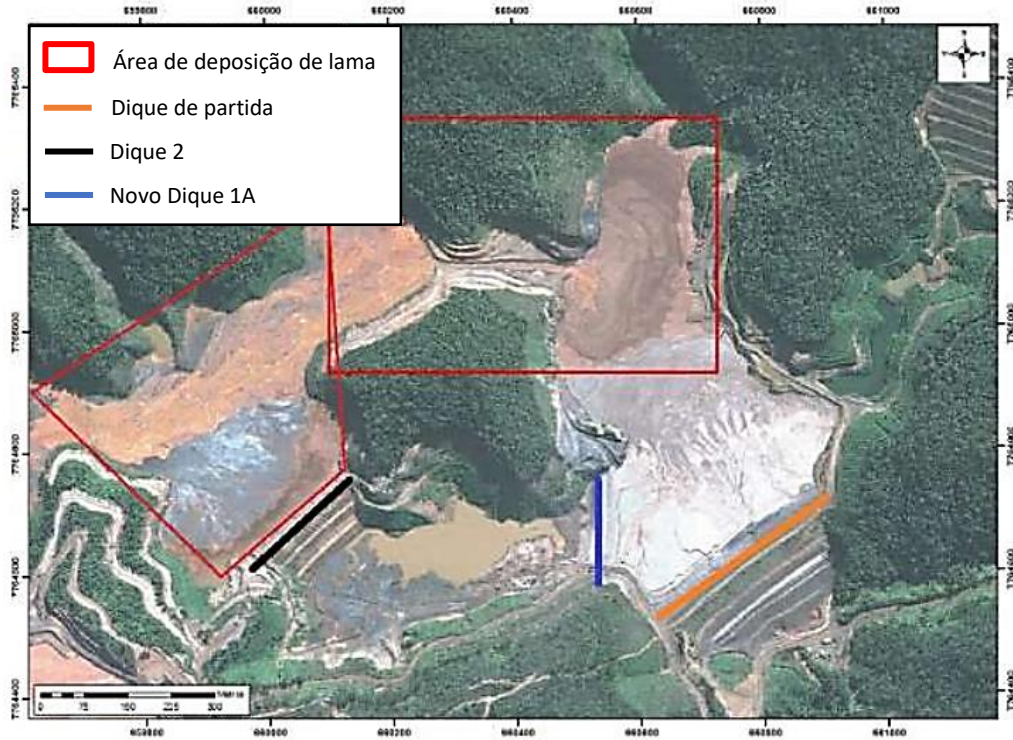


Fonte: Adaptado de MPMG (2016).

Para viabilizar a continuação da deposição de lama, mesmo com as obras da Galeria Principal em curso, foi feita a abertura de um canal extravasor do Dique 2 para o Dique 1A,

permitindo o carreamento de finos para o fundo do reservatório do Dique 1A, (FIGURA 20). essa forma, ganhava-se espaço para a deposição de rejeitos e permitia-se a suposta drenagem das águas superficiais por meio das estruturas da galeria secundária (MPMG, 2016).

Figura 20 - Interligação do reservatório de lama do Dique 2 para o fundo do Dique 1A.



Fonte: Adaptado de MPMG (2016).

Entre o Dique 2 e o Novo Dique 1A, houve a formação do álveo [leito de curso d'água], barrado pelo Novo Dique 1A, com indicativo de tratar-se de fluxo percolado do Dique 2, cerca de 170 m da ombreira direita, pressupondo uma falha na adoção da praia mínima de projeto. Na ombreira esquerda, também se formou um álveo, cerca de 150 m do último alteamento, barrado pela construção de um dique na saída da grota da VALE S/A (MPMG, 2016).

Em 2012 houve a identificação de um gradiente hidráulico elevado na ombreira esquerda (OE) da barragem. Esta anomalia foi relacionada ao nível de água mais elevado na região da PDE [Pilha de Estéril] nos arredores (MTPS, 2016). Decidiu-se realizar como medida temporária na região da OE, o preenchimento da galeria com concreto para continuação do alteamento do terreno. A estrutura movida ficou conhecida como “recuo” (FIGURA 21a), que colocou a crista da barragem mais próxima de locais de deposição de lama (MORGENSTERN et al., 2016). Nos levantamentos efetuados, constatou-se que a área junto a OE da barragem de Fundão, teve os diques de alteamentos recuados logo acima da cota do Dique 1, por uma extensão de 301 metros (PCMG, 2016). Logo, surgências começaram a aparecer na OE.



Figura 21 - Recuo da ombreira esquerda da Barragem do Fundão em (a), e surgência, trincas e escorregamento na ombreira esquerda – El. 860 m em (b).



Fonte: Morgenstern et al. (2016).

No fim do ano de 2013, os problemas começaram a se manifestar com maior intensidade sobre a região da OE (MPMG, 2016). Foi registrada, em março de 2013, uma surgência na cota 855 m junto à OE do Dique 1, seguido por outra surgência em junho na elevação de 855 m (MORGENSTERN et al., 2016), onde surgiu um novo cone de sucção (*sinkhole*) e verificou-se que a galeria secundária havia sofrido um recalque em virtude de problemas na fundação, o que ocasionou a abertura de uma das juntas da galeria por onde escorria o rejeito da barragem (MTPS, 2016).

Isto se deu pela condição pouco recomendada onde material de sustentação do dique alteado era formado por rejeitos arenosos de granulometria fina com grau de saturação intersticial elevado (PCMG, 2016). Os problemas foram tratados por meio da construção de um dreno. Uma terceira surgência apareceu em 15 de novembro na elevação 860 m e foi acompanhada pelo deslizamento de talude mostrado na Figura 21b. Outro dreno foi providenciado para tratar esta condição (MORGENSTERN et al., 2016). Em dezembro de 2013 houve nova formação de trinca no patamar da El. 872 m, junto à OE, com formação de 10 mm por 60 m, sendo a base do talude próximo à OE, encharcada (MPMG, 2016).

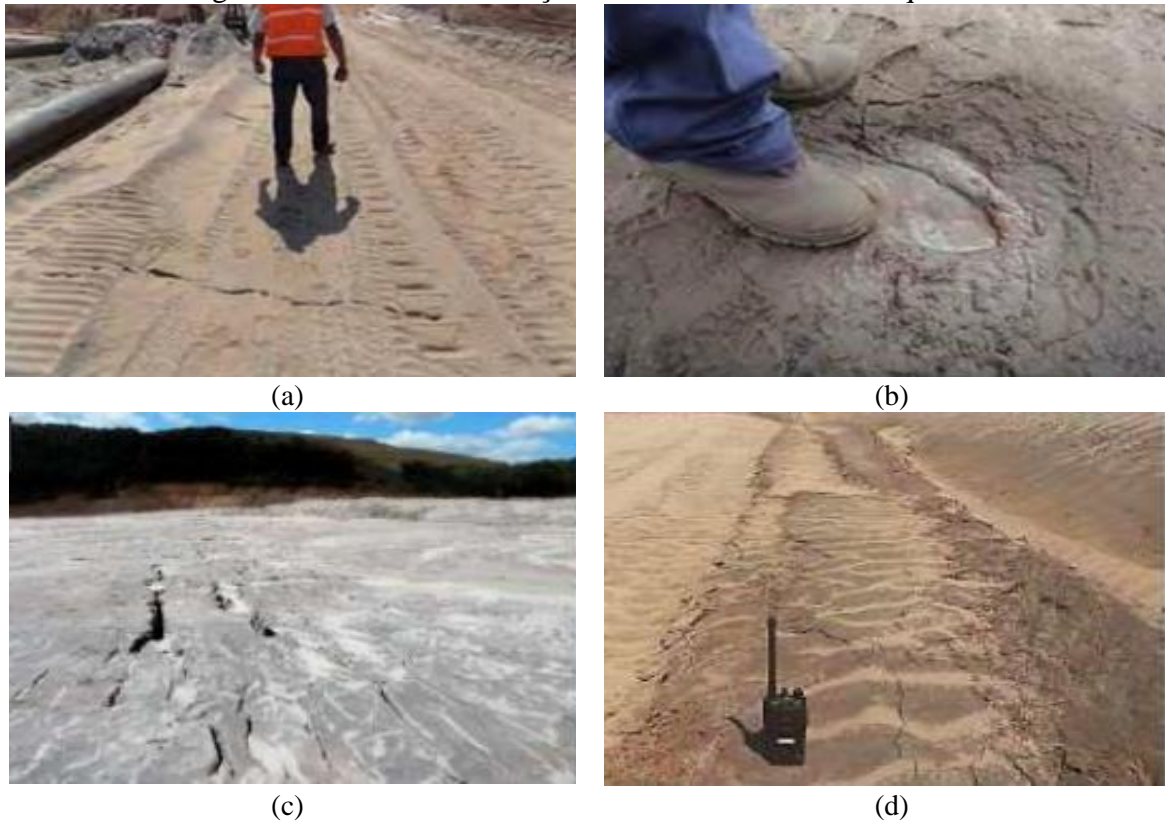
Ficou aparente em janeiro de 2014 que o tapete drenante (implantado no ano 2009) na elevação 826 m já não era suficiente e que drenos adicionais seriam necessários na OE (MORGENSTERN et al., 2016), pois a capacidade de vazão do tapete drenante foi extrapolada em função da capacidade de vazão das tubulações existentes (PCMG 2016), resultando em valores mais elevados de poropressão, optou-se pela construção de uma berma estabilizadora no seu talude de jusante, estabilizando a barragem (MPMG, 2016).

Foi recomendada em julho de 2014 a implantação de DHP (drenos horizontais profundos) na ombreira direita (OD), com especial cuidado na sua execução para evitar a possibilidade de *piping*, a fim de rebaixar o nível do lençol freático e sua respectiva poropressão

após um comportamento anormal dos piezômetros, em 30% acima do nível do reservatório (MPMG, 2016). Nesta mesma época, foi proposto um futuro alteamento da barragem 20 m acima da sua elevação máxima então prevista de 920 m, acrescentando novos dispositivos de drenagem para a o OE, em um projeto complexo de integração aos sistemas anteriores e exigindo a manutenção do recuo até a conclusão (MORGENSTERN et al., 2016).

Em agosto de 2014, foram observadas diversas trincas transversais à crista do alteamento do trecho recuado (MPMG, 2016), (FIGURA 22a), abrangendo quase toda a superfície do talude. Havia saturação superficial na base, como mostrado na Figura 22b. Na Figura 22c, é possível observar as trincas de tração no corpo do reservatório, enquanto na Figura 22d, observa-se as trincas de compressão no corpo da barragem.

Figura 22 - Trincas e saturação no recuo da ombreira esquerda.



Fonte: Morgestern et al. (2016); MPMG (2016).

Apurou-se que as trincas relatadas (FIGURA 23) caracterizaram o processo de pré-ruptura da barragem de Fundão, com um início de movimento de escorregamento do maciço na área do recuo junto da ombreira esquerda (MPMG, 2016), dessa forma, foi de interesse imediato a estabilização da estrutura.

Figura 23 - Imagem das trincas de tração (A) e compressão (B) na região do eixo recuado.



Fonte: MPMG (2016).

De acordo com MPMG (2016), havia advertência para hipótese de liquefação estática, pelo carregamento estático dos alteamentos. Foram instalados marcos superficiais para monitoramento dos deslocamentos, e executada uma berma estabilizadora na base do talude de recuo para equilibrá-la. Morgenstern et al. (2016), relatam que dentro de duas semanas, a berma de reforço ou de “equilíbrio” foi concluída. A construção do dreno da ombreira esquerda ainda estava em curso, e só terminou um ano depois [Agosto de 2015], quando recomeçou a colocação do aterro sobre a área coberta pelo dreno.

Ao final de todos os aportes, constatou-se que a barragem foi sobreposta à camada de rejeitos finos e lama depositados no fundo do reservatório do Dique 1, até um limite inferior de cota de 860 m, na região da ombreira esquerda, sob o eixo defletido da barragem. Tal situação comprometeu a percolação abaixo da El.847 m no referido trecho, que ficou limitada a uma seção de 30 m (MPMG, 2016).

Em outubro de 2015, houve um período de intensa atividade na ombreira esquerda; o resultado líquido foi que o aumento mensal na altura da crista de 2,9 m - uma taxa anualizada de alteamento de 35 m/ano (MORGENSTERN et al., 2016).

Somado a estes fatores, a implementação de alteamentos sucessivos é um fator não recomendado pelas boas técnicas de engenharia, e foi realizado em alguns períodos nos últimos dados dos anos 2014/2015 (TABELA 4). Mittal & Morgenstern (1976) recomendam que a taxa de alteamento seja de 4,6 m/ano a 9,1 m/ano, para garantir a dissipação do excesso de poropressão durante o processo de alteamento.

Tabela 4 - Elevação da crista da barragem e velocidade de alteamento.

<b>DATA</b>	<b>ELEVAÇÃO DA CRISTA (M)</b>	<b>ACRÉSCIMO DE ALTURA (M)</b>	<b>VELOCIDADE DE ALTEAMENTO (M/ANO)</b>	<b>VELOCIDADE MÉDIA DE ALTEAMENTO EM 2014/2015 (M/ANO)</b>
25/09/14	885,04	0,00	-	
02/12/14	887,65	2,61	13,80	
30/01/15	889,63	1,98	12,10	
04/03/15	890,50	0,87	9,50	
04/05/15	891,72	1,22	7,20	
25/05/15	892,72	1,00	17,10	12,30
11/06/15	849,05	1,33	28,20	
22/07/15	894,94	0,89	7,80	
27/08/15	895,80	0,86	8,60	
16/09/15	897,60	1,80	32,40	
26/10/15	898,02	0,42	3,80	

Fonte: Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute (2016) apud Machado (2017).

MPMG (2016), mostra que além desta compilação para 2014 e 2015, os dois anos (2011 e 2014) em que ocorreram os maiores valores na história de Fundão, os alteamentos atingiram 20 m e 14,6 m, respectivamente, muito acima do valor médio. Somente nos meses de operação do recuo, a barragem tinha sido alteada em mais de 20 m (MORGENSTERN et al., 2016).

Este aumento excessivo da taxa de alteamento pode estar ligado, segundo DNPM (2016), ao fato de que foi encontrado que a Mina da Alegria nas proximidades do Complexo de Germano despejava a totalidade da lama produzida pela unidade na Barragem do Fundão. A partir de registros foram colhidas as vazões médias de bombeamento, que possibilitaram cálculo de cerca de 3.302.520 m<sup>3</sup> de lama depositado no ano de 2014, com um percentual médio de sólidos de 25,23%, totalizando 833.225 m<sup>3</sup>/ano de sólidos destinados em Fundão.

De acordo com PCMG (2016), a barragem de Fundão estava sendo alteada de uma forma acelerada nos últimos anos, e que, por se tratar de uma barragem alteada para montante com o próprio material arenoso nela depositado, a taxa extrapolou bastante as diretrizes e normas técnicas para este tipo de barragem, em termos de segurança (PCMG, 2016).

Pode-se verificar que o fator de segurança da estabilidade da barragem caiu de 2,24 (em 2014) para 1,68 (em 2015) (condição drenada), o que demonstra sua fragilização no prazo de um ano, mesmo estando acima do preconizado pela NBR 13.028 (ABNT, 2017), que é de 1,50 (MTPS, 2016). Após o rompimento, foi divulgado o estudo de liquefação, com o resultado:

"Considerando os ensaios CPTu, fica evidente a suscetibilidade a liquefação do rejeito arenoso. Tendo em vista a restrição de profundidade dos ensaios, foi considerado que todo o rejeito arenoso é suscetível, ou seja, apresenta comportamento contráctil" (VOGBR, 2016 apud MPMG, 2016).

### 3.3 Sismicidade na Região de Mariana

É comumente associado o fenômeno de liquefação em barragens à indução pelo gatilho sísmico, seja pela atividade natural sísmológica no local, ou pelo fluxo de detonações cotidianas no entorno. A atividade sísmica na região de Mariana e Bento Rodrigues foi verificada pelos dados obtidos na Rede Sismográfica Brasileira para o dia 25/11/2015, e os dados obtidos constam na Tabela 5.

De acordo com MTPS (2016), a análise sugere que o epicentro principal ocorreu a 3 km da Barragem do Fundão. Todavia, afirma que a margem de erro da localização epicentral é de cerca de 10 km, devido às distâncias das estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR).

Tabela 5 - Sismos registrados pela Rede Sismográfica Brasileira, em 25/11/2015.

<b>EVENTO</b>	<b>HORÁRIO (hh:mm:ss)</b>	<b>INCERTEZA DO EPICENTRO (km)</b>	<b>MAGNITUDE (Esc. Richter)</b>
1	13:01:50	20	2.3
2	13:06:07	20	2.5
3	14:12:15	20	2.4
4	14:13:51	10	2.6
5	15:56:42	?	2.0
6	15:59:28	20	2.2

Fonte: Adaptado de Centro de Sismologia da USP (2015).

A Figura 24, apresenta o epicentro do sismo principal, às 14:13:51 (hora local), na área da Mineração Samarco. O epicentro está a 3 km da barragem do Fundão que se rompeu. A margem de erro na localização epicentral é de aproximadamente 10 km.

As discussões em torno dos tremores de terra ao redor da Barragem do Fundão são comentadas em MTPS (2016), entendendo que só em casos muito especiais tremores de terra de pequena magnitude ( $> 3,0$ ) poderiam causar danos diretos a qualquer construção civil ou barragem, e que o rompimento de barragens de rejeito por liquefação, conforme o Manual de



Segurança de Barragens (MIN, 2002) sempre foi associado a sismos com magnitude superior a 5 (Sismo Máximo de Projeto - SMP).

Figura 24 - Epicentro principal, às 14h13min51seg, na área do Complexo de Germano.

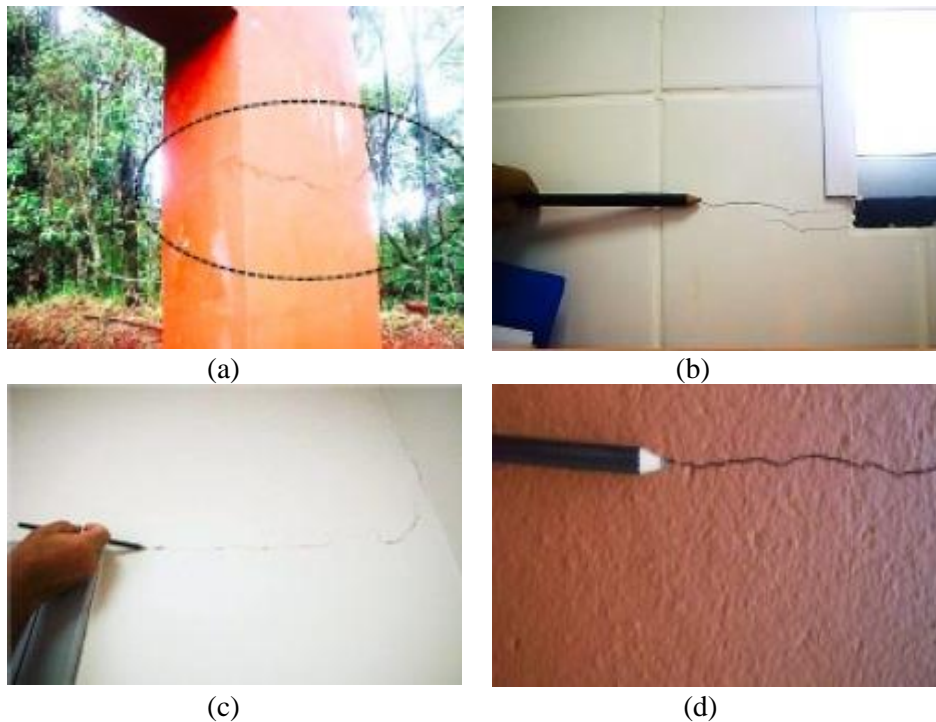


Fonte: Centro de Sismologia da USP (2015).

Morgenstern et al. (2016) discutem que, os pequenos abalos normalmente não seriam considerados danos à uma estrutura tão robusta, no entanto, a barragem estava em um estado muito frágil no momento dos abalos e fica a questão se os abalos apressaram o seu colapso. PCMG (2016) e Centro de Sismologia da USP (2015) conduzem esta explicação onde os tremores mais fortes ocorridos às 14hs talvez pudessem ter provocado pequenas fissuras na barragem permitindo leve escoamento de água; os sucessores podem ter disparado o desastre, numa situação já crítica, acelerando o processo de erosão pelo escoamento inicial da água.

Barbosa e Souza em perícia realizada para avaliação das causa do rompimento de Fundão, evidenciam as alterações provocadas nas edificações do entorno da barragem após os sismos (FIGURA 25 a,b,c,d).

Figura 25 - Macro efeito dos sismos na região da Barragem do Fundão.



Fonte: Barbosa e Souza (2018).

A condição de gatilho sísmico em estruturas frágeis já era bem delimitada nos estudos sobre abalos sísmicos e barragens de Newmark (1965), que delimita a possibilidade de perda de parte ou quase toda a sua resistência ao cisalhamento em condições de abalo, seja por causa do aumento pressão hidrostática ou devido à perda de resistência ao cisalhamento, mesmo por meio de uma deformação leve.

### 3.4 Evolução da Ruptura

Após vários acidentes anteriores, a barragem se rompeu em 5 de novembro de 2015 (KOPPE, 2020). De acordo com a PCMG (2016), por volta das 15h30min, funcionários da empresa e empreiteiros realizavam operações diversas na barragem de Fundão, quando foram surpreendidos pelo rompimento de parte da estrutura frontal desta barragem. Morgestern et al. (2016), avaliaram que uma nuvem de poeira se formou sobre a ombreira esquerda, e aqueles mais próximos da área designada como "recuo" puderam ver rachaduras se formando na manta de drenagem recém-construída.

Além disso, foi percebida uma onda se formando no centro do reservatório, ao mesmo tempo em que uma trinca se abria na crista ao longo da ombreira esquerda, seguida por uma

avalanche de rejeitos caindo em cascata a partir do local. A evolução da ruptura é tal qual mostrada na Figura 26.

Figura 26 - Relação de eventos na ruptura da Barragem do Fundão.



Fonte: Adaptado de Morgenstern et al. (2016).

Barbosa e Souza (2018), através de perícias da Polícia Federal, elaboraram a Figura 27. Em (a) formação da superfície de escorregamento no rejeito, (b) progressão do escorregamento na superfície de rejeito, (c) escorregamento do rejeito, (d) progressão para montante com formação de sucessivas superfícies de escorregamento.

Figura 27 - Detalhamento do rompimento de Fundão.



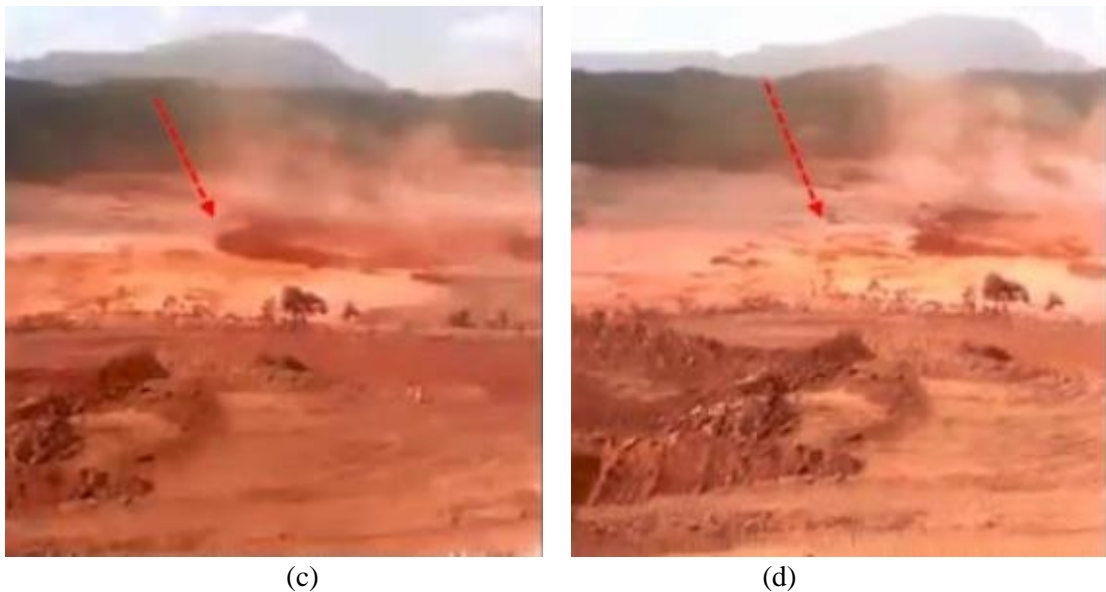
(a)

(b)

(Continua)



Figura 27 - Detalhamento do rompimento de Fundão. (Continuação)



(c)

(d)

Fonte: Barbosa e Souza (2018).

Em pouco tempo a Barragem do Fundão fragmentou-se e o que antes havia sido a estrutura representada na Figura 28a; tornou-se o representado na Figura 28b. O deslocamento da lama provocou um fluxo turbulento, considerando que as propriedades da movimentação da carga estão relacionadas com as características da fluido (densidade e viscosidade), do escoamento (declividade e profundidade) e do sedimento (diâmetro e densidade) (SEMAD, 2016). A corrida de lama que partiu da barragem de Fundão rompeu/erodiu parcialmente a região superior do maciço da barragem de Santarém, o que propiciou o extravasamento da lama que ali chegou, pela capacidade deste reservatório ter sido extrapolada (PCMG, 2016).

Figura 28 - Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus da Barragem do Fundão (a) e região de Bento Rodrigues (b).



(Continua)

Figura 28 - Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus da Barragem do Fundão (a) e região de Bento Rodrigues (b). (Continuação)



Fonte: CBH Doce (2016) apud Machado (2017).

Durante seus anos de operação, a Barragem do Fundão foi classificada como “Classe B”, de alto dano potencial associado e baixa categoria de risco, sendo nestes critérios a “Classe A”, a mais preocupante e a “Classe E” a mais favorável (baixo risco e dano potencial associado) (KOPPE, 2020).

O Plano de Ação de Emergência de Mineração (PAEBM) de Fundão (PIMENTA DE ÁVILA, 2015), descreveu os possíveis procedimentos corretivos em situações de emergência para as situações de galgamento, *piping* e instabilização. Para o último caso, refere-se ao surgimento de recalques, desalinhamentos, depressões e trincas na crista, bermas e talude de jusante. O Plano direcionava a ação com base em três níveis de emergência baseados nos riscos sendo (1) na situação de percepção do problema, (2) na situação da ameaça não extinta ou não controlada no Nível 1 e (3) em situação de ruptura eminente ou ruptura em progresso.

Em 2015 quando foi feito o PAEBM de Fundão, a Portaria nº 70.389 (ANM, 2017) ainda não havia sido promulgada. A referida Portaria trouxe a obrigatoriedade de treinamentos internos a cada no máximo, seis meses, bem como alertar a população potencialmente afetada na ZAS, caso se declare Nível de Emergência 3, com sistema de alarme, contemplando sirenes e outros mecanismos de alerta adequados ao eficiente alerta na ZAS. Até então a Lei 12.334 (BRASIL, 2010) não definia a obrigatoriedade de sirenes para o sistema de alerta. Isto só foi incluído pela Lei 14.066 (BRASIL, 2020).

Dessa forma, no rompimento de Fundão não haviam sirenes para alertar sonoramente a comunidade imediatamente a jusante na ZAS, compreendida em 10 km a partir do ponto de ruptura, ou até 30 minutos de chegada da inundação. O plano de contingência para o alerta era de ligações aos líderes comunitários para aviso do evento (NOGUEIRA; REMIGIO; SANCHES, 2015). Além disso, os próprios funcionários da empresa e terceirizados ao saberem

visualmente ou por rádio do rompimento avisaram seus familiares e amigos sobre o rompimento e evasão para local seguro (PASSARINHO, 2019) o que fez com que o número de vítimas fosse reduzido.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como ponto em comum nos diversos relatórios e laudos obtidos, é entendido que a ruptura da Barragem do Fundão se deu por uma deformação lenta com aparecimento de trincas pelo estado avançado de saturação dos rejeitos e deficiências na drenagem da estrutura. É ressaltado em vários relatórios, que do ponto de vista de engenharia, a decisão pelo recuo na OE, foi uma condição de perigo frente à diminuição da praia de rejeitos pelo assentamento do carregamento do Dique em material fino.

Há convergência nos relatórios que buscaram razões técnicas para as causas do rompimento, de que o deslizamento ocorrido em 05 de novembro de 2015 foi causado pelo assentamento sob o depósito rico em lama e de grande profundidade, uma vez que na concepção original da barragem, a distância entre o Dique 1 (disposição de areia), e o Dique 2 (disposição de lamas) deveria ter 200 m. A diminuição da distância dada pelo recuo, ao avançar sobre o depósito de areia e aproximar-se do depósito de lamas, resultou em um prejuízo à drenagem criando uma barreira pelas lamas, diminuindo o escoamento para a drenagem e afetando a estabilidade. Fato demonstrado pelas surgências, *sinkholes* e trincas relatadas.

Ao longo dos anos na Barragem do Fundão houve lançamento dos rejeitos de forma heterogênea que somado à deposição hidráulica, resultou em material fofo de alta saturação, como indicado nos relatórios pelo nível dos piezômetros relatados. A possibilidade de indução da liquefação por gatilho sísmico não foi excluída em grande parte dos relatórios, pois há dados de que os tremores causados naquele dia, puderam acionar o mecanismo de falha diante da fragilidade da condição da estrutura.

Delimitada a condição frágil dos rejeitos alocados no reservatório, a indução do fenômeno de liquefação foi dada pelo carregamento do alteamento sobre as lamas, que tenderam a ser expelidas ou espalhadas, causando uma redução no confinamento do material grosso (areias) no entorno em estado saturado e contrátil (conforme o estudo de propensão à liquefação) para um dos relatórios. Esta ação denominada “extrusão lateral” causou o deslocamento da frente de areia no maciço, pela diminuição da resistência do material para o cisalhamento, desencadeando o colapso.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração — Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água — Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

ALMG - ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS. **Comissão Extraordinária das Barragens**: Relatório Final. Belo Horizonte: ALMG, 2016. 283 p.

AMPLO ENGENHARIA. **Relatório de Impacto Ambiental**: EIA Integrado do Complexo de Germano. Belo Horizonte. 2017. 150 p.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 17 maio 2017.

BARBOSA, Sidney de Oliveira; SOUZA, Thalles Evangelista F. de. A Perícia de Engenharia da PF no Caso do Rompimento da Barragem de Rejeitos da Empresa Samarco em Mariana/MG. In: Simpósio Nacional de Auditoria de Obras Públicas, 18., 2018, Belo Horizonte. **Anais [...]**. João Pessoa: SINAOP, 2018. p. 1-105.

BORGES, Sérgio. O Desastre da Barragem de Rejeitos em Mariana, Minas Gerais: Aspectos Socioambientais e de Gestão na Exploração de Recursos Minerais. **Cuadernos de Geografía**: Revista Colombiana de Geografía, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 301-312, 1 jul. 2018. Universidad Nacional de Colombia. <http://dx.doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.63008>.

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

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, DF.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Comissão Externa do Rompimento da Barragem na Região de Mariana – MG**: Relatório Final. Brasília. 2016. 233 p.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Barragens de Rejeitos no Brasil**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 306 p.

CENTRO DE SISMOLOGIA DA USP. **Tremores de terra ocorridos em Mariana/Bento Rodrigues, MG, no dia 05/11/2015**. 2015. 7 p.

COELHO, Ricardo Motta Pinto. Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, Belo Horizonte, v. 24, n. 1, p. 17-43, dez. 2015.

DIAS, Carlos Alberto et al. Impactos do Rompimento da Barragem de Mariana na Qualidade da Água do Rio Doce. **Revista Espinhaço | UFVJM**, [S.l.], p. 21-35, aug. 2018. ISSN 2317-0611. Disponível em: <<http://www.revistaespinhaco.com/index.php/journal/article/view/203>>. Acesso em: 07 jun. 2021. Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952940>.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Utilização da Barragem de Fundão, pertencente à Samarco Mineração S.A., pela Vale S.A.** Audiência Pública Câmara dos Deputados. Brasília: DNPM, 2016. 16 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Avaliação dos Impactos Causados ao Solo pelo Rompimento de Barragem de Rejeito de Mineração em Mariana, MG.** Rio de Janeiro. 2016. 20 p.

GDS. **GDS Case Study: Fundão Mine Tailings Dam Failure.** Hampshire: GDS, 2016. 6 p. This Case Study Has Been Prepared Solely by GDS Instruments Following our Review and Interpretation of a Publicly Available Technical Report.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 01fev. 2021.

GOVERNO DE MINAS GERAIS. **Avaliação dos Efeitos e Desdobramentos do Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG.** Belo Horizonte. 2016. 287 p.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos Ambientais Decorrentes do Desastre Envolvendo o Rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.** Brasília, 2015. 38 p.

IGAM – INSITUTO MINEIRO DE GESTÃO DE ÁGUAS. **Ofício nº 583/PPI/16, de 9 de maio de 2016: Ação Civil Pública – Processo nº 0023863-07.2016.4.01.3800 – Samarco Mineração S.A. – Seção Judiciária de Minas Gerais.** Belo Horizonte. IGAM, 2016. 12 p.

KOPPE, Jair Carlos. Lessons Learned from the Two Major Tailings Dam Accidents in Brazil. **Mine Water and the Environment**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 166-173, 28 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>.

MACHADO, Nathália Couto. **Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação.** 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Nathália Couto Machado, 2017.

MACHADO, Nathália Couto; SALIBA, Aloysio Portugal; BAPTISTA, Márcio Benedito. Modelagem Hidráulica Bidimensional de Fluidos Hiperconcentrados: Estudo de Caso da Ruptura da Barragem do Fundão - Brasil. In: Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 28. **Anais [...]**. Buenos Aires. 2018. p. 1-2.



MATOS, Ana Clara de Sousa; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso; BAPTISTA, Márcio Benedito. Modelagem Hidrodinâmica da Onda de Cheia Decorrente da Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23. 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: SBRH, 2019. p. 1-10.

MIN - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Min, 2002. 148 p.

MITTAL, H.K. & N.R. MORGENSTERN. Seepage Control in Tailings Dams. **Canadian Geotech. Journ.**, v. 13, n.3. p. 277-293, ago 1976.

MOGHADDAM, Reza; RIVEROS, Guillermo; FARHANGI, Siavash. A Finite Element Analysis of the Fundão Dam Failure. In: Geovirtual, 1., 2020, Ontario. **Anais [...]**. Vancouver: Geovirtual, 2020. p. 1-8.

MORGENSTERN, Norbert R.; et al. **Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**, 2016. 88 p.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Procedimento Investigatório Criminal (PIC) MPF n.º 1.22.000.000003/2016-04**. Belo Horizonte: MPMG, 2016. 273 p.

MTPS - MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA SOCIAL. **Relatório de Análise de Acidente: Rompimento da Barragem de Rejeitos Fundão em Mariana - MG**. Belo Horizonte: SEMAD, 2016. 138 p.

NEWMARK, N. M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. **Géotechnique**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 139-160, jun. 1965. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>.

NOGUEIRA, Danielle; REMIGIO, Marcelo; SANCHES, Mariana. Sem sirenes, empresa usou telefone para alertar população. **O Globo**. Rio de Janeiro, p. 4-4. 07 nov. 2015. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/516909/noticia.html?sequence=1>. Acesso em: 30 fev. 2021.

OLIVEIRA, José Alex Nobrega de; CINTRA, Yara Consuelo. Gerenciamento de Riscos à Reputação no Discurso dos Relatórios Corporativos da Samarco. **Revista de Contabilidade e Organizações**, [S.L.], v. 13, n. 158709, p. 1-13, 23 dez. 2019. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/issn.1982-6486.rco.2019.158709>.

PASSARINHO, Nathalia. **Brumadinho: 'Pensei que aprenderiam a lição'; a história da 'sirene humana' que salvou centenas de vidas em Mariana**. 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47129648>. Acesso em: 01 fev. 2021.

PCMG - POLÍCIA CIVIL DE MINAS GERAIS. **Levantamento de Local onde Ocorreu Rompimento de Barragem: Barragem de Fundão, da Empresa Samarco S.A., Mariana/MG**. Belo Horizonte: PCMG, 2016. 174 p.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA. **Plano de Ações Emergenciais de Barragens de Mineração (PAEBM)**: Barragem do Fundão. Mariana: Pimenta de Ávila, 2015. 76 p.

SENADO FEDERAL. **Comissão Temporária da Política Nacional de Segurança de Barragens – CTPNSB**. Brasília. 2016. 98 p.

SEMAD - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Nota Técnica SEMAD/SUFIS/SUFAI nº01/2016**: Análise Multicriterial do Comportamento da Lama na Área Afetada pelo Acidente Ambiental da Barragem do Fundão - Samarco. Belo Horizonte: SEMAD, 2016. 28 p.

## ARTIGO 2 – HISTÓRICO E AGRAVANTES TÉCNICAS NA OPERAÇÃO DA BARRAGEM B1 EM BRUMADINHO-MG: UMA ANÁLISE POR RELATÓRIOS INDEPENDENTES

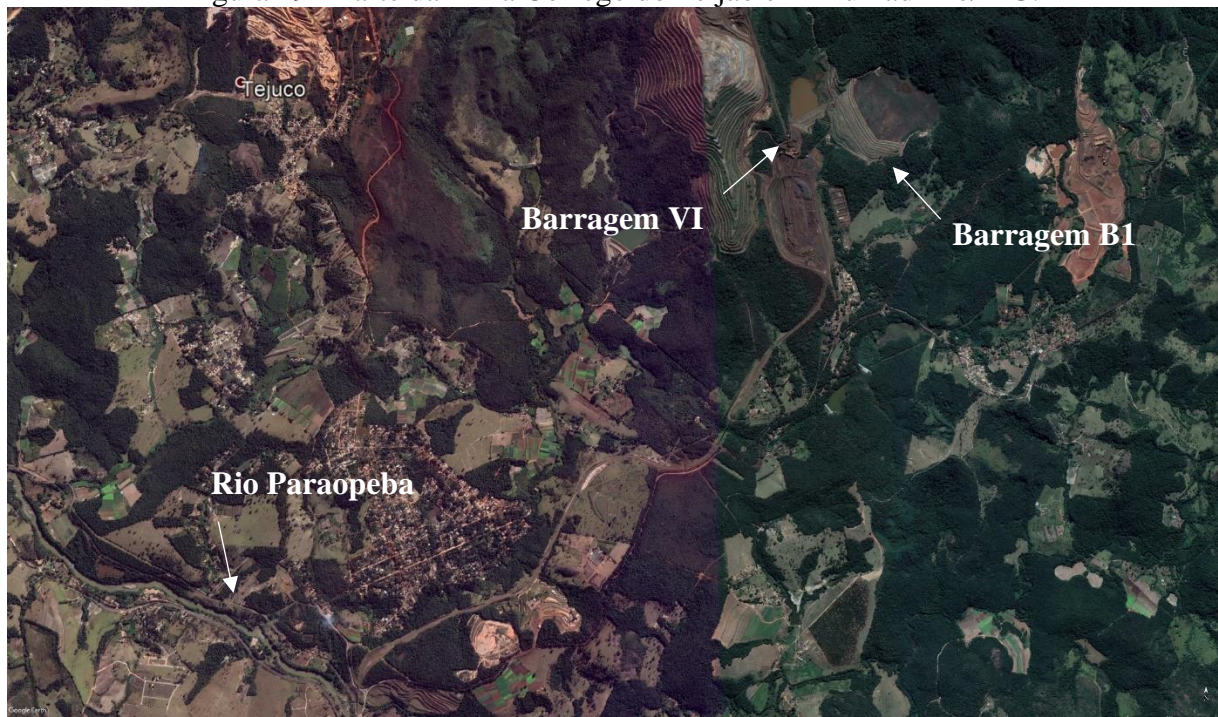
### 1 INTRODUÇÃO

A Mina Córrego do Feijão iniciou suas atividades no ano de 1956 por meio da Cia de Mineração Ferro e Carvão. Em 1973, passou para o controle da Ferteco Mineração e desde 2003 é dirigida pela Vale (SEMAD, 2018).

A Mina faz parte do Complexo Paraopeba em Brumadinho que inclui ainda a Mina de Jangada, em Minas Gerais, Brasil. A planta de Córrego do Feijão incluiu barragens, um centro administrativo com refeitório e escritório de manutenção, um terminal de cargas e uma pequena malha ferroviária para transporte de minério de ferro (PORSANI; JESUS; STANGARI, 2019). As Barragens I e VI tinham a finalidade de contenção dos rejeitos finos do tratamento do minério e reservar água para reaproveitamento no processo industrial (CBDB, 2011).

A Figura 29 apresenta a constituição de Parte do Complexo Paraopeba da Mina Córrego do Feijão, antes do rompimento, e a sua proximidade com as edificações e bairros a jusante.

Figura 29 - Parte da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG.



Fonte: Adaptado de Software Google Earth (2021).

A Barragem I “teve” como finalidade principal a contenção de rejeitos gerados no processo de beneficiamento da ITM-CFJ lançados ao longo da crista da estrutura (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS, 2018b). Em julho de 2016, o lançamento de rejeitos na Barragem I foi interrompido, pois a operação de beneficiamento do minério passou a ser realizada a seco (PF, 2019). Ainda que inoperante, no dia 25 de janeiro de 2019, por volta das 12h28min, horário de Brasília, a Barragem I da mina de Feijão rompeu-se liberando 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração. A capacidade da barragem era de aproximadamente 13 milhões de metros cúbicos (CNDH, 2019).

Sua estrutura era classificada como de baixo risco e dano potencial alto, de acordo com o pressuposto da Portaria nº 70.389 (ANM, 2017). Isso equivale a dizer que tinha baixo risco de ruptura, mas, caso se rompesse, o dano seria muito grande, pois havia comunidades e instalações da empresa a jusante da barragem (ALMG, 2019).

A força da onda de lama varreu equipamentos operacionais (como trens, veículos e máquinas de beneficiamento do minério) e o centro administrativo da Vale, soterrando escritórios, vestiário e um refeitório, vitimando trabalhadores que trabalhavam e almoçavam no local (CNDH, 2019). Com velocidade estimada em mais de 70 km/h, a lama seguiu seu curso pelo vale abaixo, após o rompimento e vazamento, os rejeitos passaram a deslocar-se velocidade de 1 km/h, chegando então ao Rio Paraopeba (CNDH, 2019). O rompimento resultou no maior acidente de trabalho do Brasil (TRTMG, 2019).

Para contribuir com o estudo proposto nessa dissertação, o presente capítulo constitui uma revisão bibliográfica sobre os resultados de laudos técnicos, relatórios independentes e painéis de especialistas a respeito do rompimento da Barragem B1, voltados para o esclarecimento da sociedade e dos profissionais em geotecnia em geral, sobre os argumentos relacionados aos motivos da ruptura da estrutura.

## **2 METODOLOGIA**

Foi colocado como critério de incorporação à esta revisão, os laudos, relatórios e relatórios finais de comissões parlamentares de inquérito (CPI), que objetivaram a explicação técnica para as causas do rompimento, excetuando-se o que porventura, tenha o objetivo de identificar condutas empresariais envolvidas no evento. Optou-se pelo uso de fontes baseadas em organismos independentes no assunto (QUADRO 9).

Quadro 9 - Fontes para a revisão sistemática sobre o rompimento em Brumadinho.

<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Exemplares</b>
Trabalho Investigativo	5	PF (2019); ANM (2019a); TRTMG (2019); CNDH (2019); ANA (2019).
Comissão Parlamentar de Inquérito - CPI	3	ALMG (2019); Senado Federal (2019); Câmara dos Deputados (2019).
Denúncia	2	MPMG (2019); AGU (2019).
Investigação Independente	3	Robertson et al. (2019); CIAEA (2019); WMTF (2019).
Trabalhos Acadêmicos	7	Lumbroso et al. (2020); Rotta et al. (2020); Carvalho (2020); Porsani, Jesus e Stangari (2019); Lima et al. (2020); Pirete e Gomes (2013); Silva (2010).
Trabalhos de Referência	10	CBDB (2011); Amplo Engenharia (2019); Walm Engenharia (2018); Potamos Engenharia e Hidrologia (2018a, 2018b); Tüv Süd Bureau de Projetos (2018a, 2018b); Geoconsultoria (2016); Tractebel Engie (2017, 2018).
Total	30	

Fonte: A autora (2021).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Geotécnica

A Barragem B1 continha rejeitos arenosos e lamas, sendo projetada para alteamentos sucessivos à montante, com um dique inicial homogêneo, denominado “minério ultrafino” (WMTF, 2019). A concepção estrutural de B1 foi muito discutida ao longo dos anos pelos especialistas engajados com a concepção de alteamentos e manutenção. Isto se deu, pois, os documentos do tipo “*as built*” da barragem eram desconhecidos. Dessa forma, buscou-se caracterizar a barragem posteriormente em operação, para entender sua constituição geotécnica e seus elementos de drenagem, formando documentos do tipo “*as is*”, como descrito por TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS (2018 a, b).

Os rejeitos consistem principalmente de partículas de óxido de ferro, como hematita ou goethita, e pequenas quantidades de quartzo e caulinita. Em rejeitos mais grossos, o teor de ferro é superior a 80%, diminuindo para cerca de 50% na lama (LIMA et al., 2020).

Dentre os vários estudos feitos ao longo da história de B1, em 2016 o “Relatório de Inspeção de Segurança Regular” (RISR), informa alguns parâmetros, entre eles, os aspectos relativos ao solo da fundação (TABELA 6). Estes parâmetros foram utilizados para o cálculo dos coeficientes de segurança de estabilidade da barragem à época.

Tabela 6 - Resultados para composição de estudos em 2016.

<b>MATERIAL</b>	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (kPa)	$S_u / \sigma'_{v0}$
Rejeitos compactados	30	37	0	-
Rejeitos fofos insaturados	26	34	0	-
Rejeitos fofos saturados	26	-	-	0,36
Solo compactado	19,5	30	10	-
Solo de fundação	20	30	20	-

Fonte: Adaptado de Geoconsultoria (2016).

Posteriormente, no RISR elaborado em 2017, além do solo residual da fundação, também é citada a existência de um solo alúvio-coluvionar e um solo alúvio-coluvionar com pedregulhos, junto à fundação do dique inicial (TRTMG, 2019). Estes novos elementos são apresentados na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 - Resultados para composição de estudos em 2017 (Condição drenada).

<b>MATERIAL</b>	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (kPa)
Rejeitos compactados	30	5	37
Rejeitos lançado fofo	26	0	34
Rejeitos lançado compacto	27	0	37
Solo alúvio-coluvionar	18	5	26
Solo silto-argiloso compactado	19,5	10	30
Solo alúvio-coluvionar c/ pedregulho	18	0	33
Solo residual	20	20	30

Fonte: Tractebel Engie (2017).

A relação mostrada para a condição não drenada permaneceu inalterada nos dados do RISR para o ano de 2018, mês de março. Neste ano, passou a valer as normativas da Portaria nº 70.389 (ANM, 2017), que definiu a realização da análise duas vezes ao ano, também no mês de setembro para conferir a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE). No segundo documento elaborado, há informações apenas sobre o solo residual da fundação, não apontando a presença de solo alúvio-coluvionar. Segundo o documento, o solo residual possui  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>,  $\phi = 30^\circ$  e  $c' = 16$  kPa, conforme Tabela 8. Nota-se que a coesão caiu de 20 para 16 kPa (TRTMG, 2019), no mesmo ano.

Tabela 8 - Resultados para composição da DCE em setembro de 2018.

MATERIAL	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\Phi$ (°)	$S_u / \sigma'_{v0}$	
				pico	residual
Rejeito	26	0	35	0,26	0,09
Aterro com minério ultrafino	25	0	30	-	-
Aterro em solo compactado	19	10	30	-	-
Aterro de rejeito compactado	28	0	37	-	-
Fundação em solo residual	20	16	30	-	-

Fonte: Tüv Süd Bureau de Projetos (2018a).

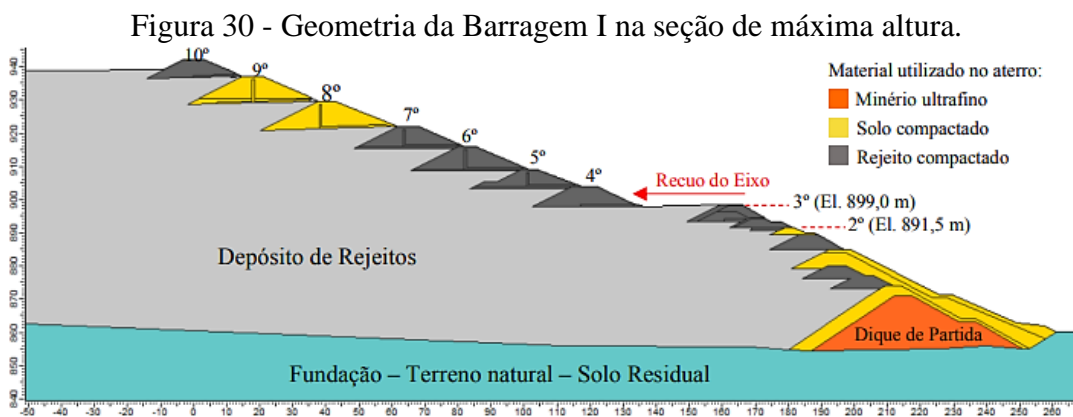
A grande oscilação de informações dadas pelos estudos feitos, é relacionada ao primeiro período de operação da barragem (1976 a 2005), onde a disposição ocorreu sem controle tecnológico, ou seja, de forma irregular e não homogênea. O resultado foi a criação de um depósito de rejeitos com elevada variabilidade de resistências, intercalando camadas fofas e camadas mediamente compactadas (MPMG, 2019). A partir de 2006 houve uma maior preocupação pela disposição uniforme e homogênea dos rejeitos, mas ainda continuou difícil a previsibilidade sobre o comportamento do material depositado. Koppe (2020), analisando os relatórios observa que, a cimentação inesperada dos grãos de rejeitos pela ação do ferro fez com que o material no final das contas apresentasse comportamento frágil.

### 3.2 Histórico de Engenharia

A Barragem I foi implantada em 1976 com finalidade de contenção de rejeitos finos provenientes da instalação de tratamento de minério, com reaproveitamento da água no processo industrial. Na região da barragem o maciço rochoso é representado por gnaisses bandados, sendo que a área do barramento se encontra em solos saprólitos/residual/coluvionar.

Estes solos mostram boa capacidade de suporte e permeabilidade baixa (TRTMG, 2019). São poucos os dados referentes à fundação da barragem e do reservatório, sendo os disponíveis relativos a sondagens posteriores para se conhecer melhor a situação atual (TÜV SÜD, 2018b).

O dique inicial foi projetado até atingir a crista na cota 874 m (TRACTEBEL ENGIE, 2017), foi executado em minério fino (material drenante), revestido por uma camada de laterita de 4,0 m de espessura no talude de montante e de 1,0 m de espessura no talude de jusante (TRTMG, 2019). No projeto de execução, não consta referência à drenagem no dique inicial. Em seguida, foram projetados 5 (cinco) alteamentos sucessivos para montante, com 3 m de altura e lançamento de rejeitos pela crista, para formação da praia próxima à barragem, com a premissa que, por separação granulométrica, a fração mais grosseira do rejeito se depositaria mais próxima da crista (GEOCONSULTORIA, 2016). Para o segundo e quarto diques foram projetados tapetes drenantes constituídos por hematitinha. Após conclusão do segundo dique, ocorreram surgências d'água na base do primeiro dique, que poderiam ser explicadas pela ausência de sistema de drenagem interna do primeiro dique (TRACTEBEL ENGIE, 2017). O perfil da barragem pode ser visualizado na Figura 30.



Fonte: Tüv Süd Bureau de Projetos (2018b).

O segundo alteamento [em 1986] correspondia a vários alteamentos menores que foram “envelopados”, sendo considerados posteriormente como uma única etapa de alteamento. O motivo desse envelopamento se deu, supostamente, devido a existência de surgências nas etapas intermediárias (PF, 2019). Ainda houve a execução de uma proteção com solo laterítico e foi criada uma berma no talude de jusante (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS, 2018b). Os projetos que deram origem a B1, são cheios de incertezas quanto à drenagem interna da estrutura nos seus primeiros alteamentos. Não havia “*as built*” para entender se os projetos



seguiram exatamente o proposto, sendo a barragem apresenta projeto original em alemão (TRACTEBEL ENGIE, 2017).

Em seguida, foi executado o terceiro alteamento em duas etapas. Todos estes alteamentos foram executados para montante, porém, no quarto alteamento, o eixo foi deslocado 38,5 m para montante em relação ao eixo anterior (GEOCONSULTORIA, 2016), efetuando um “reco” com retificação do eixo inicial da barragem, que era irregular, formando uma berma com largura variável com a finalidade de atender condições mínimas de estabilidade (PF, 2019), já que o Fator de Segurança (FS), no eixo original estava abaixo do ideal, inferior a 1,3 (GEOCONSULTORIA, 2016). Nesta etapa, de acordo com TRTMG (2019), o sistema de drenagem interna foi composto por filtro horizontal de *sinterfeed* com tubos porosos até sua saída.

O quinto alteamento foi projetado com altura de 5,0 m, e foi indicada uma construção mais lenta com berma a montante com 4,0 m de largura, devido à presença de rejeito fofo e saturado ou com alto grau de saturação (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS, 2018b). Os sexto, sétimo e oitavo alteamentos foram projetados com características semelhantes ao anterior com altura dos diques de 6,5 m, 6,0 m e 7,5 m, respectivamente. O material constituinte do sistema de drenagem interna do último alteamento foi areia com tubos PVC no fundo (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS, 2018b).

Após o oitavo alteamento foram executados outros dois alteamentos, para as cotas 937,0 m e 942,0 m (etapa última), com altura total máxima de 87 m (GEOCONSULTORIA, 2016). Ao final destes alteamentos a estrutura alcançou a crista entre a EL. 929 m e a El. 930 m. O nono e décimo alteamentos foram projetados na El. 937m e El. 942 m, com 7,5 m e 5,0 m de altura, respectivamente (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS, 2018b). O material constituinte na maior parte dos alteamentos foi o próprio rejeito de minério compactado, sendo que alguns alteamentos, como por exemplo o nono alteamento, foram construídos com solo compactado, retirado de áreas de empréstimo (PF, 2019). A diferença de materiais empregados pode ser vista na Figura 31. Alguns aterros foram constituídos por rejeito compactado, com tapete drenante prolongado para montante, apresentando coeficiente de permeabilidade superior a  $10^{-2}$  cm/s, com um dreno de brita em sua extremidade (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS, 2018b). O oitavo, nono e décimo alteamentos adotaram sistemas baseados no uso de tapetes drenantes executados em areia, conjugados ou não com filtros verticais (PF, 2019).

Figura 31 - Barragem B1 após rompimento.



Fonte: PF (2019).

Em 2011 foi elaborado um projeto conceitual para recuperação de finos da Barragem I, que previa o desmonte mecânico da estrutura ao longo de 19 anos, com a exploração do material depositado no reservatório e dos diques, já que o mesmo possuía concentração de minério suficiente para seu beneficiamento com novas tecnologias (TRTMG, 2019), mas o projeto não foi executado.

Em maio de 2016 foi realizada uma campanha de sondagem, especificamente na fundação, a fim de melhorar o conhecimento da área (TRACTEBEL ENGIE, 2017). Em julho de 2016 as operações de beneficiamento do minério na instalação de tratamento de minério passaram a ser realizadas de forma a seco e a barragem não recebeu mais rejeitos (TRTMG, 2019) (FIGURA 32). Totalizou nesta época, 11 milhões e 700 mil m<sup>3</sup> de volume armazenado. A barragem tinha aproximadamente 27 hectares, 87 metros de altura e 720 metros de comprimento na sua crista quando de seu rompimento (ALMG, 2019).

Figura 32 - Estrutura final da Barragem B1.



Fonte: Potamos Engenharia e Hidrologia (2018a).

Nos últimos anos da estrutura, a B1 apresentou anomalias que indicavam comprometimentos de sua estabilidade. No final do ano de 2017, foi realizada uma análise de estabilidade de B1 para o cálculo de risco monetizado, em matriz de probabilidades e consequências que teve por objetivo a avaliação de riscos (MPMG, 2019), sendo uma análise probabilística para erosão interna e liquefação. Os estudos desenvolvidos calcularam a probabilidade de ruptura de  $1,9 \times 10^{-4}$ . O patamar de tolerabilidade para barragens de rejeitos é da ordem de  $1 \times 10^{-4}$ . Ou seja, a probabilidade de a estrutura ruir não pode alcançar patamares que superem 1 (uma) ocorrência a cada 10.000 (dez mil) anos (POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA, 2018 a,b).

A análise de estabilidade na condição não drenada para o modo de falha liquefação foi desenvolvida primeiramente para a resistência de “pico” do material (resistência máxima mobilizada para resistir ao cisalhamento). A denominada análise do “gatilho” ou de “pico”, naquele momento (novembro de 2017) teve um Fator de Segurança (FS) = 1,06 (TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS 2018; POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA, 2018, apud MPMG, 2019). Era muito inferior ao Fator de Segurança (FS) mínimo aceitável de 1,3 pela NBR 13.028 (ABNT, 2017), configurando, portanto, que a estrutura não correspondia a segurança para liquefação.

Em uma condição de pós-gatilho, ou pós-liquefação, se a resistência residual for satisfatória (FS pós-liquefeita  $\geq 1,1$ ), a liquefação que ocorrer em um determinado local não se propagará no maciço todo e a ruptura não se desenvolverá em fluxo, porém se a resistência residual para essa condição for insuficiente (FS pós-liquefeita  $< 1,1$ ), uma vez deflagrada a liquefação de uma porção do solo, desenvolver-se-á a ruptura em fluxo progressivo (TÜV SÜD 2018; POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA, 2018, apud MPMG, 2019). Considerando-se que o Fator de Segurança (FS) da B1 obtido na análise de estabilidade para Liquefação (pós-liquefeita) foi de FS = 0,39, muito menor, portanto, que o mínimo exigido (FS  $\geq 1,1$ ), conclui-se que a barragem não atendia aos critérios de segurança da condição “pós-liquefeita” e, uma vez ocorrida a liquefação, a ruptura em fluxo ocorreria, provocando o colapso global da barragem (MPMG, 2019).

Diante das dificuldades encontradas, foram indicadas por um assessoramento técnico, medidas para aumentar o FS da estrutura, em suma (TÜV SÜD 2018; POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA, 2018, apud MPMG, 2019): (1) Rebaixamento do nível piezométrico com poços (FS de 1,06 passaria a 1,13); (2) Berma de estabilização (modificaria o FS de 1,06 para 1,29 ou 1,30); (3) Lavra da barragem: após o sétimo ano de lavra, com o rebaixamento de 21 metros de barragem, (alcançaria FS próximo a 1,30); (4) Retaludamento da

barragem: (FS modificado de 1,06 para 1,17); (5) Retaludamento da barragem + berma de estabilização (FS modificado de 1,06 para 1,36, com retaludamento e berma de reforço); (6) Rebaixamento de nível de água através de Drenos Horizontais Profundos (DHPs) e lavra da barragem.

A última solução foi adotada, e em 11 de junho de 2018, durante a instalação do 15º DHP houve um problema quando a perfuratriz estava a aproximadamente 80 m de profundidade, quando a água utilizada para a perfuração parou de retornar pelo furo que se fazia, e foi observada água sob pressão saindo a 15m à direita e 10m acima do furo em execução (ALMG, 2019) com carregamento de sólidos. O 15º DHP foi posteriormente selado, devido a problemas ocorridos durante uma tentativa de perfuração de um bloco de canga na trajetória da perfuração (PF, 2019). Este evento foi caracterizado como um fraturamento hidráulico que iniciou um processo de erosão interna.

Em vista da gravidade do evento de erosão interna, a implantação dos DHPs que objetivavam o incremento do Fator de Segurança da Barragem I foi interrompida no mesmo dia 11 de junho de 2018. A interrupção da implantação dos DHPs acabou por confirmar a ineficácia daquela medida, a qual não surtiu os efeitos necessários ao incremento do Fator de Segurança para liquefação (MPMG, 2019).

Somente metade dos DHPs tinham sido instalados, o radar dava sinais crescentes que maciço da Barragem 1 estava se movimentando (ALMG, 2019). Em 11 junho de 2018, por volta das 12h, o radar identificou a deformação de uma área intitulada “área 11”, onde estava sendo instalado o 15º DHP, conforme anteriormente detalhado (MPMG, 2019). Os piezômetros instalados nas proximidades (CFJB1PZ070 e CFJB1PZ071) também acusaram pico na leitura, subindo até 4 metros na data. A Figura 33, apresenta a localização dos piezômetros e local de perfuração. Nesta época em 2018, segundo CIAEA (2019), dos 56 medidores de vazão instalados, apenas 12 apresentavam vazão, indicando problemas na drenagem interna.

Após a instalação da metade dos DHPs, o modo de falha para liquefação na condição não-drenada sofreu ínfima alteração, passando de 1,06 para 1,09 (pico) e de 0,39 para 0,44 (pós-liquefeita) na seção adotada. Já para o modo de falha erosão interna a probabilidade de falha aumentou de  $1,9 \times 10^{-4}$  para  $2 \times 10^{-4}$ . E probabilidade de falha de  $3 \times 10^{-4}$  para liquefação (pico), quando, conforme visto, o valor máximo aceitável seria de pelo menos  $1 \times 10^{-4}$  (MPMG, 2019).

No documento “Revisão Periódica de Segurança da Barragem”, para o segundo semestre do ano de 2018, Tüv Süd Bureau de Projetos (2018b), concluiu em novos ensaios que B1 tinha para um cenário de instabilização sob a condição não-drenada um FS > 1,05, sendo esta a última avaliação feita para o potencial de liquefação da estrutura antes do rompimento,

onde foi recomendada a adoção de medidas que diminuíssem a ocorrência de gatilhos como vibrações, tráfego de equipamentos pesados e detonações próximas, além da recomendação de não execução de obras nos pés dos taludes que pudessem sobrecarregar o reservatório ou a barragem.

Figura 33 - Relação da área afetada, em (a) pela instalação do DHP 15, e em (b) aumento dos níveis de água para os piezômetros.



Fonte: MPMG (2019).

Nos meses de dezembro de 2018 e janeiro de 2019, o radar de monitoramento da estabilidade de taludes (SSR), vinha dando alarmes exponencialmente crescentes de movimentação do maciço da B1 (ALMG, 2019). O equipamento mede movimentos submilimétricos em uma superfície de talude (MPMG, 2019). Houve detecção pelo instrumento de movimentação no maciço numa área de cerca 1,5 hectare, o que indicaria que, no interior da barragem, o rejeito ou bolsões de água estariam sendo fortemente pressionados ou mesmo migrando em grande volume de uma posição a outra (ALMG, 2019).

Além das deformações detectadas pelo radar interferométrico que monitorava a Barragem I, havia um descontrole do nível d'água no interior do maciço da Barragem I, agravado pela inadequação do bombeamento de água afluyente no reservatório (MPMG, 2019). De acordo com ALMG (2019), houve problemas na bomba de sucção da água da nascente existente a montante da B1, que coincidiu com o acúmulo de água em períodos de chuva, como no mês de janeiro do rompimento. Sem bombeamento, a água se acumula no reservatório, formando uma lâmina d'água, o que favorece a sua infiltração no rejeito e a elevação da linha freática no interior do maciço, com comprometimento ainda maior dos Fatores de Segurança (MPMG, 2019).

### **3.3 Gatilhos para Liquefação Estática**

Collaço e Assumpção (2019) estudando a sismologia advinda dos dados da RSBR – Rede Sismológica Brasileira, relatam que não há evidências de terremotos naturais perto de Brumadinho e na proximidade do rompimento. Os sismogramas mostraram apenas sinais sísmicos gerados pelo fluxo de lama registrados nas estações RSBR localizadas a até 200 km de distância e com duração superior a 5 minutos.

Robertson et al. (2019) analisaram os registros sísmicos do dia do rompimento, com a indicação de que houve vibrações no solo de baixa amplitude começando cerca de 28 segundos antes das primeiras deformações observadas da barragem relacionadas ao rompimento. Os autores indicam que tais vibrações de baixa amplitude parecem ser o início da perda de resistência interna que ocorre na barragem antes que todo o mecanismo completo de rompimento fosse visível na superfície.

Newmark (1965), em seus estudos sobre ação sísmica em barragens corrobora ao mencionado anteriormente, que um abalo sísmico com movimentos moderados pode introduzir fissuras e rachaduras que podem levar à erosão interna, sobretudo em estratos sensíveis e em alta saturação como em B1.

A suscetibilidade à falha por liquefação em B1 foi examinada pela primeira vez em Silva (2010) e posteriormente em Pirete e Gomes (2013) com a conclusão de que os resultados ratificaram na época a condição de segurança do reservatório, embora tenham demonstrado que os rejeitos tenderam a exibir um comportamento contrátil durante o cisalhamento, indicando suscetibilidade à liquefação.

O relatório de CIAEA (2019), considera a possibilidade de um potencial gatilho pela deformação lenta; quando os rejeitos acumulam deformações específicas sob carga constante,

dado pela alta tensão dos materiais de alta densidade, ultrapassando o estado limite para liquefação, coincidindo pequenas deformações internas com pequenas deformações externas, que teriam levado o material ao limite da resistência ao cisalhamento não drenado de pico.

### 3.4 Evolução da Ruptura

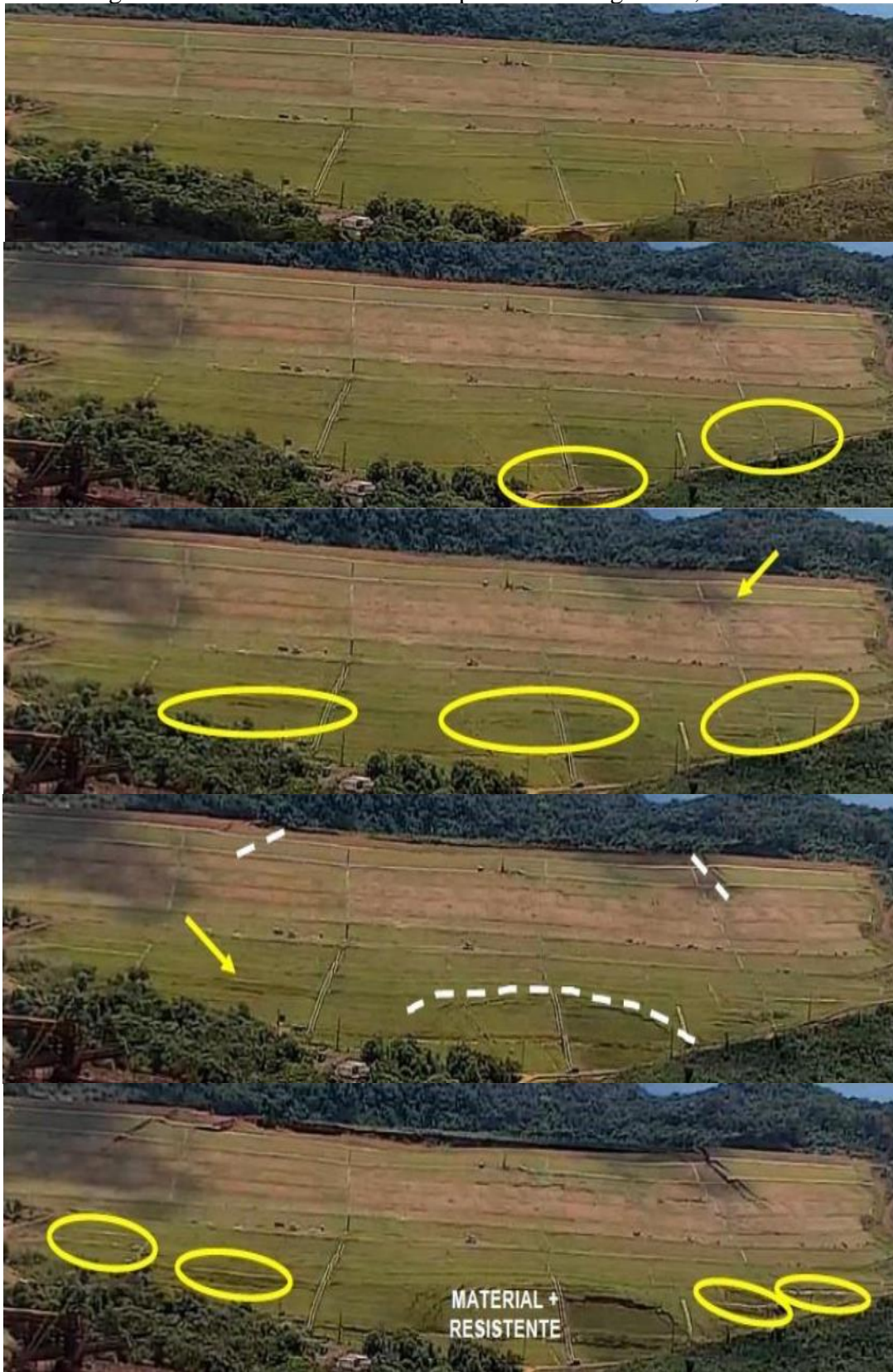
No dia 25 de janeiro de 2019, às 12:28:24s, foram percebidos os primeiros sinais de deformação da Barragem I. Como visto anteriormente, a barragem já vinha de um histórico de problemas de desenho, construção e drenagem que começaram a ser identificados já em 1993 (WMFT, 2019). A Figura 35, mostra o desenvolvimento da ruptura da Barragem B1, a partir de cortes de um vídeo divulgado pelo empreendedor.

De acordo com o MPMG (2019), conforme o vídeo divulgado do rompimento, enfatizado na Figura 35, o início e desenvolvimento do colapso pode ser percebido a partir dos seguintes sinais de deformações sofridos pelo barramento, na ruptura por liquefação:

1. Deformações iniciais correspondentes a pequenos trincamentos na porção inferior do maciço do lado esquerdo (Figura 34 a, b);
2. Novos trincamentos e enrugamento da superfície do talude (Figura 34 c, d);
3. Aumento do comprimento e abertura das trincas formadas (Figura 34 e, f);
4. Expulsão de água nos planos das trincas (Figura 34 e, f, g);
5. Projeção da parte superior do talude formando uma “bolha”, movimentando-se para frente, enquanto a base central da barragem continuou resistente (região do dique de partida e alteamentos envelopados) (Figura 34 e, f, g);
6. Formação de jorro d’água (chafariz) na porção inferior do talude de jusante (Figura 34 h, i, j);
7. Transformação do estado físico do material que compunha o maciço, passando do estado sólido para o estado líquido, proporcionando fluidez e mobilidade da massa (Figura 34 k, l, m);
8. Liberação de energia com magnitude suficiente para lançar a lama para jusante do vale com elevada velocidade (Figura 34 n, o).



Figura 34 - Desenvolvimento da ruptura da Barragem B1, em Brumadinho.



(a)

(b)

(c)

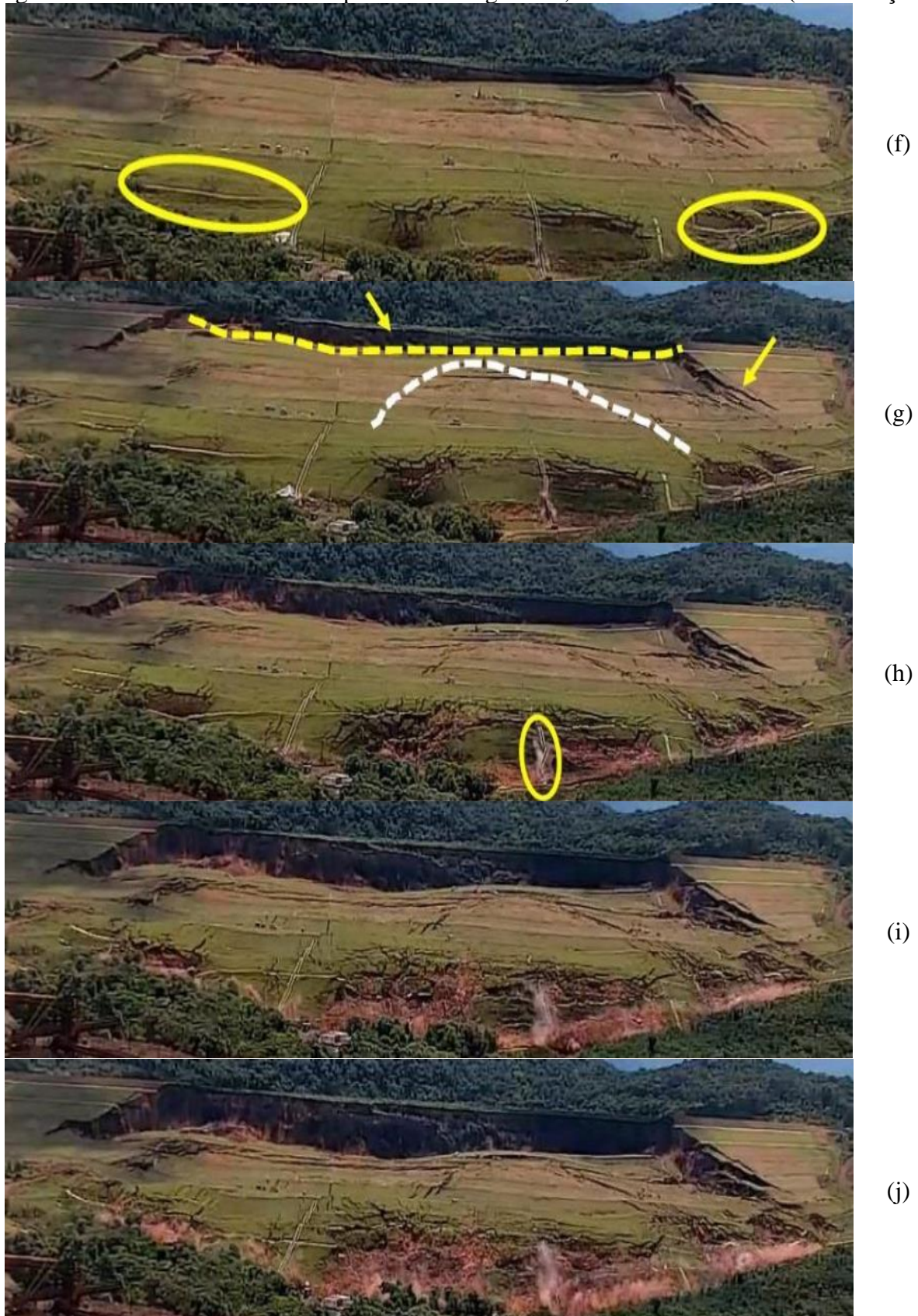
(d)

(e)

(Continua)



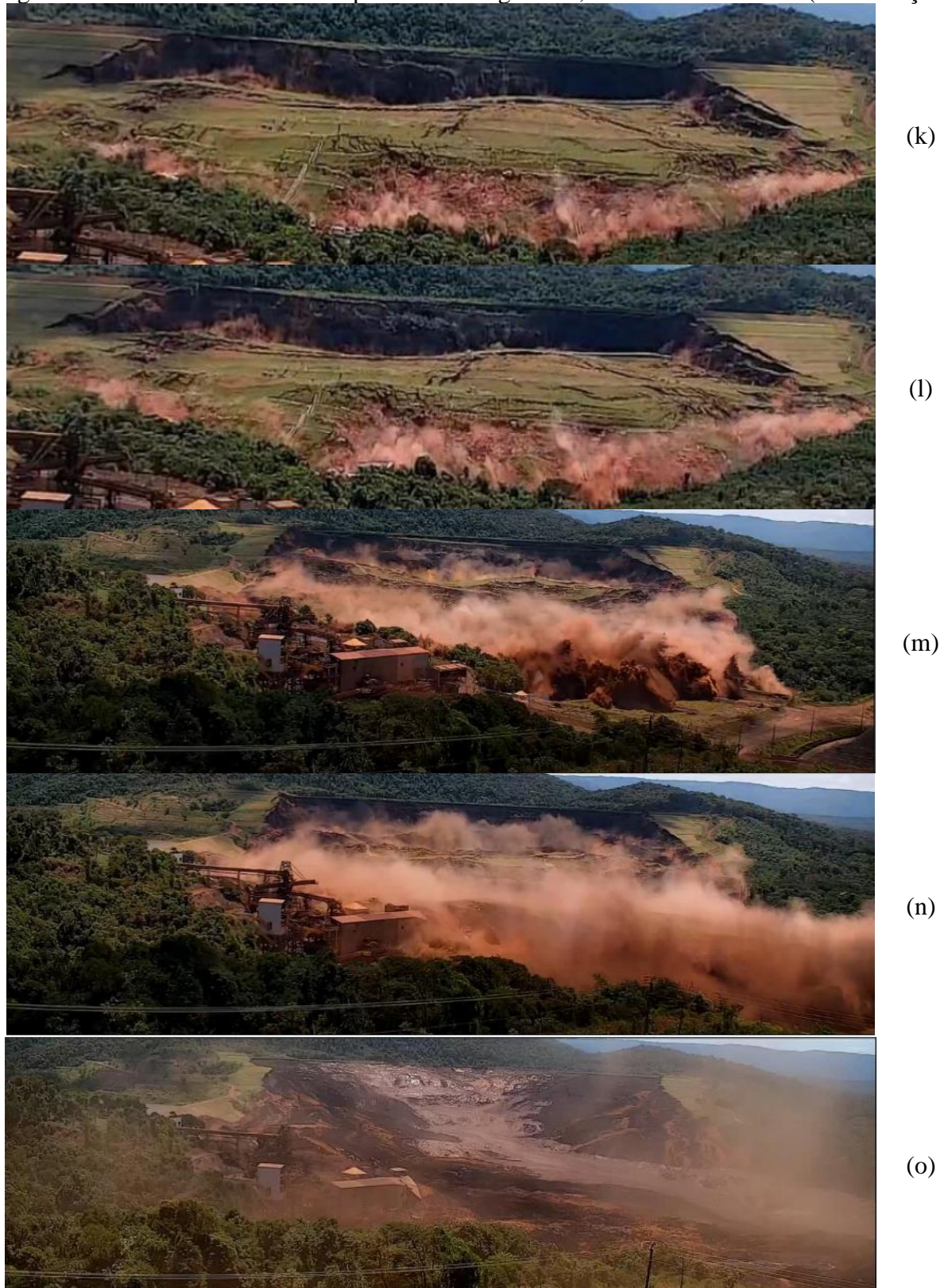
Figura 34 - Desenvolvimento da ruptura da Barragem B1, em Brumadinho. (Continuação)



(Continua)



Figura 34 - Desenvolvimento da ruptura da Barragem B1, em Brumadinho. (Continuação)



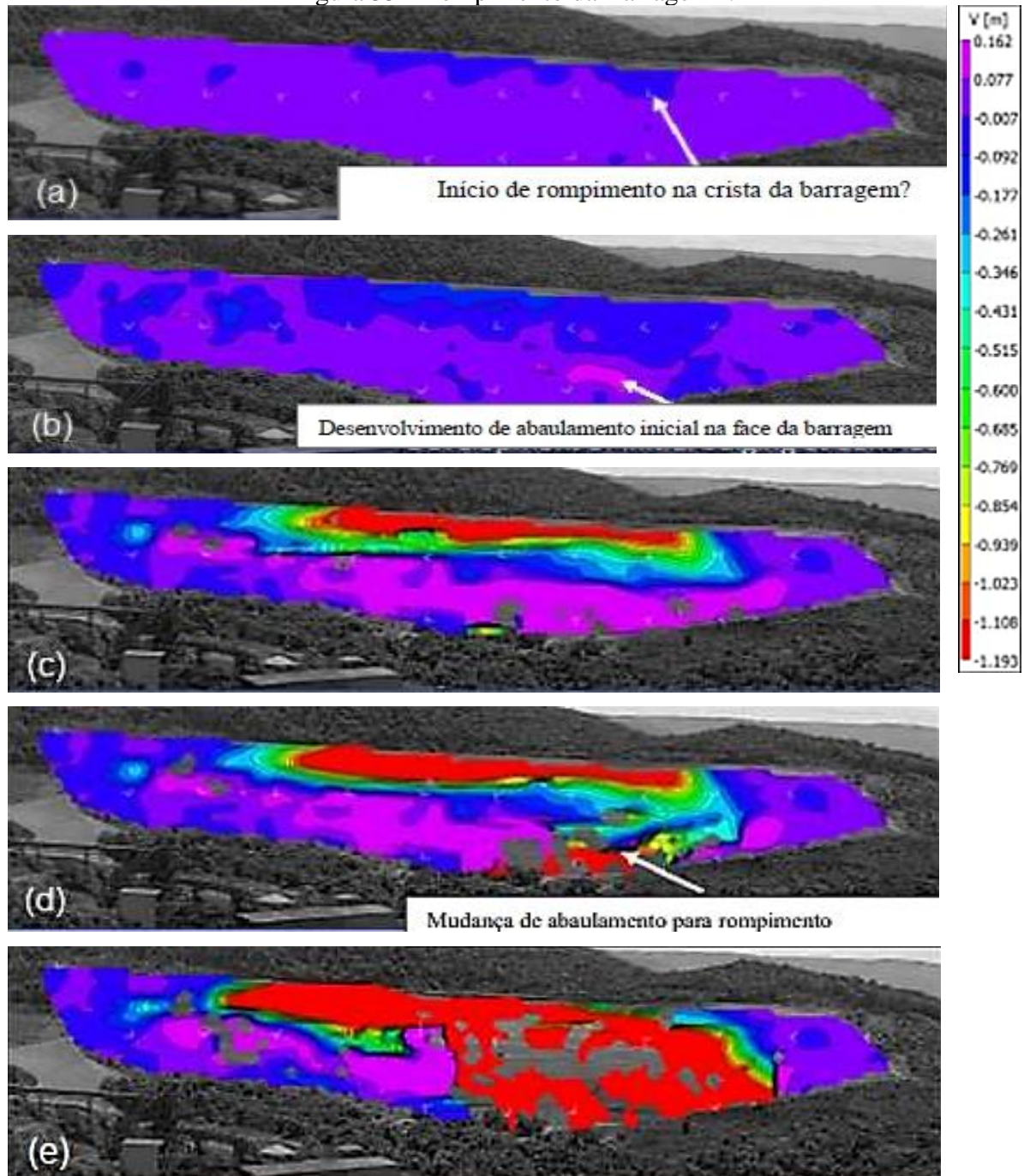
Fonte: Adaptado de Vale (2019) apud MPMG (2019).

Ao menos desde 2017, a Barragem I, apresentava situação intolerável de riscos geotécnicos, com FS abaixo do mínimo aceitável (tolerável) e Probabilidade de Falha acima do



máximo aceitável (tolerável), notadamente para os modos de falha (rompimento) de liquefação e erosão interna (ALMG, 2019). Robertson et al. (2019), mapearam em seu Painel de Especialistas, o vídeo do rompimento em seus 4 segundos iniciais, como visto na Figura 35.

Figura 35 - Rompimento da Barragem I.



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

Os autores relatam que em “a”, há uma iniciação da ruptura observada no centro da crista; em “b”, 0,2 s após a iniciação observada, há um abaulamento inicial da face; em “c” 1,4

s após a iniciação observada, a imagem mostra um escalonamento; em “d”, 2,4 s após a iniciação observada, há o colapso alargado da crista e o aumento do abaulamento da face; em “e” 2,6 s após a iniciação observada; vê-se quando a crista e o abaulamento se juntam em rompimento.

A análise mostra que, a crista do maciço parece se deformar para baixo, enquanto cresce um abaulamento no sopé da barragem, enquanto a crista cai verticalmente. Esta condição é similar à obtida com as leituras do radar na segunda dezena de dezembro de 2018 segundo TRTMG (2019), que mostraram uma inversão no sentido das deformações em alguns pontos, onde antes ocorria “estufamento”, passou a ocorrer “recalque”.

A Figura 36, faz uma evidente concordância entre algumas áreas identificadas pelo radar interferométrico como sendo as com maiores deformações e as áreas que realmente se deformaram no momento da ruptura da Barragem I. Em (a), constam os locais de observação de recalques dados pela leitura do radar em tempo antecedente ao rompimento, em (b), tem-se os locais de ruptura inicial do maciço em janeiro de 2019, que convergem com os dados do radar.

Figura 36 - Correlação dos recalques dados pelo radar, e áreas de foco da ruptura.



Fonte: MPMG (2019).

A B1 possuía, entre barramento e rejeitos armazenados, aproximadamente 11.600.000 m<sup>3</sup>. Grande parte desta massa de material desceu pelo vale do Ribeirão Ferro-Carvão e no seu

caminho encontrou as barragens de contenção de sedimentos B IV e B IV-A, que também se romperam (TRTMG, 2019).

O Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração (PAEBM) de B1 (WALM ENGENHARIA, 2018), foi criado com base nas premissas da Portaria nº 70.389 (ANM, 2017), que prevê o uso de sistemas de alerta para a população imediatamente a jusante da barragem e potencialmente afetada na Zona de Autossalvamento - ZAS (dada por 10 km a partir da barragem ou 30 minutos de chegada da onda de rejeitos), caso se declare Nível de Emergência 3 (ruptura eminente ou colapso em progresso), através de sirenes e outros mecanismos de alerta. Ocorreu que, dada a ruptura da barragem por liquefação, não houve tempo suficiente para acionamento do PAEBM e evacuação das pessoas na área administrativa e nas comunidades próximas.

Com a grande perda de vidas na tragédia de B1, foram editadas normas e leis para assegurar a não construção de estruturas na ZAS, e a retirada pelas empresas de áreas de trabalho já existentes nestes locais, como a alteração da NR-22 (Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração) através da Portaria nº 210 (SEPT, 2019), a Resolução nº 13 (ANM, 2019b) onde os empreendedores responsáveis por quaisquer barragens de mineração, ficam proibidos de conceber, construir, manter e operar, nas localidades inseridas na ZAS. A Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020), alterou a Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010), Política Nacional de Segurança de Barragens, a qual estende a vedação de implantação de barragem de mineração cujos estudos de cenários de ruptura identifiquem a existência de comunidade na ZAS, e o reassentamento da população caso a barragem já esteja em operação.

## **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As conclusões dos relatórios e laudos utilizados para esta revisão convergem em definir a ruptura em um evento que teve como possível causa a perda de resistência significativa dos rejeitos. São encontrados no caso da Barragem B1, segundo alguns relatórios, os três requisitos necessários para a liquefação estática: presença de um material contrátil e, portanto, susceptível à liquefação (de grande comportamento frágil em altas tensões cisalhantes), a condição de saturação da barragem (devido à problemas de drenagem), e o gatilho para a ocorrência.

Alguns dos autores indicam que a perda de resistência partiu de um lugar relativamente raso, que logo atingiu a crista da barragem colapsada de forma vertical até o sopé do talude, que age em abaulamento durante a queda da crista. Foi definida a hipótese de deformação lenta

dos rejeitos com o atingimento do pico de resistência na condição não drenada. A perda de resistência significativa e repentina indica que os materiais apresentavam comportamento frágil. A deformação lenta associada à ruptura frágil é observada nas filmagens liberadas e sugerem que o tempo para o completo rompimento da Barragem B1 foi de cerca de 10 segundos.

A condição de fragilidade dos rejeitos pode ser mostrada no ano de 2018, onde a coesão nos estudos apresentados caiu de 20 kPa para 16 kPa em um intervalo de poucos meses, justamente no solo residual constituído para a fundação da barragem, logo onde são mostradas alterações dos dados de radar e na ruptura inicial do maciço. A baixa coesão do material na ruptura é relatada por alguns autores, que mostram como a massa rompida se comportou como um líquido pesado logo após a ruptura do talude mostrando o estado de liquefação estática do material retido na barragem.

Na análise probabilística, já havia indicação do modo de falha mais provável para a Barragem I a liquefação com probabilidade de ruptura igual a  $3 \times 10^{-4}$ . Já na análise determinística, tomando como 1,0 o limite de resistência para a falha, assume-se que o FS = 1,05 é apenas 5% maior que o valor limite para a ruptura, um fator dificultador para zonas de mineração, e sobretudo, pela limitação de conhecimento da execução prévia da barragem.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

AGU – ADVOCACIA GERAL DA UNIÃO. **Autos do Processo n.º 5010709-36.2019.8.13.0024; Autos do Processo n.º 5026408-67.2019.8.13.0024; Autos do Processo n.º 5044954-73.2019.8.13.0024; Autos do Processo n.º 5087481-40.2019.8.13.0024**. Brasília, 2020. 120 p.

ALMG – ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS. **CPI da Barragem de Brumadinho**: Relatório Final. Belo Horizonte: ALMG, 2019. 350 p.

AMPLO ENGENHARIA. **Relatório de Impacto Ambiental**: Licenciamento Ambiental Corretivo - Obras Emergenciais Decorrentes da Ruptura da Barragem da Mina Córrego do Feijão e Recuperação Ambiental de Sua Área de Influência. Belo Horizonte. 2019. 101 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens: 2019**. Brasília, 2019. 69 p.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Parecer Técnico nº 07/2019** – GSBM/SPM/ANM-ESGJ/LHPR/LPN/WAN – Vistoria em Barragem de Mineração Vale S.A., Mina do Córrego do Feijão, Brumadinho/MG. Brasília: ANM, 2019a. 194 p.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 17 maio 2017.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, 08 ago. 2019b.

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

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, DF.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Relatório da Comissão Parlamentar de Inquérito**. Brasília: Câmara dos Deputados. 2019. 2287 p.

CARVALHO, Delton Winter. The Brumadinho Dam Rupture Disaster, Brazil 2019: Analysis of the Narratives About a Disaster from the Perspective of Disaster Law. **Revista de Estudos Constitucionais, Hermenêutica e Teoria do Direito**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 1-12, 18 jul. 2020. UNISINOS - Universidade do Vale do Rio Dos Sinos. <http://dx.doi.org/10.4013/rechtd.2020.122.04>.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Barragens de Rejeitos no Brasil**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 306 p.

CIAEA – COMISSÃO INDEPENDENTE DE ASSESSORAMENTO EXTRAORDINÁRIO DE APURAÇÃO. **Sumário Executivo do Relatório da Investigação Independente: Rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão – Brumadinho, MG**. 2019. 50 p.

CNDH - CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS. **Relatório da Missão Emergencial a Brumadinho/MG após Rompimento da Barragem da Vale S/A**. Brasília: CNDH, 2019. 27 p.

COLLAÇO, Bruno; ASSUMPÇÃO, Marcelo. Brumadinho Tailings Dam Failure Through the USP Seismological Center Perspective. In: Bianchi, Marcelo Belentani de *et al* (org.). **Reports from the 3rd Brazilian Seismology Symposium**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, 2019. p. 23-23.

GEOCONSULTORIA. **Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Mina Córrego do Feijão - Barragem B1**. 2016. 40 p.

KOPPE, Jair Carlos. Lessons Learned from the Two Major Tailings Dam Accidents in Brazil. **Mine Water And The Environment**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 166-173, 28 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>.

LIMA, Renato Eugenio de *et al*. An Anthropogenic Flow Type Gravitational Mass Movement: the Córrego do Feijão Tailings Dam Disaster, Brumadinho, Brazil. **Landslides**, [S.L.], v. 17, n. 12, p. 2895-2906, 23 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-020-01450-2>.

LUMBROSO, Darren *et al*. Modelling the Brumadinho Tailings Dam Failure, the Subsequent Loss of Life and How it Could Have Been Reduced. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 21-37, 7 jan. 2021. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-21-21-2021>.

MOGHADDAM, Reza; RIVEROS, Guillermo; FARHANGI, Siavash. A Finite Element Analysis of the Fundão Dam Failure. In: Geovirtual, 1., 2020, Ontario. **Anais [...]**. Vancouver: Geovirtual, 2020. p. 1-8.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Procedimento Investigatório Criminal n.º MPMG-0090.19.000013-4**. Belo Horizonte: MPMG, 2019. 477 p.



NEWMARK, N. M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. **Géotechnique**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 139-160, jun. 1965. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>.

PF – POLÍCIA FEDERAL. **Laudo nº 1070/2019 – SETEC/SR/PF/MG**. Belo Horizonte: PF, 2019. 207 p.

PIRETE, W.; GOMES, R.C. Tailings Liquefaction Analysis Using Strength Ratios and SPT/CPT Results. **Soils And Rocks**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 37-53, abr. 2013.

PORSANI, Jorge Luís; JESUS, Felipe Augusto Nascimento de; STANGARI, Marcelo Cesar. GPR Survey on an Iron Mining Area After the Collapse of the Tailings Dam I at the Córrego do Feijão Mine in Brumadinho-MG, Brazil. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 860, 10 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070860>.

POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA. **Cálculo do Risco Monetizado para Barragens e Diques: Barragem I - Relatório Técnico - Análise de Risco**. 2018a. 24 p.

POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA. **Cálculo do Risco Monetizado para Barragens e Diques: Barragem I - Relatório Técnico - Consolidação de Dados e Premissas**. 2018b. 199 p.

ROBERTSON, Peter K. *et al.* **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I**. Columbia: Expert Panel, 2019. 81 p.

ROTTA, Luiz Henrique Silva, et al. The 2019 Brumadinho Tailings Dam Collapse: Possible Cause and Impacts of the Worst Human and Environmental Disaster in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.L.], v. 90, p. 102119, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>.

SEMAD - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Parecer Único nº 0786757/2018 (SIAM)**. Belo Horizonte: SEMAD, 2018. 112 p.

SENADO FEDERAL. **Relatório da Comissão Parlamentar de Inquérito**. Brasília: Senado Federal, 2019. 400 p.

SEPT - SECRETARIA ESPECIAL DE PREVIDÊNCIA E TRABALHO. **Portaria nº 210, de 11 de abril de 2019. Altera a Norma Regulamentadora nº 22 (NR-22) - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília, DF, p. 1-1

SILVA, W. P. da. **Estudo do Potencial de Liquefação Estática de uma Barragem de Rejeito Alteada para Montante Aplicando a Metodologia de Olson (2001)**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

TRACTEBEL ENGIE. **Revisão Periódica de Segurança de Barragem: Mina Córrego do Feijão - Barragem I - Relatório Técnico**. Brumadinho. 2017. 75 p.

TRACTEBEL ENGIE. **Revisão Periódica de Segurança de Barragem:** Mina Córrego do Feijão - Barragem I - Relatório Técnico. Brumadinho. 2018. 77 p.

TRTMG – TRIBUNAL REGIONAL DO TRABALHO DE MINAS GERAIS. **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho:** Rompimento da Barragem BI da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019. Belo Horizonte: TRTMG, 2019. 240 p.

TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS. **Auditoria Técnica de Segurança da Barragem:** Mina Córrego do Feijão - Barragem I - Laudo Técnico. Brumadinho: TÜV SÜD, 2018a. 126 p.

TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS. **Revisão Periódica de Segurança de Barragem:** Mina Córrego do Feijão - Barragem I - Relatório Técnico. Brumadinho: TÜV SÜD, 2018b. 265 p.

WALM ENGENHARIA. **Plano de Ação de Emergência Para Barragens de Mineração – PAEBM:** Complexo Paraopeba – Mina do Córrego do Feijão – Barragem I. Brumadinho: WALM, 2018. 73 p.

WMTF – WORLD MINE TAILING FAILURES. **Brumadinho Engineering History.** Online, 2019. Disponível em: <https://worldminetailingsfailures.org/corrego-do-feijao-tailings-failure-1-25-2019/>. Acesso em: 09 mar. 2021.

## **ARTIGO 3 – HIDROGRAMAS DE RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO DOS MAIORES ACIDENTES DE BARRAGENS DO BRASIL**

### **1 INTRODUÇÃO**

As barragens de mineração têm a função de conter os rejeitos dos processos de extração e beneficiamento de minério (ANM, 2017), processo importante para a economia brasileira, embora controversas. As barragens são construções que apresentam risco de ruptura quando as diretrizes de segurança não são respeitadas.

Identificar os mecanismos que levam colapso de uma barragem é uma tarefa difícil, pois depende de fatores como tipo de falha e tipologia da barragem (FARIA et al., 2019). Uma falha por galgamento ou *overtopping*, por exemplo, ocorre a partir de um fluxo não considerado pelo projeto, extrapolando a capacidade do vertedouro da barragem. Lauriano et al. (2017), considera-o como falha hidráulica, onde verte água sobre a crista carregando parte do talude da barragem, instabilizando-o. Para a erosão interna ou *piping*, as causas são mais intrínsecas à estrutura do barramento, uma vez que tal falha recorre de fontes de infiltração e carregamento progressivo de partículas de solo, que removidas até a face de jusante do talude causam um processo erosivo no mesmo.

Casos recentes de ruptura no Brasil, em Fundão e Brumadinho, no entanto, tiveram como causa a liquefação devido à fatores diversos associados, como a deposição desordenada de rejeitos, e o método construtivo de alteamento a montante (CIAEA, 2020), que influenciaram na suscetibilização da massa de rejeitos para liquefação de forma estática. Segundo Li et al. (2018), o fenômeno se dá devido ao tamanho de partícula relativamente pequeno e alto teor de água, os materiais de rejeitos muitas vezes apresentam um alto risco de falha. Jin et al. (2018), consideram a liquefação um fenômeno de aumento na pressão dos poros sob carregamento [estático ou] dinâmico, acompanhado por uma diminuição na resistência ao cisalhamento, passível de causar grandes deslocamentos locais e levar à instabilidade. Para Jin et al. (2020), na prática de engenharia, os rejeitos arenosos têm maior probabilidade de sofrer liquefação quando há grande deformação devido à ação de uma carga vibratória ou sismo.

O fenômeno de liquefação para Liu, Zhao, Yan (2013) é uma das principais causas de ruptura de barragens, pela presença de solos não coesivos, saturados e em condições de carregamento não drenado, condições favorecidas, especialmente, quando os alteamentos são dispostos a montante (JIN et al., 2020).

O rompimento de uma barragem de reservatório de rejeitos envolve processos de desestabilização e colapso. A previsão de tais eventos envolve conhecimento de hidráulica, mecânica do solo, cinemática de sedimentos e outras disciplinas (TIAN *et al.*, 2021). A previsão de uma onda de inundação de uma ruptura de barragem em um vale a jusante geralmente requer a estimativa da forma da ruptura, o hidrograma de vazão e o tempo de deformação da ruptura (HAKIMZADEH; NOURANI; AMINI, 2014).

A simulação de rupturas por meio de estudos de “*Dam Break*”, ou ruptura hipotética, tem como papel principal prever as situações de risco e possíveis formas de alerta e mitigação dos impactos em barramentos. Tal estudo é integrante do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEMB estipulado pela Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010), consistindo em uma modelagem computacional que visa descrever como a onda de rejeitos se comportaria em caso de rompimento, e envolvem a estrutura da fundação (erodível ou não erodível), a coesão do material do aterro e o modo de falha.

É uma ferramenta fundamental para avaliar o comportamento das barragens e seus possíveis acidentes, tornando esse tipo de construção mais segura e auxiliando na confecção de leis mais eficazes. Atualmente, a Portaria 70.389 (ANM, 2017), determina a confecção do estudo de inundação para o pior cenário, apresentando potenciais impactos em caso de ruptura ou mau funcionamento da barragem, partindo em um primeiro momento da determinação da falha de ruptura, da geometria da abertura no barramento e do desenvolvimento da vazão de saída do reservatório. Devido à complexidade do processo de violação, a simulação desse processo é atualmente um desafio (HAKIMZADEH; NOURANI; AMINI, 2014).

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Falha nas Barragens do Fundão e B1**

A Barragem Fundão, era localizada no Município de Mariana, Minas Gerais, e pertencia ao Complexo Minerador de Germano, com dimensões de aproximadamente 500 m de comprimento e paredes principais de 110 m de altura (MURA *et al.*, 2018). Em 5 de novembro de 2015, rompeu-se e milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro foram lançados no rompimento da barragem de Fundão, em Minas Gerais, Brasil (SADREKARIMI; RIVEROS, 2020), por liquefação atingindo a Barragem de Santarém, que sofreu galgamento, mas não se rompeu. A onda de rejeitos advinda foi responsável por soterrar o distrito de Bento Rodrigues. O rompimento resultou em 19 vítimas fatais e mais de 600 famílias desabrigadas. Além do

impacto social, os dejetos oriundos do rompimento percorreram cerca de 663,2 km até a foz do Rio Doce no Oceano Atlântico (IBAMA, 2015).

Em 25 de janeiro de 2019, a barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão veio a colapso por liquefação estática, resultando em cerca de 270 vítimas fatais. Segundo Pereira et al. (2019), cerca de 297,28 hectares de terra foram soterrados pelos rejeitos, sendo 51% ocupadas por vegetação nativa, 19% por atividades antrópicas de alta circulação de pessoas e, 13%, constituídas por atividades agropecuárias.

## 2.2 Formação da Ruptura

Dois são os processos principais que são de grande importância ao simular a ruptura de uma barragem de aterro: a simulação da formação da ruptura e, posteriormente, o desenvolvimento do hidrograma de vazão da ruptura (TSAKIRIS; SPILIOTIS, 2012). Quando a barragem vem a colapso, o maciço sofre uma abertura definida como brecha de ruptura. Um dos principais desafios dos engenheiros geotécnicos é definir os parâmetros para a formação da brecha de ruptura, haja vista que se torna necessário modelos paramétricos e equações empíricas (CAMPOS et. al, 2018) baseados na física e aprimorados quanto à erosão de rompimento, para previsões confiáveis de vazão de rompimento (HAKIMZADEH; NOURANI; AMINI, 2014) como Froehlich (2008; 2015; 2016), Xu e Zhang (2009), Von Thun e Gillette (1990), MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Kirkpatrick (1977), Soil Conservation Service (1981) e U.S. Bureau of Reclamation (1988). São basicamente resumidos em equações empíricas e em modelos analíticos (FERREIRA; ANDRZEJEWSKI, 2015), com equações embasadas em observações históricas de rompimento. Tsakiris e Spiliotis (2012), ressaltam, porém, que as conclusões destes estudos foram derivadas de um pequeno número de eventos de falha ou de incidentes em condições muito diversas, devendo ser usadas com cautela.

Para definição de uma brecha de ruptura dada por liquefação, os métodos anteriormente descritos não são perfeitamente aplicados, pois neste tipo de ruptura há um colapso de toda a face do talude da estrutura, onde a brecha por *piping* e *overtopping* descritas se distinguem, pois há uma instabilidade devido ao modo de cisalhamento, anisotropia de estresse e falha progressiva (SADREKARIMI; RIVEROS, 2020). Por isso, usualmente são adotados como parâmetros da brecha por liquefação as dimensões totais do maciço, já que não existe uma brecha definida, conforme recomendado no Termo de Ajuste de Conduta (TAC) firmado pelo MPMG (2020) para estudos de *dam break*, visando o pior cenário para a estrutura.

### 2.3 Volumes Mobilizados

Quando se dá o movimento de ruptura de uma barragem de rejeitos, algum material ainda fica retido no local do maciço, sendo raros os casos onde há deslocamento total da massa contida. Como forma de expressar uma aproximação da realidade, alguns autores estudaram casos históricos de rompimentos e obtiveram médias dos volumes deslocados.

A Tabela 9 mostra uma relação entre os volumes estocados para o volume mobilizado, variando de 20 a 40% de acordo com o autor para o desprendimento de material, excetuando-se as condições críticas em que todo o material contido é mobilizado para o fluxo diante da reologia dos rejeitos.

Tabela 9 - Relação entre volumes armazenados e mobilizados segundo alguns autores.

REFERÊNCIA	CASOS ESTUDADOS	ALTURA DA BARRAGEM	% MOBILIZADA	
			Faixa	Média
Lúcia (1981)	11	15m a 46m	14% a 100%	40 %
USCOLD (1995)	16	20m a 61m	1% a 100%	29 %
Garga e Khan (1995)	19	-	3% a 100%	28 %
Azam e Li (2010)	72	-	-	20 %
Tailings.info (2015)	31	12m a 61m	1% a 100%	26 %

Fonte: A autora (2021).

O entendimento do volume desprendido também pode ser aferido por outro método amplamente utilizado na literatura técnica em Matos e Eleutério (2019), Mahdi, Shakibaeinia e Dibike (2020), Palu e Julien (2020), dado pela equação criada por Rico et al. (2008), em sua observação de dados históricos (EQUAÇÃO 01).

$$V_f = 0,354 \cdot V_t^{1,01} \quad (01)$$

Onde:

$V_f$  = volume total do rejeito escoado para jusante (m<sup>3</sup>);

$V_t$  = volume total armazenado (m<sup>3</sup>).

## 2.4 Hidrogramas da Ruptura

A partir da geometria da brecha, é possível obter o hidrograma de ruptura, parte integrante e inicial do estudo de *dam break*, para modelagem dos parâmetros da onda de rejeitos. Com o hidrograma, estima-se parâmetros como volume de rejeito escoado, tempo de chegada, e pico de descarga dos rejeitos.

Usualmente, são utilizados *softwares* para formação dos hidrogramas a partir das curvas de cota-volume das barragens, sendo comumente empregado o *software* livre Hec-HMS®, criado pela US Army Corps of Engineers (USACE, 2020). Para Souza (2017), o modelo simula os processos de translação dos hidrogramas nos elementos hidrológicos e hidráulicos que compõem bacias, como junções, sub-bacias, dentre outros.

O modo de falha adotado no *software*, pode assumir três inícios: (1) A ruptura começa quando o reservatório atinge uma elevação específica; (2) A ruptura começa quando o reservatório permanece igual ou acima da elevação especificada por um período de tempo; (3) A ruptura começa em um tempo especificado independente da elevação do reservatório (USACE, 2021). A progressão da ruptura pode assumir três métodos: (1) Linear: a ruptura cresce igualmente em profundidade e largura por todo o tempo; (2) Onda Senoidal: a ruptura cresce mais rápida no início e mais lenta conforme atinge o tamanho máximo; (3) Curva do usuário: a ruptura é especificada por um padrão de crescimento dado.

A formulação do escoamento dado na ruptura é tomada para USACE (2021), com início em um ponto dado, se expandindo de forma trapezoidal até atingir seu tamanho máximo para a elevação superior e inferior, largura inferior e declives laterais. O fluxo para erosão interna é modelado usando a Equação 02.

$$Q = K \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (02)$$

Onde:

$Q$  = Descarga no rompimento ( $m^3/s$ );

$K$  = Coeficiente da saída dado pelo usuário (geralmente 0,5 para *piping*);

$A$  = Área da seção transversal de saída, normal à direção do fluxo ( $m^2$ );

$H$  = Altura da água da superfície até o centro do ponto de *piping*;

$g$  = Constante gravitacional ( $m/s^2$ ).

Os dados de entrada servem, dentre outros objetivos, para indicar a elevação do ponto onde a falha começa a se formar, para o qual é administrado um coeficiente de modelação do fluxo ( $K$ ), e segundo USACE (2021), representa as perdas de energia à medida que a água se move através da brecha. ANA (2012) relata que o coeficiente de *piping* ou coeficiente de orifício, é comumente utilizado como 0,8; porém, no caso de simulações *dam break*, o valor 0,5 é usualmente adotado, para considerar perdas de carga da ruptura, auxiliando nos ajustes para a não majoração dos resultados.

No uso do Hec-HMS®, pela possibilidade do *software* em modelar para a falha por *piping* ou *overtopping*, supõe-se que pelos critérios adotados e refinados, a utilização do critério de rompimento por *piping* esteja mais aproximada da condição de liquefação do que o rompimento em *overtopping*. Esta suposição também é utilizada em outros trabalhos sobre *dam breaks* no Hec-HMS® como Matos e Eleutério (2019) e Machado, Saliba e Baptista (2018).

Os estudos numéricos existentes são limitados ao rompimento instantâneo de barragens [caso da liquefação], enquanto a maioria das falhas de barragens são causadas pela erosão gradual no corpo da barragem (TIAN *et al.*, 2021). O produto final de toda a análise feita é segundo Faria *et al.* (2019), uma representação gráfica da variação da vazão efluente da barragem no tempo, com a vazão de pico caracterizada no topo do hidrograma em um determinado instante.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Delimitação das Brechas de Ruptura

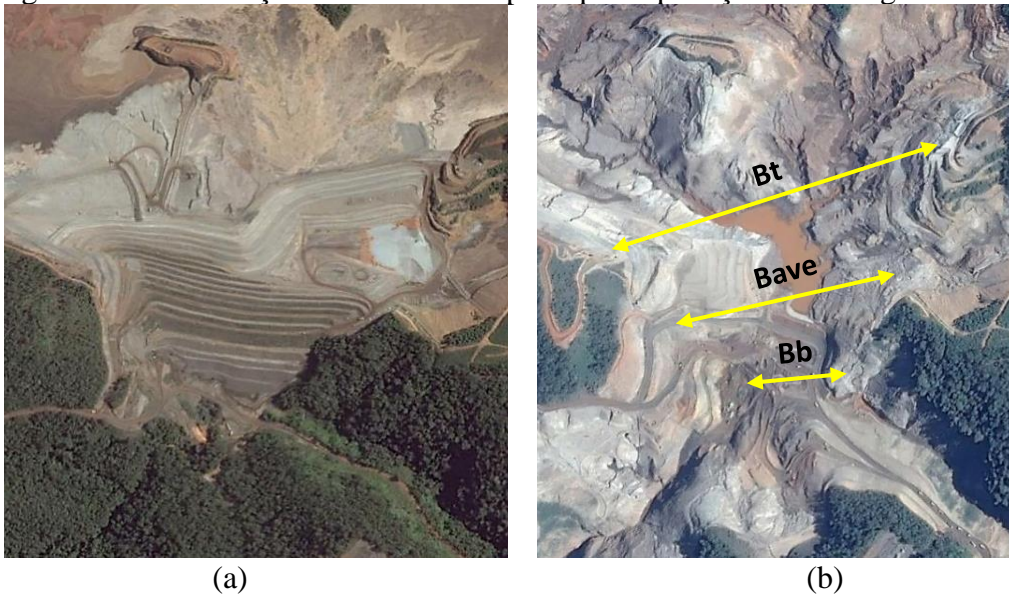
A ruptura por liquefação pressupõe uma condição específica, onde a sollicitação no maciço é superior à sua resistência ao cisalhamento. Pressupõe-se a consideração da mobilização de todo o barramento para formação da brecha de ruptura em caso de liquefação.

A Figura 37 mostra a concepção preliminar da brecha de ruptura da Barragem do Fundão em Mariana. Foi utilizado o *software* Google Earth® (2021), para delimitação das dimensões de largura de topo ( $B_t$ ), largura média ( $B_{ave}$ ), largura de base ( $B_b$ ), e a inclinação dos taludes esquerdo e direito formados (Z:1).

O método de delimitação da brecha de ruptura da Barragem B1, foi similar ao método de Fundão. Da mesma forma, a Figura 38 mostra a concepção da brecha de ruptura da Barragem B1 em Brumadinho, com base em imagens pós rompimento.

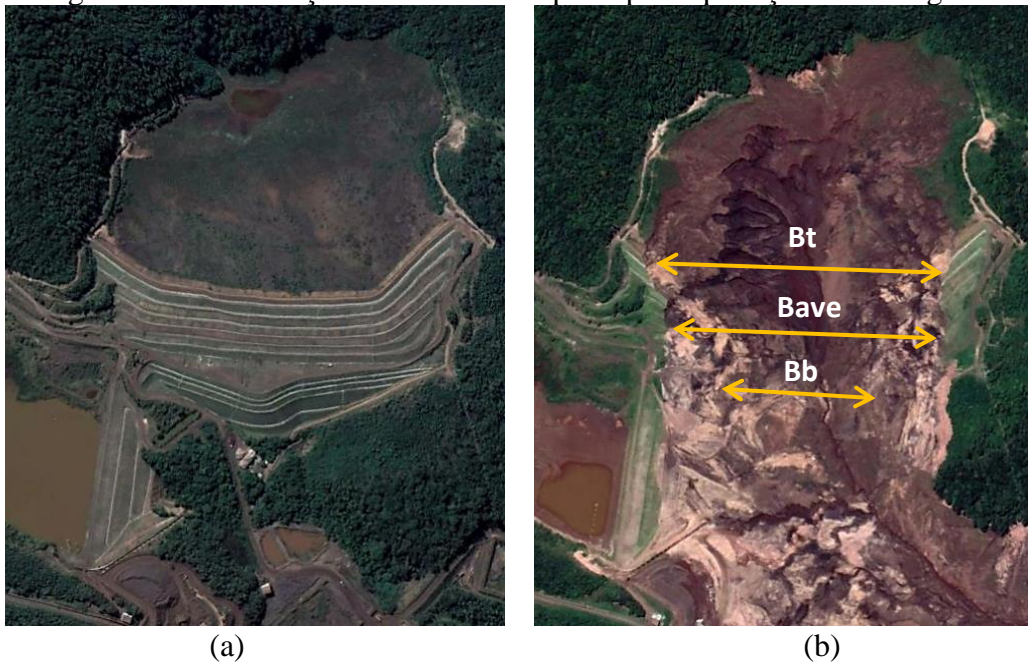


Figura 37 - Delimitação da brecha de ruptura por liquefação na Barragem do Fundão.



Fonte: Adaptado de Software Google Earth (2021).

Figura 38 - Delimitação da brecha de ruptura por liquefação na Barragem B1.



Fonte: Adaptado de Software Google Earth (2021).

Após a medição dos dados feita com auxílio da ferramenta “régua” do *software* Google Earth® para o imageamento de antes e depois dos rompimentos, obteve-se os parâmetros de geometria para as brechas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Geometria das brechas de ruptura.

GEOMETRIA DA BRECHA	UN	BARRAGEM	
		Fundão	B1
Largura de Topo (Bt)	m	700	540
Largura Média (Bave)	m	340	480
Largura de Base (Bb)	m	70	430
Razão da Inclinação Esquerda	H:V	0,28	0,45
Razão da Inclinação Direita	H:V	0,23	0,40

Fonte: A autora (2021).

A partir dos dados obtidos, empregou-se parte dos dados de entrada para evolução do hidrograma frente ao *dam break* no *software* Hec-HMS®.

### 3.2 Diagramas de Cota-Volume e Volume Mobilizado

Para a confecção dos hidrogramas de ruptura pelo HEC-HMS®, utilizou-se os parâmetros de cota-volume indicados para a Barragem do Fundão em Machado (2017), e para B1 em Tüv Süd Bureau de Projetos (2018). As barragens detinham 111,6 Mm<sup>3</sup> e 12,7 Mm<sup>3</sup>, respectivamente. Apesar de todo o conteúdo dado para a Barragem do Fundão, relatórios apresentam que havia um volume passível de liberação foi de 55 Mm<sup>3</sup> (DUTRA, 2018; PCMG, 2016).

Dentro dos valores, ainda foram utilizadas para aferição do volume mobilizado as taxas de 100% (para todo o volume desprendido); 40% (LUCIA, 1981); 29% (USCOLD, 1995); 28% (GARGA; KHAN, 1995); 20% (AZAM; LIU, 2010) e 26% (TAILINGS. INFO, 2015).

### 3.3 Geração dos Hidrogramas

Para a confecção dos hidrogramas de ruptura das Barragens do Fundão e B1, utilizou-se o modelo hidrológico paramétrico por meio do uso do *software* do *Hydrology Engineering Center* – HEC, intitulado *Hydrologic Modeling Systems* – HMS 4.7.1® (USACE, 2020).

Na criação do projeto, são inseridos dados conforme o objetivo da análise. Para compor o hidrograma de ruptura, toma-se como base os componentes hidrológicos da área de estudo: *Basin Models* (Modelo de Bacia), *Meteorologic Models* (Modelo Meteorológico), *Control Especifications* (Especificações de Controle – Tempo da Ruptura), *Time-Series Data* (Séries Temporais) e *Paired Data* (Cota-Volume do Reservatório).

Como dados de entrada no *software*, utilizou-se dados preconizados nos trabalhos de Machado (2017), referente à uma retroanálise da ruptura em Fundão, e o documental de Tüv Süd Bureau de Projetos (2018), referente à relatórios de segurança da Barragem B1. Deles, extraiu-se os parâmetros de dimensões das barragens (altura, cota da crista e sopé, dentre outros), que aliados aos dados de cota-volume e geometria da brecha, foram utilizados para formulação da simulação. Tanto para a Barragem de Fundão, quanto para B1, admitiu-se os mesmos critérios utilizados para o tempo de ruptura, iniciando às 15h30min e 12h28min respectivamente, sendo este o marco inicial do rompimento.

No módulo *Basin Models* após a inserção dos dados, é habilitado o item “*Dam Break*”, que dispõe uma aba onde são anexados os valores dados para o *Method* (Método de Ruptura), *Direction* (Direção do Fluxo), *Top Elevation*, *Bottom Elevation* (Cotas de Topo e Sopé da Barragem), *Bottom Width* (Largura de Base da Brecha de Ruptura), *Left Slope*, *Right Slope* (Inclinações Esquerda e Direita da Brecha de Ruptura), *Development Time* (Tempo de Desenvolvimento da Brecha), *Trigger Method* (Método de Ruptura), *Trigger Elevation* (Cota do Ponto de Ruptura) e *Progression Method* (Modo de Progressão da Ruptura).

Na função “*Dam Break*”, o *software* permite a configuração do momento inicial da falha baseado em uma das seguintes situações: atingimento de uma elevação específica (*elevation*); após um período de tempo em uma elevação específica ou acima dela (*duration at elevation*); ou ainda, em um momento específico ao longo do período simulado, independente da cota atingida no modelo (*specific time*). (USACE, 2021)

Ao iniciar a análise no módulo “*Run Compute*”, o *software* fornece os gráficos da queda da Elevação do Reservatório (m) *versus* Armazenamento (m<sup>3</sup>); e Elevação do Reservatório (m) *versus* Vazão de Saída (m<sup>3</sup>/s), incluindo a estimativa da vazão máxima alcançada, ou vazão de pico. Além destes dados, pode ser obtido o Hidrograma da Ruptura, que fornece em função do tempo de rompimento, uma tabela que discretiza o Decaimento do Armazenamento (m<sup>3</sup>), Perda de Elevação do Reservatório (m) e *Outflow* (m<sup>3</sup>/s).

Para composição dos dados, foram utilizadas as mesmas premissas para entrada no *software*, modificando apenas o diagrama cota-volume empregado, os valores utilizados, excetuando os de composição da brecha já mencionados são apresentados no Quadro 10.

Considerou-se nestas barragens a cota do gatilho, ou elevação do evento de abertura do talude de jusante, na maior proximidade possível do local de início das deformações. No caso de Mariana, foi considerada a elevação 900,0 m pela proximidade com a estrutura da ombreira esquerda, com tempo de ruptura de 60 segundos, e no caso de Brumadinho, a elevação 879 m

pela proximidade da deformação ocorrida no sopé do barramento evidenciada nos vídeos, e explicada por Robertson et al. (2019), para um tempo de ruptura de 40 segundos.

Quadro 10 - Valores utilizados para entrada no Hec-HMS®.

PARÂMETRO	BARRAGEM	
	Fundão	B1
Cota do topo	920 m	942 m
Cota do sopé	790 m	879 m
Método de gatilho	Elevação	Elevação
Cota do gatilho	900 m	890 m
Tempo de desenvolvimento	10 minutos	10 minutos
Método de progressão	Linear	Linear

Fonte: A autora (2021).

Uma vez obtido o hidrograma a partir dos dados, o pico de vazão através da brecha e o tempo crítico correspondente também são conhecidos (TSAKIRIS; SPILLOTIS, 2012).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os valores de cota-volume das barragens, foram aplicadas as taxas referentes à cada autor para o volume mobilizado para criação dos hidrogramas de ruptura referentes. A Tabela 11 mostra uma relação dos principais dados obtidos no Hec-HMS® 4.7.1, o volume mobilizado e o volume máximo de saída ( $v_{m\acute{a}x}$ ).

Além dos valores encontrados a partir das porcentagens mobilizadas dadas pelos autores, na equação proposta por Rico et al. (2008) o valor de rejeitos desprendidos do reservatório da Barragem do Fundão, para os 55 Mm<sup>3</sup> de rejeitos armazenados, é de 23.268.563,80 m<sup>3</sup>, ou 42,30% do volume total. Menor do que o preconizado por Morgenstern et al. (2016) em seu relatório, onde o autor fornece o desprendimento do material do reservatório para jusante em 32 Mm<sup>3</sup>. Este valor representa 61% do volume contido, o que de acordo com os autores é uma proporção anormalmente mais elevada em relação às estatísticas de falha de rejeitos da barragem. Machado et al. (2017) cita o relatório de Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute (2016), que também estima o valor em cerca de 32 Mm<sup>3</sup> de rejeitos e água, que representam aproximadamente 58%.

Tabela 11 - Resultados obtidos para os hidrogramas.

MÉTODO DE CONCEPÇÃO DO VOLUME MOBILIZADO	FUNDÃO		B1		
	%	Volume Mobilizado (m <sup>3</sup> )	V <sub>máx</sub> (Pico) (m <sup>3</sup> /s)	Volume Mobilizado (m <sup>3</sup> )	V <sub>máx</sub> (Pico) (m <sup>3</sup> /s)
V <sub>m</sub> = V <sub>t</sub>	100	55.000.000,00	36.367,60	12.700.000,00	59.538,3
Lucia et al (1981)	40	22.000.000,00	15.339,8	3.011.613,20	12.084,3
USCOLD (1995)	29	15.950.000,00	11.154,3	2.183.419,57	16.182,3
Garga & Khan (1995)	28	15.400.000,00	10.767,0	2.106.129,24	15.902,7
Azam e Liu (2010)	20	11.000.000,00	7.616,6	1.505.806,60	11.647,3
Tailings.Info (2015)	26	14.300.000,00	9.998,9	1.957.548,58	15.279,1

Fonte: A autora (2021).

Aplicando a B1 a equação de Rico et al. (2008), tem-se para os 12,7 Mm<sup>3</sup> de rejeitos armazenados, 5.294.744,65 m<sup>3</sup>, ou 41,69% do volume total. Neste caso, houve uma aproximação da porcentagem proposta por Lucia (1981), mas divergindo dos dados de Robertson et al. (2019), estipulam que 9,7 Mm<sup>3</sup> foram mobilizados, se tratando de 75,0% do volume total da barragem.

Amplo Engenharia (2020), concluiu uma mobilização maior, de 10,5 milhões m<sup>3</sup> quando somados além dos rejeitos, sedimentos e detritos, arrastados no caminho da lama. Minas Gerais (2021), obtiveram que dos 12,7 Mm<sup>3</sup>, cerca de 2 Mm<sup>3</sup> ficaram depositados na barragem.

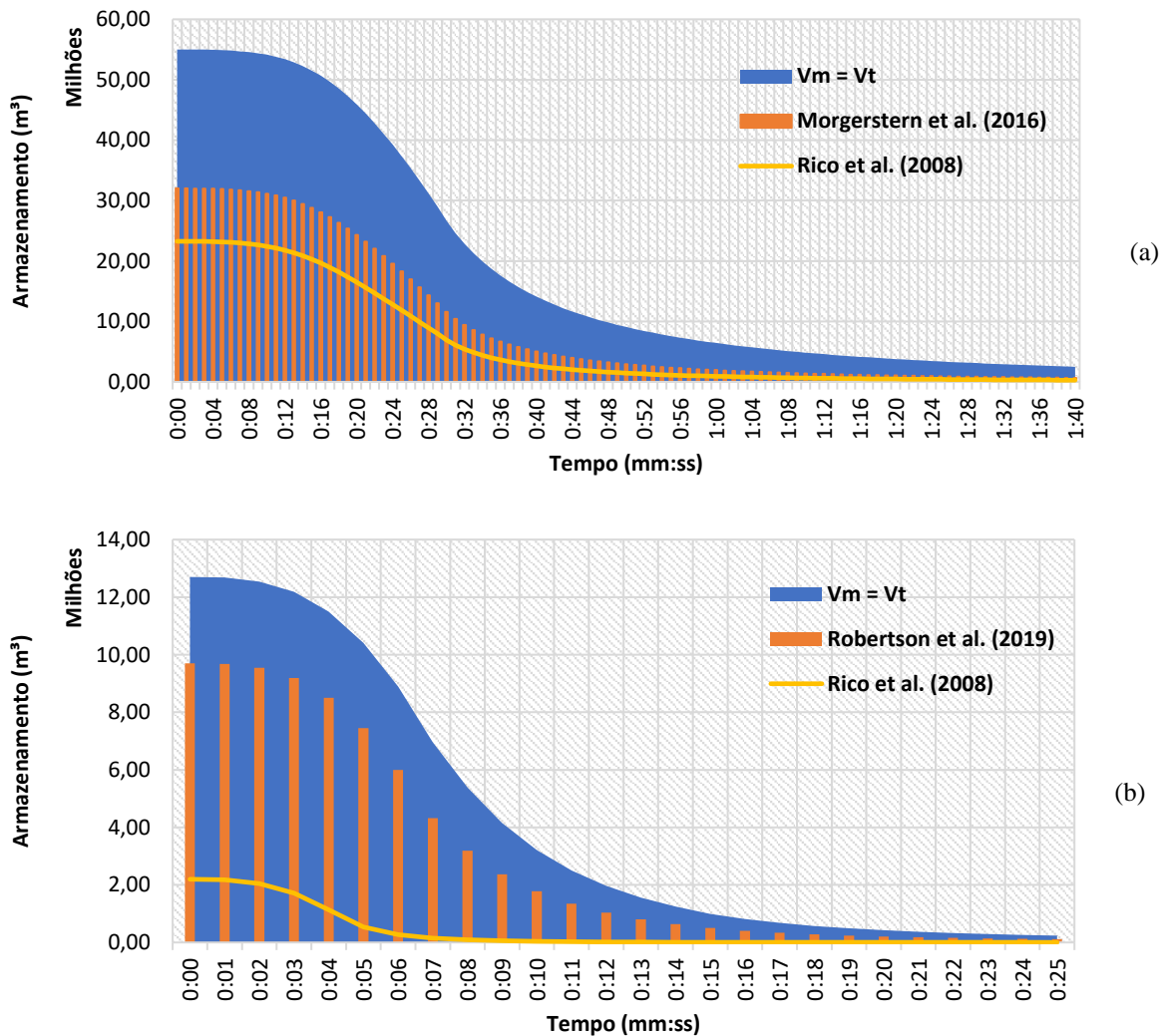
Os volumes mobilizados para Fundão de V<sub>m</sub> = V<sub>t</sub>, Rico et al (2008) e Morgerstern et al. (2016) foram utilizados para composição gráfica, e em B1, foram utilizados V<sub>m</sub> = V<sub>t</sub>, Rico et al. (2008) e Robertson et al. (2019). O decaimento do armazenamento em função do volume, foi dado pela Figura 39.

Nestes resultados, pode ser observado que os métodos descritos de consideração de volumes mobilizados entre 100% e o volume de 32 Mm<sup>3</sup> dado por Morgerstern et al. (2016), tem grande variação no decaimento do volume armazenado no reservatório. Assim como Rico et al. (2008), todos os métodos geraram hidrogramas com dispersão de volumes superiores à 01min40seg, mas com dispersão tendendo ao esvaziamento total. Esta situação é notável, uma vez que o desprendimento do material do reservatório é progressivo no tempo.

No caso de B1, observa-se um comportamento próximo dos 100% de volume considerado e dos dados 9,7 Mm<sup>3</sup> de Robertson et al. (2019). E assim como no caso de Rico et al (2008), tendem a continuar com o esvaziamento progressivo após 25 segundos.

O gráfico para B1 apresenta um desenvolvimento mais rápido para a dispersão do material, sendo dependente de um tempo menor para o rebaixamento de considerável volume. Esta condição pode ser explicada pelos dados inseridos da brecha destas barragens, uma vez que a barragem de Fundão apesar do maior volume de rejeitos contidos, teve uma abertura de brecha menos “permissiva” que B1.

Figura 39 - Decaimento do armazenamento em (a) Fundão e (b) B1.

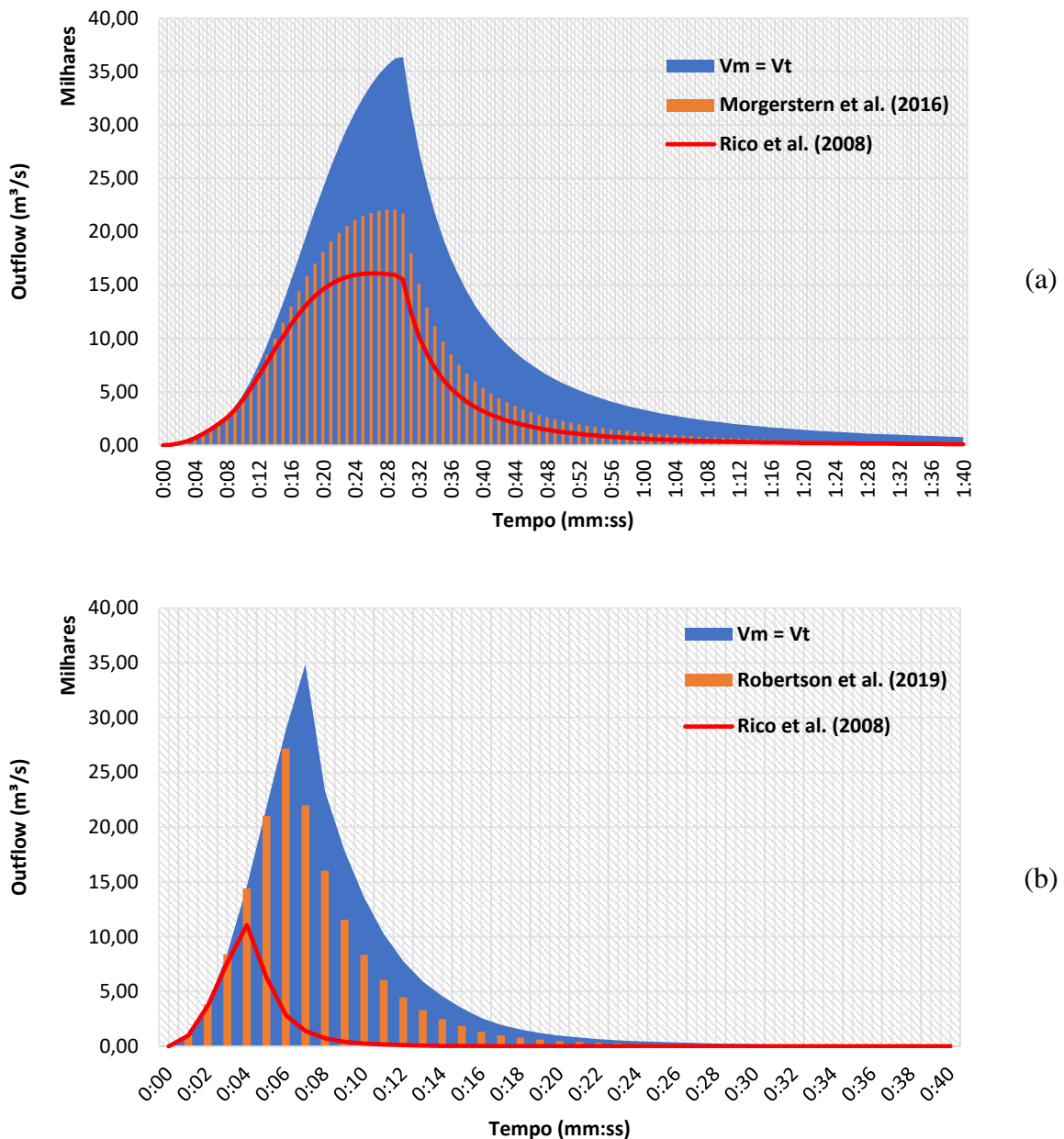


Fonte: A autora (2021).

Após a formação do volume mobilizado, houve a aferição da vazão máxima ou de pico na ruptura dos dois reservatórios para o mesmo volume desprendido (FIGURA 40).



Figura 40 - Vazão máxima na ruptura em (a) Fundão e em (b) B1.



Fonte: A autora (2021).

Pela modelagem, a vazão de pico em Fundão atingiu o valor de 36.367,60 m<sup>3</sup>/s considerando  $V_m = V_t$ , ou volume mobilizado igual ao volume total (100% de desprendimento) aos 30 segundos do evento. Como comparativo, os estudos de Matos e Eleutério (2019), encontraram no Hec-HMS® um valor para a vazão máxima de ruptura para Fundão, de 36.146,3 m<sup>3</sup>/s, que se aproxima muito dos dados resultantes desta metodologia, já Machado (2017) encontrou 33.284 m<sup>3</sup>/s. O volume encontrado para o valor mobilizado de Mongerstern et al. (2016), foi de 22.082,8 m<sup>3</sup>/s com pico aos 29 segundos, e ao considerar o volume mobilizado

dado por Rico et al. (2008), obteve-se o resultado de 16.091,8 m<sup>3</sup>/s aos 26 segundos, para 42,30% de volume mobilizado. Nos métodos estudados, excetuando-se o de consideração de despreendimento de 100% da massa de rejeitos, há uma estagnação de valores no topo da curva, o que deve ser referente à geometria da brecha que por ser mais limitada, no ponto máximo de saída, tende a manter uma vazão constante.

No caso de B1, a vazão de pico encontrada para  $V_m = V_t$  foi de 34.850,40 m<sup>3</sup>/s aos 7 segundos do rompimento, valor menor que o encontrado em Antonio et al. (2019), de 66.080,0 m<sup>3</sup>/s. Uma explicação para o fato é de que os autores utilizaram o método de hidrograma por decaimento parabólico, com tempo de pico de 35 segundos, diferente do método do Hec-HMS®, e do tempo de ruptura utilizado neste estudo de 40 segundos.

Para o valor de Robertson et al. (2019), obteve-se uma vazão de pico aos 6 segundos do início do rompimento de 27.178,9 m<sup>3</sup>/s, diferente do encontrado para 75% de volume mobilizado em Antonio et al. (2019), 49.560 m<sup>3</sup>/s. No volume mobilizado para porcentagem Rico et al. (2008) de 41,69%, encontrou-se o resultado de 17.068,5 m<sup>3</sup>/s, aos 4 segundos do rompimento.

Seguindo a modelagem, tem-se uma rápida vazão após o rompimento, evidenciando que há um descarregamento de volume muito alto em um curto período de tempo. Isso evidencia que levou cerca de segundos para que as áreas operacionais fossem atingidas pelo rejeito. Silva, Weerakoon e Herath (2014), contam que a precisão do método melhora com a adoção de intervalo de tempo de hora em hora, porém no caso da ruptura eminente pela liquefação, esta condição não pode ser alcançada.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao final deste estudo, observou-se que a utilização da brecha em função da geometria total do vale para os casos liquefação, atendeu aos requisitos gerando resultados próximos aos da literatura técnica.

Os resultados mostraram também que a menor quantidade de rejeitos acumulados em B1 se comparado à Fundão, não foram fator determinante para diminuição do potencial do hidrograma gerado. B1 era composta de uma geometria que favoreceu o escoamento rápido a partir da brecha de ruptura formada, e esta condição permitiu um escoamento do reservatório mais rápido, e promoveu um aumento das vazões de pico para B1 se comparadas às de Fundão, que tinha um volume maior de rejeitos.



Os resultados dos hidrogramas mostraram que a administração das condições de um rompimento rápido e de grande colapso do barramento como na liquefação, conduz a uma alta taxa de carregamento à jusante, principalmente quando considerada a condição frágil dos materiais liquefeitos.

Alguns métodos estudados para aferição da mobilização acabaram não obtendo grande correlação com o evento por terem maior afinidade com as rupturas por *piping* ou *overtopping*. A associação dos métodos ao Hidrograma por Decaimento Parabólico com a devida calibração, pode auxiliar no encontro da perda total e imediata do volume mobilizado no barramento, porém pode majorar os resultados como observado em comparação com alguns estudos sobre as barragens estudadas.

Entende-se que dentre os hidrogramas observados, a formulação com base em Morgerstern et al. (2016) e Robertson et al. (2019) são mais confiáveis, uma vez que as barragens não dispersaram todo seu conteúdo para aferir a utilização de  $V_m = V_t$ , e também não foram conservativas na retenção de material para utilizar o método de Rico et al. (2008).

## REFERÊNCIAS

AMPLO ENGENHARIA. **Relatório de Impacto Ambiental: Licenciamento Ambiental Corretivo - Obras Emergenciais Decorrentes da Ruptura da Barragem da Mina Córrego do Feijão e Recuperação Ambiental de Sua Área de Influência.** Belo Horizonte. 2019. 101 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **R06 - Estudos de Ruptura de Barragens: Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas.** Brasília: ANA, 2012. 114 p

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017.** Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 17 maio 2017.

ANTONIO, Gabriela Branquinho *et al.* Modelagem Preliminar da Ruptura da Barragem de Brumadinho/MG. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física e Aplicada, 18., 2019, Brasília. **Anais [...].** Fortaleza: SBGFA, 2019. p. 1-12.

AZAM, S. AND LI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. **Geotechnical News**, v. 28, n. 4, p. 50-54. 2010.

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

CAMPOS, R. G. D. et al. Modelagem Física para Determinação de Parâmetros de Brechas em Rupturas de Barragens em Cascata. 2018, Buenos Aires. **Anais.** XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires: IAHR, 2018. p. 1-2.

CIAEA – COMISSÃO INDEPENDENTE DE ASSESSORAMENTO EXTRAORDINÁRIO DE APURAÇÃO. **Sumário Executivo do Relatório da Investigação Independente: Rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão – Brumadinho, MG.** 2019. 50 p.

DUTRA, Pollyana Rocha Franco. **Análise dos Impactos Relacionados ao Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG com Ênfase em Recursos Hídricos.** 2018. 49 f. Monografia - Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

FARIA, Fábio L. F. *et al.* Metodologia para Obtenção do Hidrograma para Simulação de Ruptura de Barragens. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Resende - RJ, v. 36, n. 3, p. 31-37, 2019.

FERREIRA, Ana Luisa Moreira; ANDRZEJEWSKI, Edgar Alberti. Comparação de Métodos de Cálculo da Ruptura de uma Barragem Hipotética. In: Seminário Nacional De Grandes Barragens, 30., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015. p. 1-12.

FROEHLICH, D.C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**. v.134, n.12, p. 1708-1721. 2008.

FROEHLICH, D.C. Embankment Dam Breach Parameters Revisited. In: **Water Resources Engineering, ASCE**. p. 887-891. 1995.

FROEHLICH, D.C. Enhanced Predictions for Peak Outflow from Breached Embankment Dam. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 11, p. 04016041-1 - 04016041-15. 2016.

GARGA, V.K. AND KHAN, M.A. Review and Comparison of a Deterministic Model for Estimating Flow out Distance of Breached Tailings. **Report Submitted to Resources Canada**, Mining Research Laboratory. 1995.

GOOGLE EARTH. Cidades de Mariana e Brumadinho. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em 01 mai. 2021.

HAKIMZADEH, Habib; NOURANI, Vahid; AMINI, Alireza Babaeian. Genetic Programming Simulation of Dam Breach Hydrograph and Peak Outflow Discharge. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 757-768, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000849](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000849).

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Lauda Técnico Preliminar: Impactos Ambientais Decorrentes do Desastre Envolvendo o Rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília: IBAMA, 2015. 74 p.

JIN, Jiaxu *et al.* Experimental Study on the Liquefaction Characteristics of Tailing Sand Under Earthquake Action and Establishment of Flow Model. **Arabian Journal of Geosciences**, [S.L.], v. 13, n. 14, p. 1-18, jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-020-05533-1>.

JIN, Jiaxu *et al.* Variation of Pore Water Pressure in Tailing Sand under Dynamic Loading. **Shock And Vibration**, [S.L.], v. 2018, p. 1-13, 2018. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/1921057>.

KIRKPATRICK, G.W. Evaluation Guidelines for Spillway Adequacy: The Evaluation of Dam Safety. Engineering Foundation Conference, ASCE. **Anais**. New York, p. 395-414. 1977.

LAURIANO, André Wilhiam; ÁVILA, Joaquim Pimenta; CORTEZ, Joel; SILVA, Alexandre. Discussões Sobre os Modos de Falha e Risco de Galgamento de Barragens de Rejeitos. **Anais**. In: XXXI SNGB - Seminário Nacional De Grandes Barragens, 2017.

LI, W. *et al.* The Mechanics of a Silt-Sized Gold Tailing. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 241, p. 97-108, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.014>.

LIU, Y.; ZHAO, X. T.; YAN, H. X. Numerical Simulation of Static Liquefaction in Tailings Pond. **Advanced Materials Reserch**. v. 671-674, p. 76-79, 2013. Disponível em: <<http://www.scientific.net/AMR.671-674.76>>.

LUCIA, Chester Patrick. **Review of Experiences with Flow Failures of Tailings Dams and Waste Impoundments**. 1981. 228 f. Tese (Ph. D. in Engineering) – University of California, Berkeley, 1981

MACHADO, Nathália Couto. **Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Nathália Couto Machado, 2017.

MACHADO, Nathália Couto; SALIBA, Aloysio Portugal; BAPTISTA, Márcio Benedito. Modelagem Hidráulica Bidimensional de Fluidos Hiperconcentrados Estudo de Caso da Ruptura Da Barragem Do Fundão - Brasil. In: Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 28., 2018, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Buenos Aires: CLH, 2018. p. 1-2.

MACDONALD, T.C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching Characteristics of Dam Failures. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 110 n. 5, p. 567-586. 1984.

MAHDI, Abdellah; SHAKIBAEINIA, Ahmad; DIBIKE, Yonas B. Numerical Modelling of Oil-Sands Tailings Dam Breach Runout and Overland Flow. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 703, p. 134568, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134568>.

MATOS, Ana Clara de Sousa; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso. Modelagem Hidrodinâmica da Onda de Cheia Decorrente da Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: SBRH, 2019. p. 1-10.

MINAS GERAIS. **Histórico do Rompimento das Barragens da Vale S.A. em Brumadinho**. 2021. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/conteudo/pro-brumadinho/historico>. Acesso em: 08 jul. 2021.

MORGENSTERN, Norbert R.; et al. **Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**, 2016. 88 p.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. **ATA DE REUNIÃO - Ref: TAC Dam Break**. 2020. Disponível em: <https://mpmgbarragens.info/wp->

content/uploads/2020/04/20200107-Ata-de-Reunia%CC%83o-do-TAC-Dam-Break-Estruturas-da-Vale.pdf. Acesso em: 01 jul. 2021.

MURA, José *et al.* Monitoring the Vulnerability of the Dam and Dikes in Germano Iron Mining Area after the Collapse of the Tailings Dam of Fundão (Mariana-MG, Brazil) Using DInSAR Techniques with TerraSAR-X Data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 1507, 20 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10101507>.

PALU, Marcos C.; JULIEN, Pierre Y. Impact of Suspended Sediment Propagation After the Hypothetical Failure of Tailings Dams in the Doce River Basin. In: Encontro Nacional De Engenharia de Sedimentos, 14., 2020, Curitiba. **Anais [...]**. Campinas: ENES, 2020. p. 1-10.

PCMG - POLÍCIA CIVIL DE MINAS GERAIS. **Levantamento de Local onde Ocorreu Rompimento de Barragem**: Barragem de Fundão, da empresa Samarco S.A., Mariana/MG. Belo Horizonte: PCMG, 2016. 174 p.

PEREIRA, Luís Flávio *et al.* Impactos do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Brumadinho, Brasil: Uma Análise Baseada nas Mudanças de Cobertura da Terra. **Journal Of Environmental Analysis and Progress**. Pernambuco, p. 122-129. 19 fev. 2019.

RICO, M. *et al.* Reported Tailings Dam Failures. **Journal of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 152, n. 2, p. 846-852, abr. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>.

ROBERTSON, Peter K. *et al.* **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I**. Columbia: Expert Panel, 2019. 81 p.

SADREKARIMI, Abouzar; RIVEROS, Guillermo Alexander. Static Liquefaction Analysis of the Fundão Dam Failure. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 6431-6446, 8 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-020-01446-8>.

SILVA, M. M. G. T. de; WEERAKOON, S. B.; HERATH, Srikantha. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC-HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 800-806, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000846](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000846)

SOIL CONSERVATION SERVICE. **Simplified Dam-Breach Routing Procedure**: Technical Release. n. 66, 1981.

SOUZA, Tainah Christina Teixeira de. **Avaliação de Vazões Máximas Estimadas a Partir dos Modelos Hec-HMS E SWMM – Estudo de Caso para o Núcleo Urbano e Região Periurbana de Muniz Freire**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

TAILINGS INFO. **Tailings Related Accidents – Failures, Breaches and Mudflows**. 2015.

TSAKIRIS, George; SPILLOTIS, Mike. Dam- Breach Hydrograph Modelling: An Innovative Semi-Analytical Approach. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 1751-1762, 5 maio 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0046-9>.

TIAN, Zhong *et al.* Numerical Analysis of Sand Bed Degrading and Sediment Transport Rate Under Tailings Dam Break. **Frontiers In Earth Science**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-1, 14 jul. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/feart.2021.686277>.

TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS. **Revisão Periódica de Segurança de Barragem: Mina Córrego do Feijão - Barragem I - Relatório Técnico**. Brumadinho: TÜV SÜD, 2018. 265 p.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. **Downstream Hazard Classification Guidelines: ACER Tech. Memorandum n. 11**, Denver. 1988.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS 4.7.1**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS 4.7.1: Dam Break**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/modeling-reservoirs/dam-break>. Acesso em: 08. jul. 2021.

USCOLD – UNITED STATES COLD STORAGE Z. **Tailings Dam Incidents**. Denver, Colorado. 1995

VON THUN, J.L. GILLETTE, D.R. **Guidance on Breach Parameters**. Internal Memorandum, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver. 1990.

XU, Y. ZHANG, L.M. Breaching Parameters for Earth and Rock fill Dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 135, n.12, p.1957-1970. 2009.

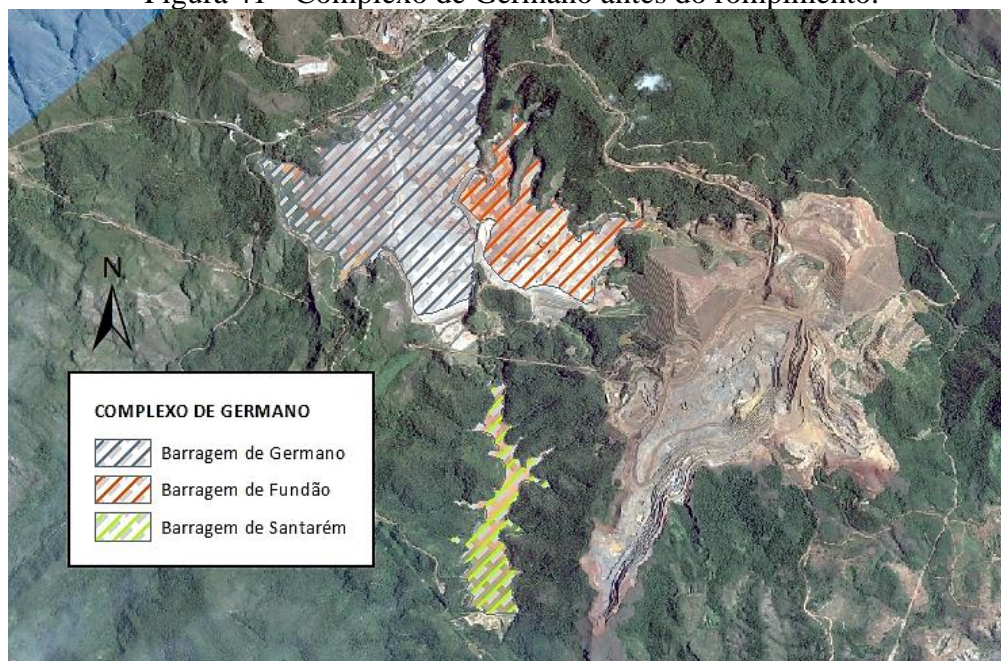
## ARTIGO 4 – ANÁLISE INVERSA DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM DO FUNDÃO DE MARIANA, MINAS GERAIS, BRASIL

### 1 INTRODUÇÃO

A barragem do Fundão localizava-se no Complexo Minerador de Germano, de extração de minério de ferro, no município de Mariana, Minas Gerais (MATOS; ELEUTÉRIO, 2019). Entrou em operação em 2008 e rompeu-se no dia 05 de novembro de 2015 e foi, sem dúvida, um grande marco na mineração a partir das suposições feitas e adotadas durante o projeto, construção e manutenção de reservatórios (MOGHADDAM; RIVEROS; FARHANGI, 2020).

O Complexo de Germano tinha em sua composição além da barragem do Fundão, as barragens de Germano e Santarém, esta última à jusante de Fundão (FIGURA 41).

Figura 41 - Complexo de Germano antes do rompimento.



Fonte: A Autora (2021).

Por volta das 15h30min, a barragem que possuía 110 metros de altura teve sua ombreira esquerda encoberta por uma nuvem de pó, e testemunhas oculares relataram a surgência de trincas em um tapete drenante recém construído (PRATA, 2019). A barragem foi construída por meio de alteamentos a montante com a utilização do próprio rejeito, oriundo do processo de beneficiamento do minério de ferro, segundo Machado (2017). Cerca de 32 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos foram lançados, totalizando cerca de 61% do conteúdo do depósito

(SADREKARIMI; RIVEROS, 2020). Machado, Saliba e Baptista (2018) ressaltam que o evento causou a perdas de 19 vidas e destruição de matas ciliares e áreas urbanas, afetando cerca de 680 km do sistema fluvial a jusante, chegando do Rio Doce ao mar (KOPPE, 2020).

Relatórios elaborados para investigação técnica das causas da ruptura, tais como MPMG (2016), PCMG (2016) e Morgenstern et al. (2016), convergem em entender que o rompimento da barragem do Fundão começou na ombreira esquerda por liquefação dos rejeitos armazenados, ressaltando o modo de alteamento da barragem a montante. Koppe (2020), leva em consideração para o rompimento, problemas na execução da drenagem e mudanças do projeto original que causaram um aumento na saturação. GDS (2016) comenta que foram apresentadas as condições necessárias para liquefação (rejeitos saturados e soltos, extrusão lateral das lamas e rejeitos de areia), tendo como gatilho, para Machado (2017), alguns tremores de terra próximos à ombreira esquerda da barragem. Morgenstern et al. (2016), descrevem o rompimento por liquefação como um fenômeno abrupto e completo, fazendo com que o rejeito se transformasse em um líquido de viscosidade e comportamento hidráulico apenas um pouco diferente do da água, em poucos segundos.

Com o rompimento, a lama percorreu o caminho a jusante até a barragem de Santarém, galgando-a, mas não rompendo-a. A bacia hidrográfica na qual estava localizada a barragem, é a do Rio Gualaxo do Norte, que converge em poucos quilômetros ao Rio do Carmo, e depois ao Rio Doce. De acordo com PCMG (2016), com o rompimento da barragem a corrida de lama prosseguiu, causando enorme destruição junto à vegetação ciliar e leito dos corpos hídricos e promoveu danos ambientais em chegando na foz do Rio Doce no estado do Espírito Santo. O relatório de Morgerstern et al. (2016), relata que 1,2 Mm<sup>3</sup> ficaram retidos na barragem, e o restante acabou chegando até o distrito de Bento Rodrigues, e seguiu até o mar pelo Rio Doce.

Foi observado ao longo do caminho percorrido pela onda de ruptura, uma mistura de rejeitos, solos, detritos vegetais e antrópicos, como pontes e construções, que foram se depositando ao longo das planícies de inundação, das margens e calhas dos cursos de água e seus tributários (MACHADO; SALIBA; BAPTISTA, 2018). O caso de Fundão representa um importante estudo para os geotécnicos, como fonte de dados úteis para o refinamento de avaliações de gatilho e, em geral, uma aplicação bem descrita de modelagem de deformação para realizar uma análise de gatilho (REID, 2019).

Dentro deste contexto, este estudo apresenta uma abordagem sobre o rompimento da barragem de Fundão por meio de uma retroanálise do rompimento por um estudo de *dam break*, induzido pelos dados e situações históricas narradas pelos vários relatórios e estudos sobre esta



ruptura, buscando aferir métodos e técnicas de domínio público para buscar a similaridade da macha de inundação obtida com a situação real do rompimento.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

No rompimento de uma barragem de rejeitos, a lama presente e seu poder de arraste se apresenta de uma forma mais complexa do que um fluido simples aquoso (fluido newtoniano). Transformou-se em um composto de detritos, rejeitos e destroços, que tornam o escoamento como um fluido não-newtoniano. Machado (2017) levanta para estes casos, a necessidade de uma avaliação quanto ao comportamento do escoamento do material resultante, no que tange aos fluxos hiperconcentrados, não-newtonianos.

Alguns modelos de simulação como FLO-2D®, FLDWAV®, RIVER FLOW 2D®, HEC-RAS® e DAMBRK®, têm as mais diversas abordagens sobre métodos de abordagem da simulação das machas de inundação provocada pelo escoamento deste tipo de fluido. O *software* HEC-RAS® segundo Paiva (2020) está presente em cerca de 70% dos Planos de Ação de Emergência - PAE observados em seu estudo para simular a propagação da onda de cheia. Além dos estudos de empresas de consultorias observados pelo autor, a literatura técnica contempla a utilização do *software* em estudos como os de Machado (2017), Lauriano (2009) e Rocha (2015). Dessa forma, a disponibilização gratuita deste *software* de forma livre, contribui para sua disseminação e avanços nas técnicas com os estudos mencionados.

### 2.1 Modelagem de Ruptura pelo Software HEC-RAS® 6.0

Muito utilizado pela literatura técnica (PAIVA, 2020), o HEC-RAS® até sua versão 5.0.7 realizava modelagem hidrodinâmica newtoniana unidimensional e bidimensional (de fluidos como a água) com escoamento não-permanente (Equação de Saint-Venant) dessa forma (MACHADO, 2017), avaliou que havia neste caso, a necessidade de ajuste nos parâmetros hidráulicos para simulação dos fluidos hiperconcentrados, ou não-newtonianos, como as lamas. Na versão beta HEC-RAS® 6.0 (USACE, 2020), há um *upgrade* para funcionamento de um módulo que aceita a modelagem de fluidos não newtonianos, em *debris* e *mud flow* (fluxo de detritos e lama) (GIBSON et al, 2021).

### 2.2 Escoamento de Fluidos Não-newtonianos

Para utilização de um modelo de simulação não-newtoniana, algumas propriedades do material contido devem ser atestadas. O conhecimento da reologia dos rejeitos garante uma modelagem mais fiel. Paiva (2020), enumera como parâmetros de interesse a relação água/sólidos que define o tipo de escoamento dado pela concentração volumétrica ( $C_v$ ) (QUADRO 11), para ser classificado como não newtoniano, o fluido deve ter  $C_v > 0,20$ .

Quadro 11 - Escoamento em função da Concentração Volumétrica ( $C_v$ ).

ESCOAMENTO	CV	DESCRIÇÃO
Escorregamento	0,53 a 0,90	Não há escoamento.
	0,50 a 0,53	Deformações internas e movimento lento devido às tensões.
Mudflow	0,48 a 0,50	Escoamento evidente, apesar de lento, com deformações plásticas sem espraiamento sobre as superfícies adjacentes.
	0,45 a 0,48	Início de espraiamentos, apesar da atuação de forças coesivas.
Mudflood	0,40 a 0,45	Mistura-se com facilidade, apresenta fluidez na deformação alastrando-se sobre superfícies horizontais. Durante movimento a superfície do fluido apresenta considerável declividade com aparecimento de ondas com dissipação rápida.
	0,35 a 0,40	Acentuada sedimentação, alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais. Há a identificação de duas fases (fase líquida aparece), as ondas se propagam por distâncias consideráveis.
	0,30 a 0,35	Separação de água na superfície, as ondas propagam-se com facilidade e há decantação de partículas granulares.
	0,20 a 0,30	Ação de ondas distinta com superfície fluida, onde todas as partículas foram decantadas.
Escoamento aquoso	< 0,20	Inundação provocada por propagação de onda no estado líquido com carga de sedimentos suspensos.

Fonte: Adaptado de O'Brien e Julien (1985) (Tradução livre).

Conforme apresentado no Quadro 11, os fluxos não-newtonianos são classificados em três categorias: corrida de lama – *mud flood*, lama plástica – *mudflow*, e os escorregamentos. Este método diferencia os materiais nestas classificações conforme a variação da viscosidade e da densidade pela concentração volumétrica.

### 2.3 Análise de Risco em Ruptura de Barragens

Os estudos de *dam break* ou ruptura hipotética pressupõem a obtenção de alguns dados referentes às prováveis situações de risco causadas pela onda de rejeitos proveniente do rompimento a partir da *Inundation Boundary* (Mancha de Inundação) gerada pelo *software*. Dentro dessa delimitação, é possível encontrar ainda, *Depth* (Profundidade do Fluxo); *Arrival Time* (Tempo de Chegada) que serve para delimitar a ZAS – Zona de Autossalvamento; *Velocity* (Velocidade do Fluxo); e *Depth versus Velocity*<sup>2</sup> (Risco Hidrodinâmico), que dá a capacidade de arraste do fluxo estudado, dentre outros.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Modelos Digitais de Elevação

A termos de comparação da fidelidade da mancha de inundação gerada em função da situação real do rompimento em 2015, utilizou-se como base para geração da mancha de inundação os MDE's – Modelos Digitais de Elevação gratuitos: SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* (INPE, 2011) com resolução espacial de 30,0 m, e o MDE *Alos Palsar* (ASF DATA SEARCH VERTEX, 2011) com resolução de 12,5 m.

### 3.2 Hidrograma de Ruptura

Tomando como base os estudos de Morgenstern et al. (2016), onde os autores citaram ter encontrado um volume mobilizado de 32 Mm<sup>3</sup> da barragem do Fundão para jusante, utilizou-se este valor como base para o hidrograma de ruptura, e o tempo de ruptura dado pelos autores por meio do relato das testemunhas para o relatório.

### 3.3 Modelagem da Mancha de Inundação

Ao inserir os MDE's no *software*, dentro do módulo “*Ras Mapper*”, foram criadas seções transversais em locais de interesse: (1) região imediatamente a jusante da barragem; (2) região a jusante da barragem de Santarém; e (3) região a montante do distrito de Bento Rodrigues. Estas seções foram consideradas em virtude da importância do conhecimento sobre estes locais, considerados Zonas de Autossalvamento – ZAS. Em “*Geometry Data*”, foram

alocadas as condições de controle das seções transversais como as *bank stations* (margens que delimitam o tipo de material da superfície para o escoamento), e os coeficientes de Manning atrelados à estas superfícies. Também neste módulo foram inseridas as zonas de *inflow* e *outflow* (zonas de entrada de fluxo e término da simulação), sendo o *inflow* a saída do reservatório de Fundão e o *outflow* marcado após o distrito de Bento Rodrigues, representando o final da ZAS.

Indicados os preceitos fundamentais do modelo, no módulo “*Unsteady Flow Data*” foram adicionados os parâmetros hidráulicos e hidrodinâmicos para o escoamento do fluxo. Utilizando o regime de escoamento não permanente, pressupôs-se que a velocidade e a pressão foram variantes ao longo do tempo em um mesmo ponto, e dele para outro. Foi feita a valoração do *inflow*, que teve como base o *flow hydrograph*, ou hidrograma de ruptura da barragem. Para o *outflow*, foi considerada a condição de *normal depth* (escoamento normal). Neste mesmo módulo, foram dadas as entradas de condição para o fluido não-newtoniano em “*Non-newtonians Methods and Parameters*”, considerando o fluido do tipo plástico de Bingham (não escoam a não ser que a tensão de cisalhamento seja excedida).

Na falta de alguns documentos técnicos sobre as auditorias e laudos de segurança de Fundão para o meio público, tomou-se como base as informações aferidas por Machado (2017) para a reologia dos rejeitos. Adotou-se uma concentração volumétrica não variável, constante ao longo do tempo de 47%, classificando-o como *mudflow* (lama plástica), de viscosidade ( $\eta$ ) de 0,0952 Pa-s, com tensão de escoamento ( $\tau\gamma$ ) de 20,0 Pa, e temperatura constante de 25°C. A rugosidade da superfície foi estipulada segundo o Coeficiente de Rugosidade de Manning ( $n$ ), que para Lauriano (2009), é usado para descrever a resistência do fluxo devido a rugosidade do canal. Optou-se para calibrar o modelo referente o Coeficiente de Rugosidade de Manning recomendado por Rocha (2015), entre 0,1, 0,2 e 0,3.

Com a inserção dos valores, e definidas as limitações do fluxo em tempo, seguiu-se ao botão “*Perform a unsteady flow simulation*” (Simulação de fluxo instável), que pediu a indução dos tempos de controle da simulação, e o intervalo de verificação dentro do intervalo de tempo. Foi utilizado o tempo de 15h30min às 17h00min do dia 05 de novembro de 2015, com intervalo de aferição no sistema de um minuto, e uma malha bidimensional de 10 x 10 metros.

O trecho simulado no Hec-RAS® 6.0, envolveu uma extensão definida respeitando os preceitos da Portaria nº 70.389 (ANM, 2017), que define a Zona de Autossalvamento (ZAS) preconizada como sendo a distância entre 30 minutos de tempo de chegada de onda ou 10 km do ponto de rompimento da barragem. Com a geração da simulação, utilizou-se o *software* ArcGis® 10.5 para configuração dos mapas finais.

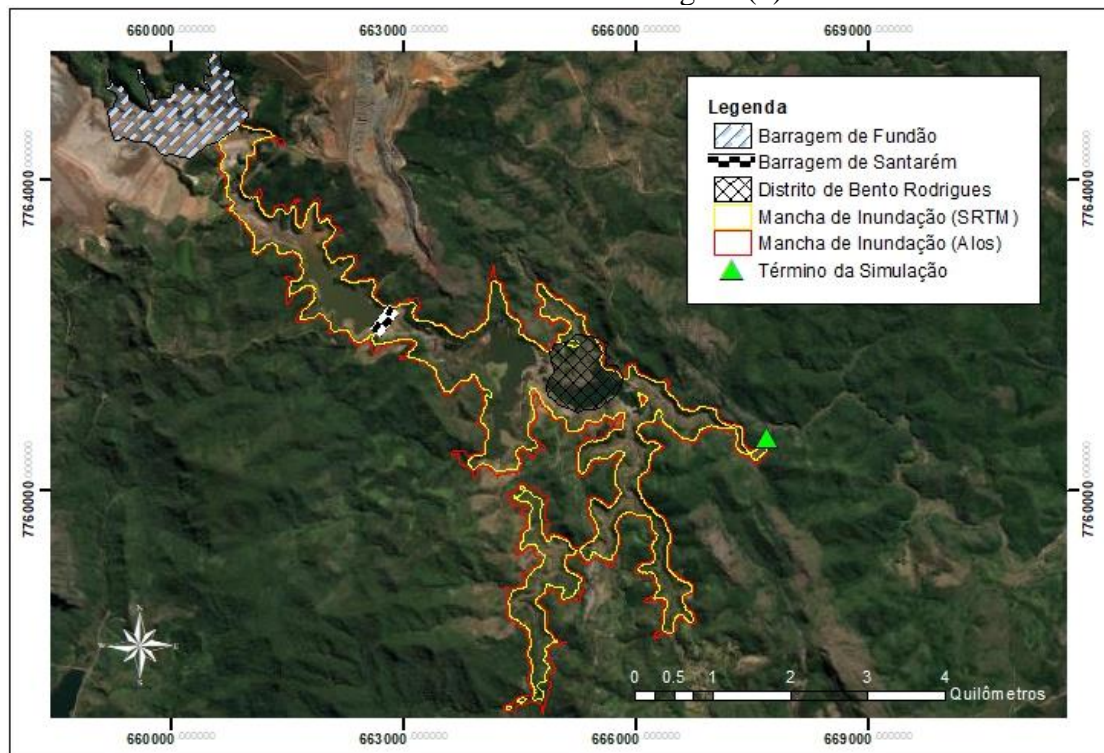
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Feitas as entradas no *software* HEC-RAS® 6.0, obteve-se dados que delimitaram a ZAS - Zona de Autossalvamento em cerca de 10 km do ponto de partida do rompimento. O coeficiente de Rugosidade adotado com a melhor calibração foi 0,1. O critério de parada foi dado pela confrontação com o Rio Gualaxo do Norte após o Distrito de Bento Rodrigues. Os resultados discutidos foram obtidos em pontos específicos de interesse, a partir das seções transversais traçadas já mencionadas.

### 4.1 Mancha de Inundação

A mancha de inundação foi composta para a retroanálise visando um cenário com a maior fidelidade possível à situação real. A Figura 42a mostra a delimitação das duas manchas de inundação propostas neste trabalho. A mancha obtida pela base SRTM apresentou dimensões menores em relação à base Alos Palsar, com as mesmas entradas em ambos os casos.

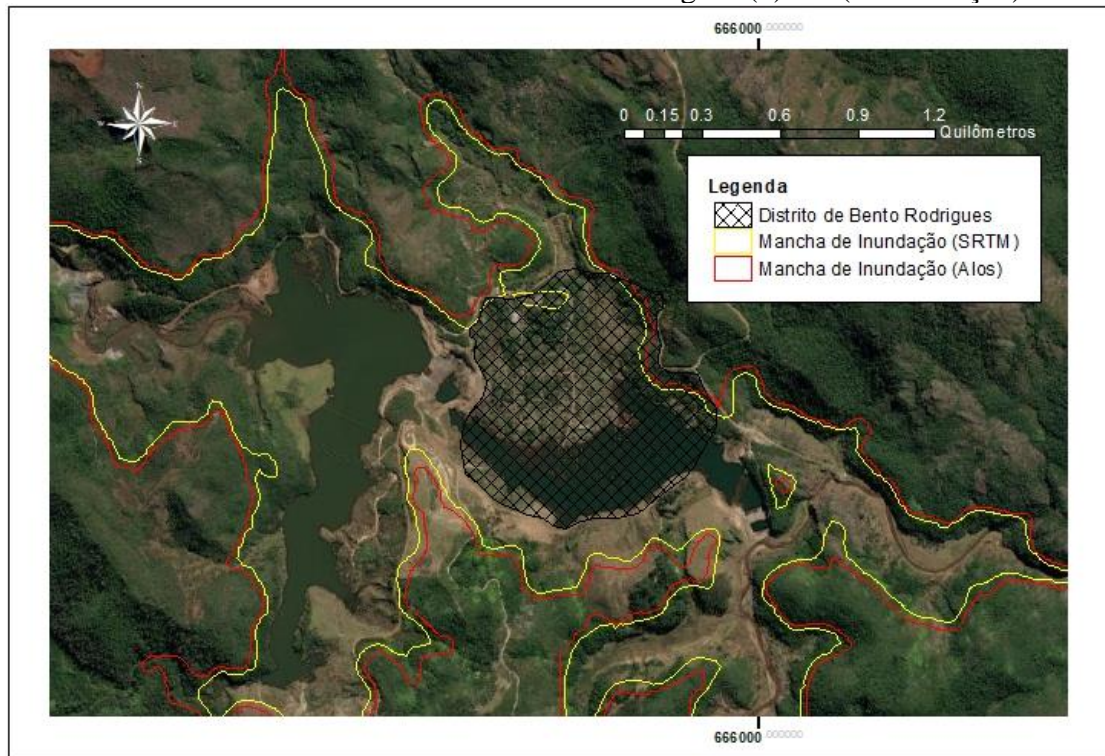
Figura 42 - Envoltória máxima de inundação por SRTM e Alos Palsar (a) e detalhamento em Bento Rodrigues (b).



(a)

(Continua)

Figura 42 - Envoltória máxima de inundação por SRTM e Alos Palsar (a) e detalhamento em Bento Rodrigues (b). (Continuação)



(b)

Fonte: A Autora (2021).

A menor precisão no primeiro caso, tendeu a minorar a abrangência da inundação, e também como era esperado, apresentou menor detalhamento em seções nas quais são exigidos maiores cuidados pela presença de vegetação. Por ser uma base retirada ainda nos anos 2000 e atualizada com o passar do tempo pelas agências EMBRAPA e INPE, a mudança da paisagem inerente ao tempo pode ter afetado a percepção.

O modelo Alos Palsar, do ano 2011, tem maior detalhamento a nível topográfico, porém majora a delimitação da mancha real em algumas situações, observadas em todos os mapas, pois os mesmos tomam como base a mancha gerada.

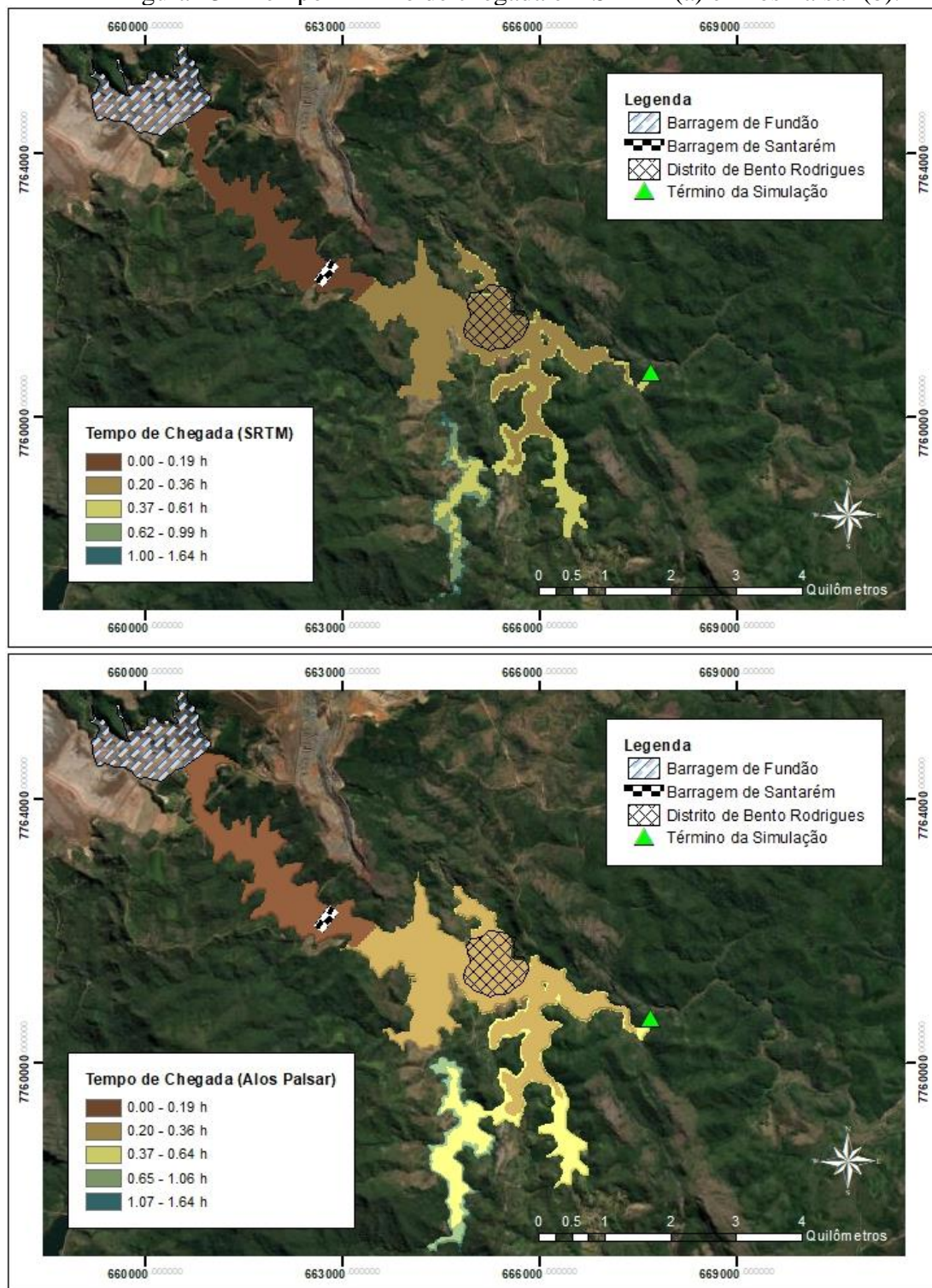
Para melhor visualização destas condições descritas, a Figura 43b mostra o detalhamento dos dois modelos gerados para o entorno de Bento Rodrigues, considerada a zona de maior impacto do rompimento, onde a base SRTM considerou melhor a delimitação da mancha real, inclusive para uma pequena área que se manteve isenta da inundação.

#### 4.2 Tempo de Chegada



O tempo entre a identificação da emergência e a chegada da onda de cheia nos locais habitados é o primeiro parâmetro para a classificação da área de risco (MOTA, 2017). Os modelos criados para o tempo de chegada estão na Figura 43.

Figura 43 - Tempo mínimo de chegada em SRTM (a) e Alos Palsar (b).



Fonte: A Autora (2021).

No relatório do MTPS (2016), há uma conclusão de que, em um intervalo de 07 (sete) segundos, foi possível verificar os primeiros sinais de deformações da ruptura e o desenvolvimento da ruptura em toda a largura da barragem.

As simulações feitas mostram que, no primeiro caso (SRTM), o tempo de chegada até a região a jusante da barragem de Santarém, foi de 9 minutos. No segundo caso (Alos Palsar), foi de 9,6 minutos. Ambos os casos convergem com Dieguez (2016), que relata a visualização da onda no vale com 10 minutos do rompimento.

A chegada da onda no distrito de Bento Rodrigues, foco de interesse para a ZAS, aconteceu aos 13 minutos do rompimento para SRTM e 13,8 minutos para Alos Palsar. Esta condição é interessante quando contrastada com os estudos de Matos e Eleutério (2019b), que observaram um amortecimento significativo uma vazão de pico no hidrograma criado à seção a montante de Bento Rodrigues aos 16 minutos do rompimento.

Também é possível observar um aumento do tempo de chegada após o perpasso pela barragem de Santarém, que contribuiu com a retenção de parte do material. O resultado até o final do trecho estudado converge com os estudos de Almeida, Saliba e Conde (2019) com o *software* HISTAV, obtendo em ambos os casos um tempo máximo de chegada até o final do trecho estudado de 30 minutos.

Ir de encontro às informações do tempo de chegada da onda é importante para a gestão de risco, para que sejam avaliadas as condições de aviso e planos de fuga das populações a jusante. Dessa forma, USBR (1999) apresenta uma relação entre o tempo de aviso para a população e a perda de vidas associada, com dados preocupantes para situações de risco com tempo menor que 1 hora, como o caso obtido (QUADRO 12).

Quadro 12 - Perda de vidas em função do tempo de aviso.

<b>TEMPO DE AVISO (min)</b>	<b>PERDA DE VIDAS</b>	<b>NÚMERO ESPERADO DE VÍTIMAS</b>
0 a 15	Significante	NEV= 50% no número de pessoas em risco
15 a 90	Potencialmente significante	NEV= (número de pessoas em risco) <sup>0,6</sup>
Mais de 90	Perda de vidas virtualmente eliminadas	NEV= 0.0002 x número de pessoas em risco

Fonte: Adaptado de USBR (1999).



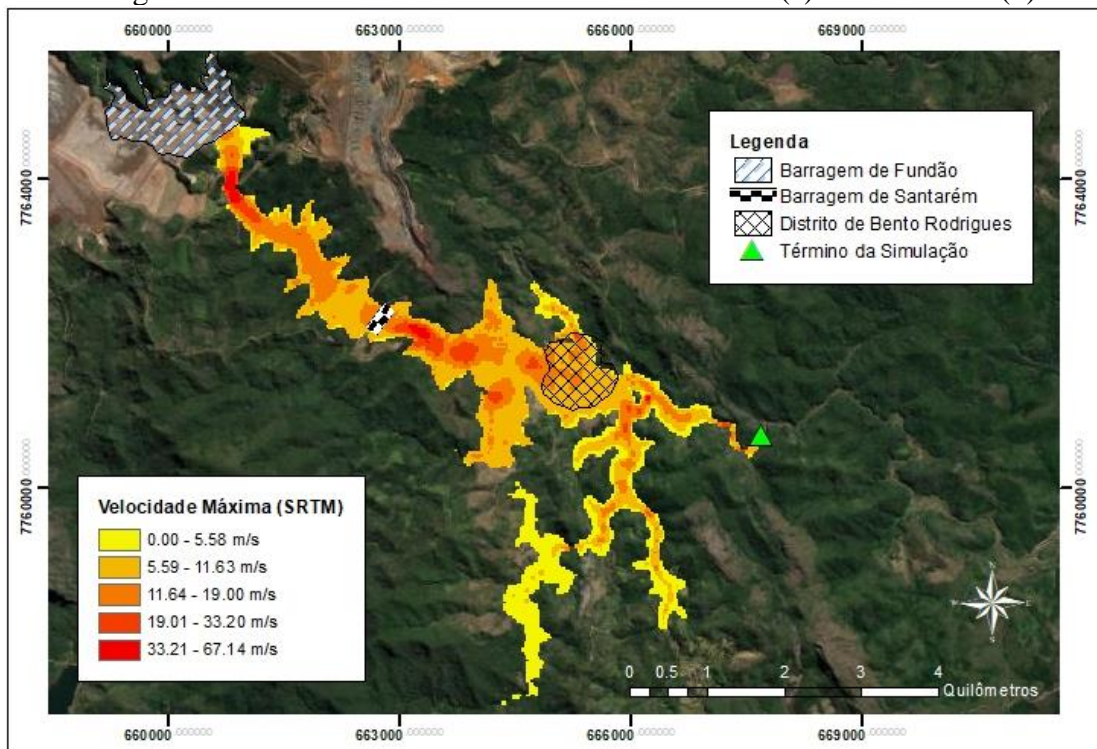
De forma geral, em ambas as simulações, observou-se que o tempo de chegada está sempre antes uma hora na maioria dos trechos. Nas seções habitadas o tempo mínimo indicado de chegada da onda é de 12 minutos.

Apesar da indicação dos dados de USBR (1999), suscitarem uma perda de vidas “significante” para este tempo, no caso deste rompimento, houve uma possibilidade de aviso dos próprios trabalhadores da barragem para que os moradores saíssem de suas residências antes da chegada, o que reduziu o número de mortes (DIEGUEZ, 2016). É notável também pelo mapeamento gerado, que o perpasso da lama pela Barragem de Santarém ocasionou um atraso da chegada da lama à jusante para Bento Rodrigues. Além desta questão, no momento da ruptura grande parte dos moradores estavam em horário de trabalho, portanto, fora da zona residencial atingida. O número de mortes ficou em certa parte mais restrito aos trabalhadores que estavam no entorno da barragem no momento do rompimento.

### 4.3 Velocidade do Fluxo

A velocidade de chegada do fluxo, fator importante para entendimento da periculosidade do mesmo, foi formulada para os dois modelos (FIGURA 44).

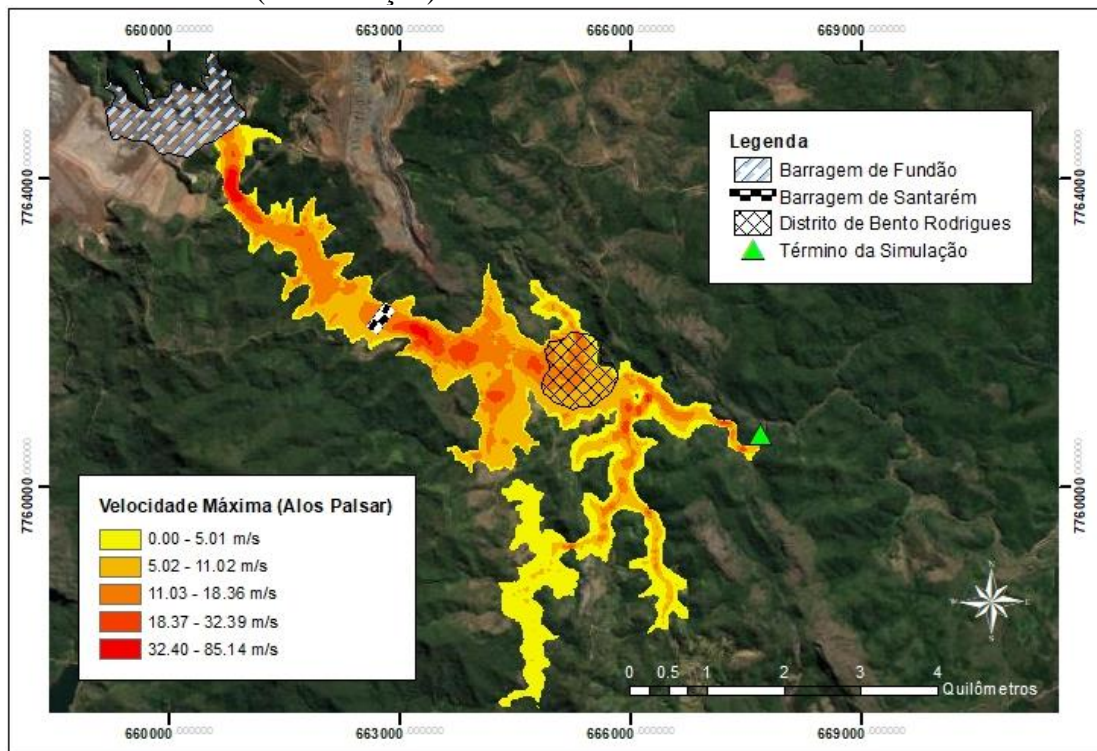
Figura 44 - Velocidade máxima do fluxo em SRTM (a) e Alos Palsar (b).



(a)

(Continua)

Figura 44 - Velocidade máxima do fluxo em SRTM (a) e Alos Palsar (b).  
(Continuação).



(b)

Fonte: A Autora (2021).

Utilizando o volume mobilizado de Morgenstern et al. (2016) e o modelo SRTM, obteve-se a velocidade na saída da barragem de 11,15 m/s (40 km/h) e na chegada em Bento Rodrigues de 5,58 m/s (20,08 km/h). No modelo Alos Palsar obteve-se uma velocidade de 11,44 m/s a montante da barragem e 10,95 m/s a montante de Bento Rodrigues. Matos e Eleutério (2019) com o modelo Alos Palsar, obtiveram velocidades de até 111 m/s, na região próxima à barragem com a metodologia de volume mobilizado de Rico et al. (2008).

De forma geral, os valores de velocidade do fluxo na altura da barragem encontrados neste estudo, convergem para o encontrado por Morgenstern et al. (2016), onde o deslizamento fluido estava se movimentando a cerca de 11 m/s no momento em que a lama chegou à correia transportadora no corpo da barragem.

Viseu (2006), estabeleceu uma tabela para estipular o nível de perigo em uma inundação em função da velocidade do fluxo (TABELA 12). Com base na aplicação dos dados nesta classificação, pode-se observar que em ambos os casos, a velocidade maior que 5,5 m/s está presente na maior parte do mapeamento, sobretudo no modelo SRTM. Logo, estipula-se o poder destruidor “antecipado” pelo modelo, e aferido na situação real de devastação encontrada.

Tabela 12 - Nível de perigo para edificações em função da velocidade do fluxo.

NÍVEL	CLASSE	VELOCIDADE (V)
Reduzido	Verde	$V < 2$ m/s
Médio	Amarela	$2 < V < 4$ m/s
Importante	Laranja	$4 < V < 5,5$ m/s
Muito importante	Vermelha	$V > 5,5$ m/s

Fonte: Adaptado de Viseu (2006).

Além disso, é possível observar que na região a jusante da barragem de Santarém, houve um aumento abrupto da velocidade. Na data do ocorrido, a chegada da lama na barragem de Santarém, expulsou parte da água contida e se incorporou no volume escoado. De acordo com PCMG (2016), esta situação maior liquefação da lama, passando tal material a escoar com maior velocidade para jusante, devido à elevação de seu índice de saturação em água e consequente redução de atrito junto ao terreno. Na saída da barragem de Santarém, o modelo formado passa de 8,80 m/s para 16,43 m/s (59,14 km/h) em SRTM, e passa de 10,51 m/s para 19,32 m/s (69,55 km/h) em Alos Palsar.

#### 4.4 Profundidade Máxima da Inundação

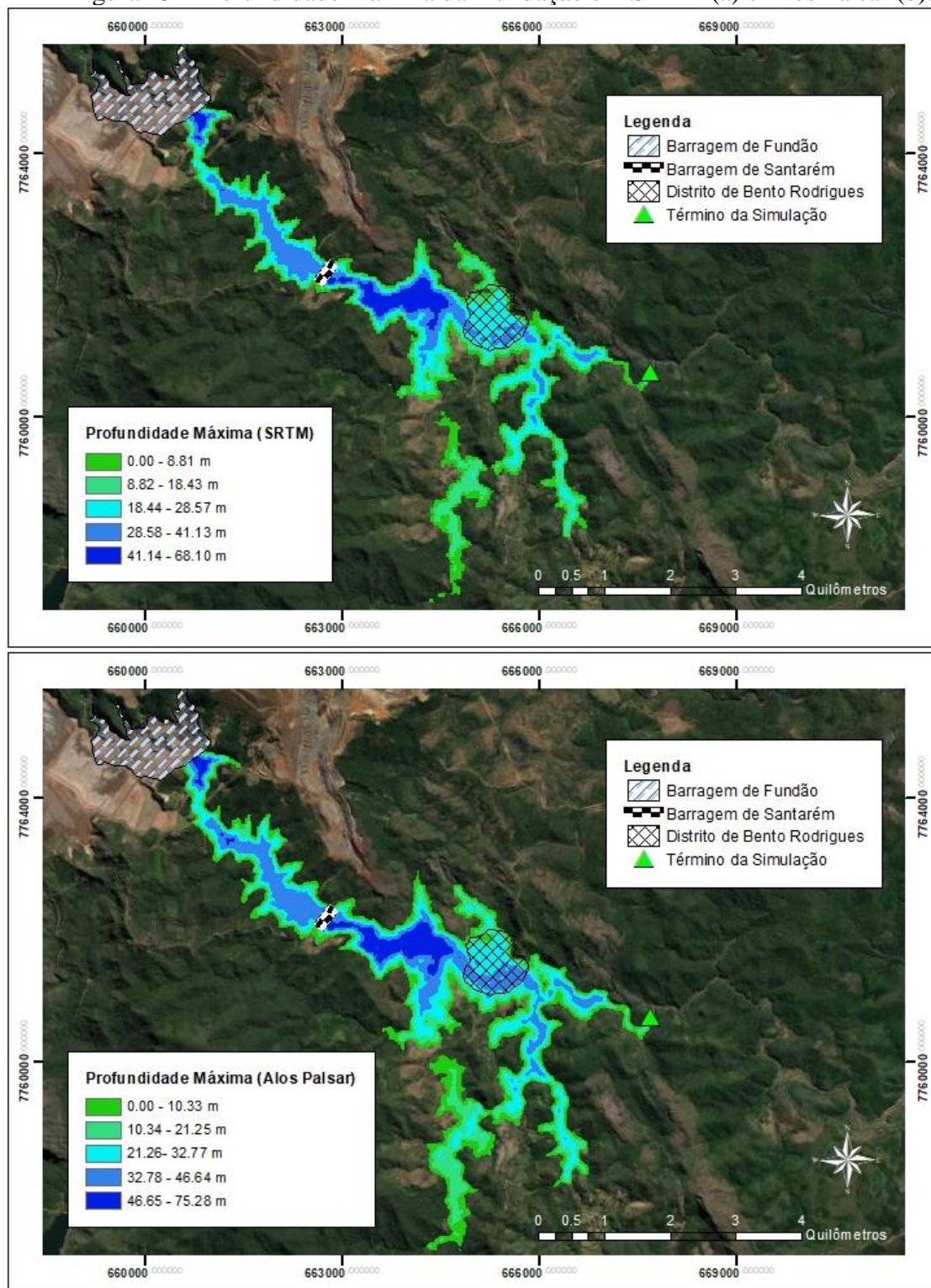
Matos e Eleutério (2019) obtiveram em seus estudos com Alos Palsar, profundidades em torno de 60 m na região próxima à barragem. Já em uma seção imediatamente a montante de Bento Rodrigues, os valores foram de aproximadamente 49 m, para a profundidade.

Neste estudo (FIGURA 45) para Alos Palsar, a profundidade no entorno da barragem foi 51,58 m e entorno de 41 m para as proximidades de Bento Rodrigues. Em SRTM, encontrou-se 51,13 m na região da barragem e 38,04 m em Bento Rodrigues. A utilização de um diferente método de consideração do volume mobilizado pelos autores pode ter influenciado no resultado.

Almeida, Saliba e Conde (2019) com o *software* HISTAV, obtiveram profundidades máximas de cerca de 60 metros na saída da Barragem do Fundão, o que se aproxima dos resultados encontrados em ambos os modelos. As diferenças nos valores encontrados em SRTM e Alos Palsar, sendo os maiores valores no último caso, podem estar associados a situações pontuais da cinética dada no momento da ruptura, sobretudo relacionados à própria saída da barragem do Fundão e a saída após o galgamento da barragem de Santarém, onde a lama adquiriu um movimento maior pelo declive podendo causar uma altura maior da onda.



Figura 45 - Profundidade máxima da inundação em SRTM (a) e Alos Palsar (b).



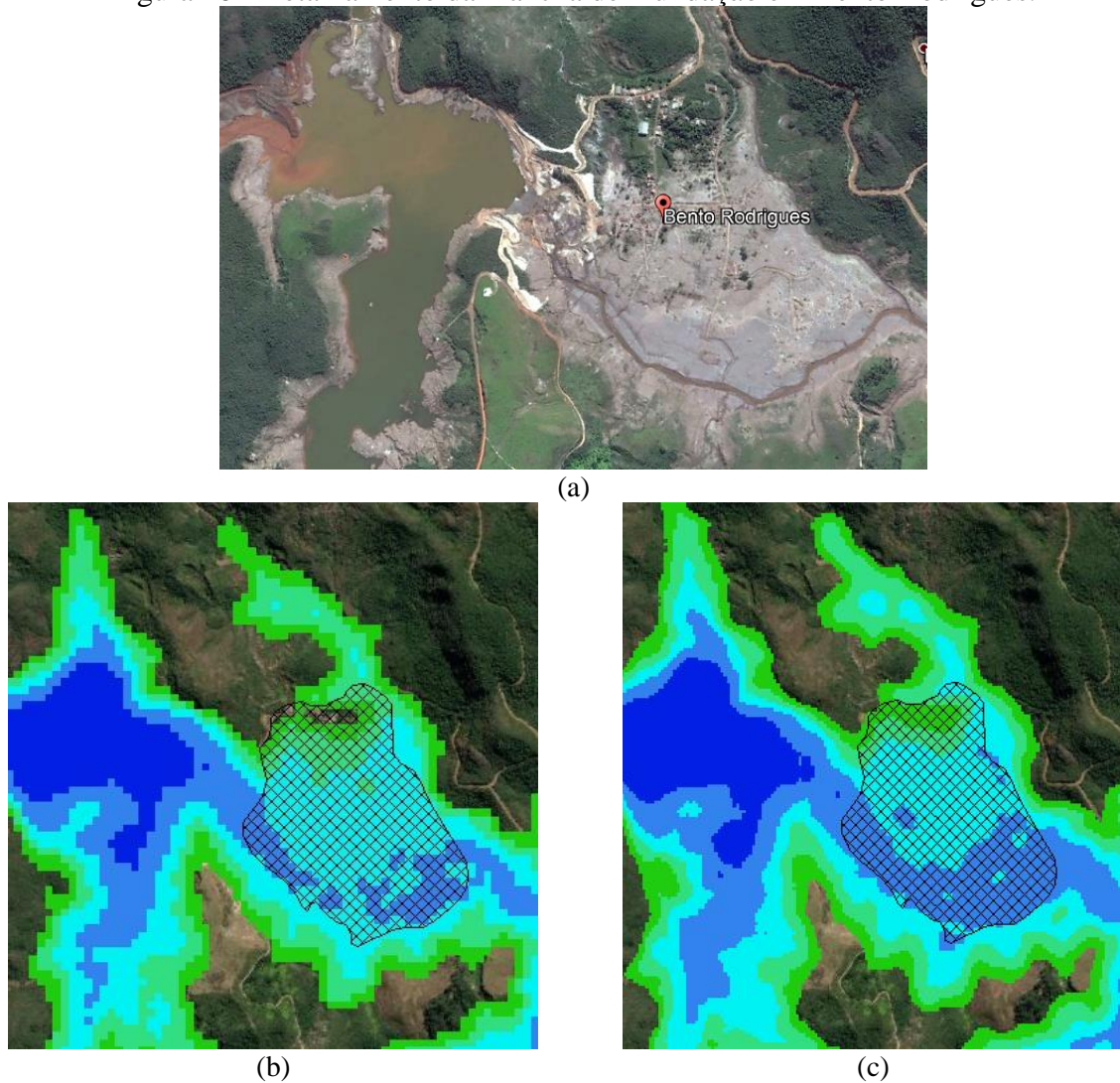
(a)

(b)

Fonte: A Autora (2021).

Ainda em análise dos mapas gerados, a região de Bento Rodrigues foi uma das que apresentou maior profundidade com a passagem da onda de lama (FIGURA 46). Isto pode ser explicado, segundo SEMAD (2016), pela sua caracterização de relevo suave, que proporcionou nestes locais a deposição de aproximadamente 2,5 milhões de m<sup>3</sup> lama.

Figura 46 - Detalhamento da mancha de inundação em Bento Rodrigues.



Fonte: Adaptado de Software Google Earth (2016); A Autora (2021).

É importante observar em ambas as constituições, que os modelos abrangem as principais áreas de interesse para aferição do risco. Na Figura 46, é possível visualizar um detalhamento maior da área inundada em Bento Rodrigues. É possível perceber que ambos os modelos extrapolam a inundação real, sendo o modelo (c) mais conservador em relação à mancha, em detrimento de (b), que tem menor detalhamento. Porém ainda que majorada a mancha, o cenário em (c) considera melhor a inundação ocorrida na parte mais baixa do relevo.

O evento produziu ondas de lama de 10 m de altura, destruindo prédios e infraestrutura nos bairros rurais de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo e Gesteira, matando 19 pessoas, poluindo 668 km de cursos d'água da bacia do rio Doce ao Oceano Atlântico (MURA *et al.*, 2018). No entanto, apesar dos modelos extrapolarem a situação real como comentado anteriormente, por se tratar de um estudo que pressupõe a consideração da pior condição possível para atingimento da ZAS, pode-se dizer que os resultados são satisfatórios.

#### 4.5 Risco Hidrodinâmico

O risco hidrodinâmico associado à onda de rejeitos está representado na Figura 47, com altos valores de referência encontrados, o que já era esperado já que em Bento Rodrigues cerca de 200 edificações foram soterradas (FARIA, 2019).

A associação da profundidade (m) e a velocidade de propagação (m/s) encontradas gera o risco hidrodinâmico ( $m^2/s$ ), foram base do estudo de Synaven (2000), para estabelecer valores referência para a geração de danos. A classificação dada pelos autores é universalmente usada, e está representada na Tabela 13.

Tabela 13 - Consequências de uma inundação em função do risco hidrodinâmico.

RISCO HIDRODINÂMICO	CONSEQUÊNCIAS
< 0,5 $m^2/s$	Crianças e deficientes são arrastados
0,5 – 1,0 $m^2/s$	Adultos são arrastados
1,0 – 3,0 $m^2/s$	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas
3,0 – 7,0 $m^2/s$	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
> 7,0 $m^2/s$	Colapso de certos edifícios

Fonte: Adaptado de Synaven (2000).

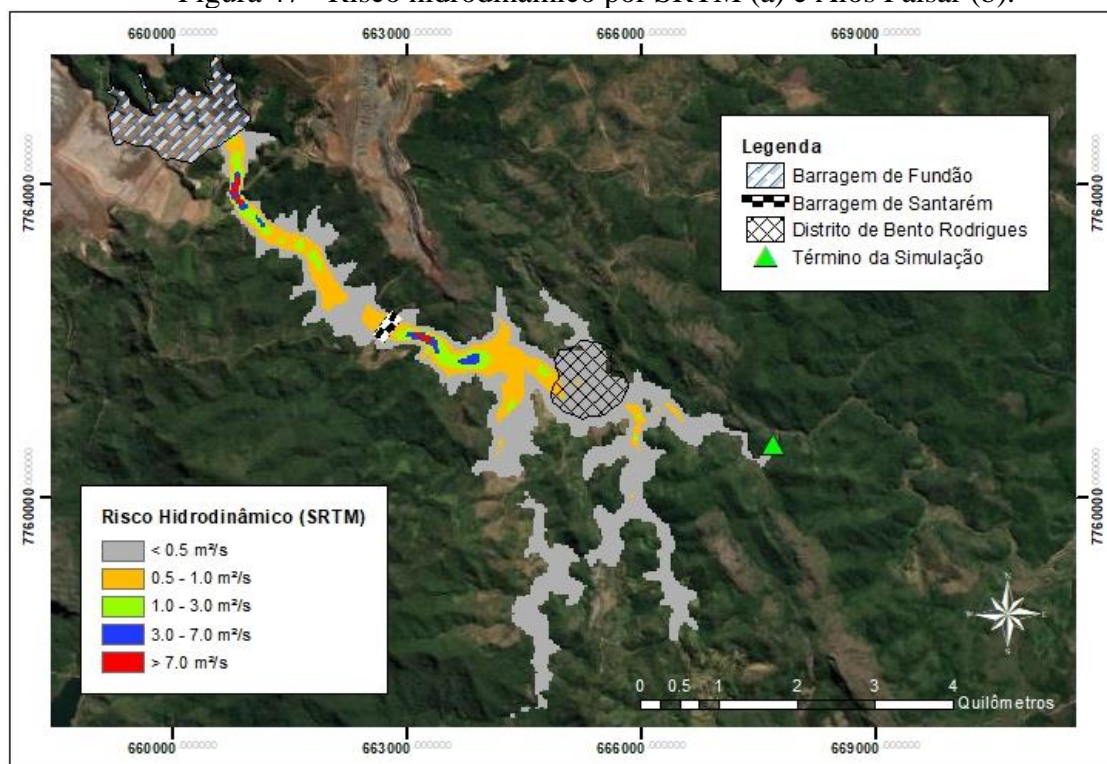
Considerando o risco hidrodinâmico encontrado nas modelagens, observa-se que a presença de altos índices de risco nas áreas logo após a barragem de Fundão, e logo após a barragem de Santarém, extrapolando o valor de 7,0  $m^2/s$ . O alto risco nestes locais é explicado pela brusca mudança de declividade que aumenta a velocidade do fluxo, fatores inerentes à formulação deste tipo de risco.

Se comparado a estes locais mencionados, no distrito de Bento Rodrigues a modelagem apresenta valores amenizados, porém ainda preocupantes. Especialmente no intervalo marcado pela cor “laranja” e “verde” que representa  $0,5 < RH > 3,0$ , onde há a possibilidade de danos estruturais, submersão e pessoas arrastadas. Situação que se concretizou de fato no rompimento

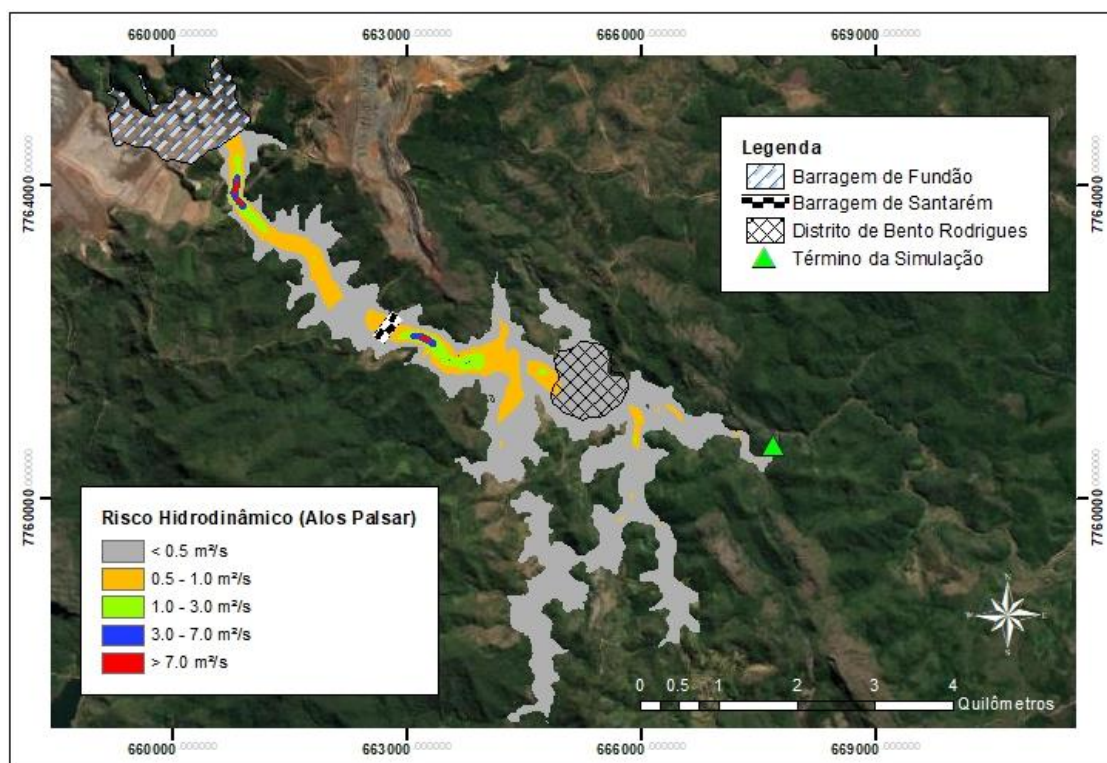
Por fim, assim como concluído por Cabral et al. (2016) a integração entre a modelagem hidrológica (HEC-HMS), hidráulica (HEC-RAS) e o SIG (SRTM/Alos Palsar) mostrou que é possível desenvolver uma metodologia confiável nestes casos, com base em dados digitais, imagens de satélites e uma boa rede de observações de campo.



Figura 47 - Risco hidrodinâmico por SRTM (a) e Alos Palsar (b).



(a)



(b)

Fonte: A Autora (2021).

## 5 CONCLUSÕES

A gestão de riscos atrelada a barragens de mineração é parte integrante do PAEBM que à época do rompimento em Fundão já era obrigatório, porém sem muitas atribuições sobre a qualidade e aferição dos meios de estudo. A previsão da ocorrência de risco, que pressupõe o estudo de *dam break* para o PAEBM, requer a solução e preparação para ocorrência, visando a precaução e a atenuação das consequências.

Os dados obtidos por este estudo, mostram que ainda que sejam utilizados MDE's – Modelos Digitais de Elevação gratuitos e de baixa resolução espacial, é possível obter cenários confiáveis para serem empregados no gerenciamento de risco e emergências de uma barragem. A mancha de inundação obtida pela base SRTM apresentou uma precisão maior da condição real em geral, porém apresentou muitas inconsistências em detalhamentos necessários em seções de bordas complexas e vegetação densa. Em Alos Palsar, obteve-se uma mancha de inundação mais conservadora, porém em contraponto, as seções de bordas e áreas de vegetação foram mais assertivas.

A velocidade aferida foi validada em ambos os casos com a similaridade encontrada na saída da barragem aos estudos de Morgenstern et al. (2016), em torno de 11 m/s. O tempo de chegada da lama na região a montante de Bento Rodrigues foi melhor validado na base Alos Palsar (9,6 minutos) contra 9 minutos para SRTM, sendo a referência visual do fenômeno dada em 10 minutos, o que mostra boa previsibilidade dos modelos. A profundidade máxima de inundação gerada em ambos foi de 41 m em Alos Palsar e 38,04 m em SRTM, utilizando o mesmo *software*, mostrando certa proximidade.

Para o risco hidrodinâmico encontrado, há uma difícil condição de referência e validação uma vez que carecem fontes específicas neste assunto sobre Fundão. Pressupõe-se como meio de aferição da qualidade do resultado, a observação das áreas de maior RH (as de mais alta declividade), a jusante das barragens de Fundão e Santarém. Tomando como base que o RH é a altura do fluxo *versus* velocidade do fluxo, obtém-se nestes lugares um visual entendimento e a correlação assertiva sobre os resultados.

Como forma de melhoria sobre os resultados obtidos, é sabido que o ideal para todos os casos é a utilização de um Modelo Digital do Terreno (MDT), feito por levantamento aerofotogramétrico fornecido pelo próprio empreendedor da barragem, mas pelas mais diversas razões isto não é possível. Ainda considerando isto, é possível perceber que a utilização dos modelos Alos Palsar e SRTM, foi satisfatório tal qual a sua maneira, mostrando situações de risco condizentes com topografia local.



## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Bruna Carolina de Melo; SALIBA, Aloysio Portugal Maia; CONDE, Daniel. Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem de Fundão Através do Modelo Numérico Histav. In: Simpósio Ibero-Americano de Riscos, 3., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Uberlândia: SIAR, 2019. p. 279-284.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 17 maio 2017.

ASF DATA SEARCH VERTEX. **Alos Palsar**. 2011. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

CABRAL, Samuellson Lopes *et al.* Integração do SIG, Hec/HMS e Hec/RAS no Mapeamento de Área de Inundação Urbana: Aplicação à Bacia do Rio Granjeiro-CE. **Geociências**, São Paulo, p. 90-101, jan. 2016.

DIEGUEZ, Consuelo. A Onda: Uma Reconstituição da Tragédia de Mariana, o Maior Desastre Ambiental do País. **Revista Piauí**, [s. l.], v. 118, n. 1, p. 1-1, jul. 2016.

FARIA, Mário Parreiras de. Mariana e Brumadinho: A Repercussão dos Desastres do Setor de Mineração na Saúde Ambiental. **17º Congresso da Associação Nacional de Medicina do Trabalho**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 16-17, jun. 2019. 17 - Supl.1. <http://dx.doi.org/10.5327/z16794435201917s1006>.

GDS INSTRUMENTS. **GDS Case Study: Fundão Mine Tailings Dam Failure**. Hampshire: GDS, 2016. 6 p. This Case Study Has Been Prepared Solely by GDS Instruments Following our Review and Interpretation of a Publicly Available Technical Report.

GIBSON, S. *et al.* Comparing Single-Phase, Non-Newtonian Approaches with Experimental Results: Validating Flume Scale Mud and Debris Flow in HEC-RAS. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.L.], v. 46, n. 3, p. 540-553, 19 jan. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.5044>.

GOOGLE EARTH. Cidade de Mariana. 2015; 2016. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em 01 mai. 2021.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Topodata: Base de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em 01 jun. 2021.

KOPPE, Jair Carlos. Lessons Learned from the Two Major Tailings Dam Accidents in Brazil. **Mine Water and The Environment**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 166-173, 28 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>.

LAURIANO, André William. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação Entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MACHADO, Nathália Couto. **Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MACHADO, Nathália Couto; SALIBA, Aloysio Portugal; BAPTISTA, Márcio Benedito. Modelagem Hidráulica Bidimensional de Fluidos Hiperconcentrados Estudo de Caso da Ruptura Da Barragem Do Fundão - Brasil. In: Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 28., 2018, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Buenos Aires: CLH, 2018. p. 1-2.

MATOS, Ana Clara de Sousa; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso. Modelagem Hidrodinâmica da Onda de Cheia Decorrente da Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: SBRH, 2019b. p. 1-10.

MOGHADDAM, Reza; RIVEROS, Guillermo; FARHANGI, Siavash. A Finite Element Analysis of the Fundão Dam Failure. In: Geovirtual, 1., 2020, Ontario. **Anais [...]**. Vancouver: Geovirtual, 2020. p. 1-8.

MORGENSTERN, Norbert R.; et al. **Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**, 2016. 88 p.

MOTA, Kevin Reiny Rocha. **Rompimento Hipotético e Delimitação da Área de Inundação da Barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Procedimento Investigatório Criminal (PIC) MPF n.º 1.22.000.000003/2016-04**. Belo Horizonte: MPMG, 2016. 273 p.

MTPS - MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA SOCIAL. **Relatório de Análise de Acidente: Rompimento da Barragem de Rejeitos Fundão em Mariana - MG**. Belo Horizonte: SEMAD, 2016. 138 p.

O'BRIEN, Y Jim S.; JULIEN, D Pierre Y. Laboratory Analysis of Mudflow Properties. **Journal Hydraul. Eng.**, Denver, v. 114, n. 8, p. 877-887, Jan. 1988.

PAIVA, Camila Adriane de. **Contribuições dos Estudos de Dam Break às Ações da Defesa Civil**. 2020. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

PCMG - POLÍCIA CIVIL DE MINAS GERAIS. **Levantamento de Local onde Ocorreu Rompimento de Barragem**: Barragem de Fundão, da Empresa Samarco S.A., Mariana/MG. Belo Horizonte: PCMG, 2016. 174 p.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA. **Plano de Ações Emergenciais de Barragens de Mineração - PAEBM**: Barragem do Fundão. Mariana: Pimenta de Ávila Consultoria, 2015. 76 p.

PRATA, Marcelo Leite. **O Fenômeno da Liquefação em Barragens de Rejeito – Um Estudo de Caso Sobre o Rompimento da Barragem de Fundão**. 2019. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

REID, David. Additional Analyses of the Fundão Tailings Storage Facility: In Situ State and Triggering Conditions. **Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.L.], v. 145, n. 11, p. 04019088, nov. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002123](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002123).

ROCHA, Felipe Figueiredo. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SADREKARIMI, Abouzar; RIVEROS, Guillermo Alexander. Static Liquefaction Analysis of the Fundão Dam Failure. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 6431-6446, 8 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-020-01446-8>.

SEMAD - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **SEMAD/SUFIS/SUFAI Nº01/2016**: Análise Multicriterial do Comportamento da Lama na Área Afetada Pelo Acidente Ambiental da Barragem do Fundão - Samarco. Belo Horizonte: SEMAD, 2016. 28 p.

SYNAVEN, K. **The Pilot Project Kyrkojarvi Dam and Reservoir, Seinajoki, Finland**. In: Internacional Seminal and Workshop Risk Assesment, Dam-Break Flood Análisis and Emergency Action Planning. 2000. Seinajnoki: Finnish.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS 6.0**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure**. Dam Safety Office. Denver, Colorado, EUA. 1999. 43p.

VISEU, T. **Segurança dos Vales a Jusante de Barragens – Metodologias de Apoio à Gestão dos Riscos**. 2006. 482f. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

## ARTIGO 5 – ANÁLISE INVERSA DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM B1 DE BRUMADINHO, MINAS GERAIS, BRASIL.

### 1 INTRODUÇÃO

As barragens de mineração possuem como função a contenção dos rejeitos obtidos nos processos de extração e beneficiamento de minério (ANM, 2017). Embora a atividade mineradora detenha importância no setor econômico e social brasileiro, as barragens de mineração especificamente são estruturas que apresentam riscos diversos quando não são monitoradas adequadamente e quando suas diretrizes de segurança não são respeitadas.

O ano de 2019 iniciou-se com um desastre ambiental pelo rompimento da barragem B1 na Mina Córrego do Feijão no dia 25 de janeiro, atingindo o município de Brumadinho-MG e deixando rastro de destruição de pelo menos 269,84 hectares (IBAMA, 2019). A estrutura teve a construção do seu dique inicial no ano 1976 pelo método de alteamento a montante (FIGURA 48). Continha cerca de 12,7 milhões de m<sup>3</sup>, e estima-se que com o seu rompimento, cerca de 9,7 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito foram deslocados (ROBERTSON et al., 2019). Neste método de alteamento são utilizados os próprios rejeitos como material construtivo, tendo como principal benefício a redução dos custos de construção, mas em contrapartida pode ser menos estável sob cargas pesadas e terremotos, pois os rejeitos podem experimentar liquefação e perder força (RAMAN; LIU, 2019), pela sua heterogeneidade.

Figura 48 - Localização das barragens B1 e B VI



Fonte: A Autora (2021).

Laudos sobre as causas do rompimento (PF, 2019; Robertson et al., 2019; CIAEA, 2020) dentre outros, relacionam o rompimento ao fenômeno de liquefação estática, definido pela forma imediata e enérgica com que os rejeitos foram dispersados. Os rejeitos da barragem mostraram repentina e significativa perda de força, rapidamente se tornando um pesado líquido que fluiu rio abaixo em alta velocidade (KOPPE, 2020) como visto nos vídeos divulgados sobre o evento.

Tal situação remete a certa similaridade ao caso anterior de rompimento em Mariana-MG (2015), onde houve pouca ou nenhuma chance de ação às pessoas nas Zonas de Autossalvamento (ZAS). A Resolução nº 4 (ANM, 2019) estabelecida após o rompimento em Brumadinho, trouxe medidas mais rígidas para assegurar a estabilidade de barragens de mineração construídas pelo método a montante. A Resolução também proíbe manter ou construir edificações na ZAS, além de identificar pontos de refúgio obtidos por estudos de ruptura de barragens (ANTONIO, 2019). As mudanças para restrições nas ZAS vieram com o atingimento imediato da lama nas instalações da Mina Córrego do Feijão, muito próximas da barragem, como evidenciado na Figura 49. Como resultado imediato do rompimento, a região do ribeirão Ferro-Carvão sofreu um grande impacto com a onda de rejeitos, afetando a qualidade da água na região (IGAM, 2020), e causando a perda de vidas (270 mortes), se caracterizando como o maior acidente de trabalho na mineração segundo TRTMG (2019).

Com os riscos conhecidos sobre estas estruturas, pode-se dizer que a ruptura de barragem não é um fenômeno aleatório, mas relacionado ao desconhecimento das condições da estrutura como o estado mecânico dos rejeitos e sua relação com o método construtivo, a engenharia do barramento sobretudo quando a drenagem do mesmo, e questões mais íntimas como as condições de operação e manutenção ao longo da sua vida útil.

Devido ao grande potencial de destruição no caso de ruptura destas estruturas, a legislação brasileira de segurança de barragens em vários documentos, ressalta a obrigatoriedade da realização de estudos de *dam break*, a fim de que o empreendedor apresente uma delimitação das áreas potencialmente afetadas por uma eventual ruptura e seus possíveis cenários associados para facilitar a gestão de risco e evacuação, conforme preconizado na Portaria nº 70.389 (ANM, 2017). Dada tal importância do reconhecimento dos piores cenários para a estipulação de condições mais seguras no entorno destas estruturas, este estudo se compõe de uma retroanálise do rompimento da barragem B1 por meio de modelagem via estudo de *dam break*, induzido pelos dados e situações narradas pelos vários relatórios públicos sobre esta ruptura, utilizando métodos e técnicas de domínio gratuito e público para buscar uma similaridade da macha de inundação obtida com a situação real do rompimento.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Modelagem de Ruptura pelo Software HEC-RAS® 6.0

A modelagem hidrodinâmica da ruptura de barragens pelo *software* HEC-RAS® (USACE, 2020) é bem fundamentada na literatura técnica como em Psomiadis *et al.* (2021), Gibson *et al.* (2021), Murdiani *et al.* (2020) e Siswanto, Suprpto e Huda (2019). O *software* também é o mais utilizado nos relatórios de *dam break* compilados por Paiva (2020) obtidos nas entregas de Planos de Ação de Emergência (PAE) para conhecimento da Defesa Civi. A aplicação deste meio de obtenção da mancha de inundação na ruptura de barragens tem sido aprimorada ao longo dos anos, sendo que, recentemente a versão beta HEC-RAS® 6.0 traz a formulação de modelos para fluidos não-newtonianos, aos quais está enquadrada a lama de rejeitos em *debris* e *mud flow* (fluxo de detritos e lama), para escoamentos variáveis.

O método consiste em considerar o Princípio de Conservação da Massa (Equação da Continuidade), que segundo Silva, Maia e Pinto (2011), induz a variação do escoamento que flui no canal a se igualar à variação do armazenamento no referido volume (EQUAÇÃO 03). A Equação 04 resulta no Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento, dando a quantidade de movimento do fluxo na entrada do sistema, relacionando-o com as forças externas atuantes sobre o volume deslocado, e igualando-o com a quantidade de movimento da saída do sistema. A Equação 05 (Equação de Manning-Strickler), dá a velocidade do fluido em canais abertos de acordo com as relações de atrito no mesmo.

$$\frac{\partial AT}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (03)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{dz}{dx} + S_f \right) = 0 \quad (04)$$

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{R^{4/3} A^2} \quad (05)$$

Onde:

$AT$  = área total de escoamento do volume;

$Q$  = vazão que flui através do volume requerido;



$QV$  = vazão final do fluido;

$q_l$  = afluências laterais ao volume, por unidade de comprimento.

$gA$  = área do escoamento;

$S_f$  = velocidade do fluido;

$R$  = raio hidráulico;

$n$  = coeficiente de atrito de Manning.

## 2.2 Escoamento de Fluidos Não-newtonianos

A criação de um modelo de simulação para um fluido não-newtoniano, tal qual a lama de rejeitos, depende de alguns fatores relacionados à reologia do fluido, como a concentração volumétrica relacionada a relação de água e sólidos na massa de solo. O'Brien e Julien (1985), criaram uma relação entre a concentração volumétrica da massa de solo e as características do escoamento que lhe cabem. Partiram do pressuposto que materiais com concentração volumétrica ( $C_v$ ) menor que 0,20, são por definição, fluidos aquosos newtonianos, pois se apresentam em estado de propagação líquida com poucos sedimentos suspensos. Fluidos com  $C_v$  entre 0,20 e 0,45, são classificados como *mudflood*, ou corrida de lama, com propagação fluida em estado líquido com carga de sedimentos suspensos, alastrando-se com facilidade sobre superfícies horizontais, por distâncias consideráveis. Aqueles com  $C_v$  entre 0,45 e 0,50, são considerados *mudflow* ou lama plástica, com início de espraiamento pela ação das forças coesivas, e um escoamento evidente apesar de lento. E os fluidos com  $C_v$  entre 0,50 e 0,90, há a consideração de escorregamento, onde não há escoamento, mas apenas deformações internas que propiciam uma movimentação devido à quebra de tensões.

## 2.3 Análise de Risco em Ruptura de Barragens

Almeida (2001) e Balbi (2011) descrevem os principais parâmetros hidrodinâmicos aferidos para um zoneamento de risco e de áreas vulneráveis ao rompimento de barragens como:

- (1) Áreas atingidas (determina quais elementos em risco serão afetados, população, estruturas, etc);
  - (2) Cotas máximas dos níveis d'água ou alturas máximas;
  - (3) Instante de chegada da onda de cheia;
  - (4) Instante de chegada da altura máxima (importante nos tempos de alerta e evacuação);
  - (5) Grau de perigo em função da velocidade e altura ( $V \times H$ ), em  $m^2/s$  (corresponde ao perigo que a água oferece às pessoas e edificações);
  - (6) Velocidade máxima do escoamento (que pode caracterizar a capacidade destrutiva);
  - (7) Duração das submersões (para avaliação dos custos materiais e o tempo de recuperação)
- ALMEIDA (2001); BALBI (2011).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Modelos Digitais de Elevação

Para comparação da fidelidade da mancha de inundação gerada pelo *software* com a condição real, optou-se pela utilização de dois MDE's – Modelos Digitais de Elevação gratuitos. O primeiro é o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) em formato raster, obtido no ano 2000 pela NASA, com precisão espacial de 30,0 m, e retirado dos aprimoramentos técnicos feitos pelo Topodata (INPE, 2011). O segundo é o modelo Alos Palsar (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), que teve suas operações concluídas em maio de 2011 com precisão espacial de 12,5 m (ASF DATA SEARCH VERTEX, 2011). Os modelos foram processados no *software* ArcGis® 10.5, licença de estudante.

### 3.2 Hidrograma de Ruptura

Antes da inserção dos MDE's no HEC-RAS® 6.0, foi necessário o conhecimento do hidrograma de ruptura do barramento que definiu posteriormente a hidrodinâmica de avanço do fluido pelo terreno a jusante através da onda de rejeitos. A propagação do hidrograma para jusante é intimamente ligado as características do reservatório, do volume de material armazenado e o tempo de liberação de volume, obtidos em documentos técnicos como Tüv Süd Bureau de Projetos (2018). Os estudos de Robertson et al. (2019), trouxeram luz ao volume mobilizado na ruptura, onde os autores citam a realização de uma análise por satélite com resultado de 9,7 Mm<sup>3</sup> desprendidos da barragem B1. Este valor foi utilizado para composição do hidrograma, bem como o tempo de ruptura estimado pelos autores de cerca de 8 segundos.

### 3.3 Modelagem da Mancha de Inundação

A modelagem da onda de rejeitos foi iniciada a partir da inserção dos MDE's no *software*, dentro do módulo “*Ras Mapper*”. Foram criadas cinco seções transversais em locais de interesse: (1) região imediatamente a jusante do talude da barragem; (2) entrada da pêra ferroviária; (3) região administrativa; (4) região do viaduto ferroviário; e (5) desemboque no Rio Paraopeba. Estes locais foram escolhidos para posterior retirada de dados da modelagem,

e foram considerados pela importância do conhecimento sobre estes locais, considerados Zonas de Autossalvamento – ZAS.

Em “*Geometry Data*”, foram alocadas as condições de controle das seções transversais como as *bank stations* (margens que delimitam o tipo de material da superfície para o escoamento) e os coeficientes de Manning atrelados à estas superfícies. Também neste módulo foram inseridas as zonas de *inflow* e *outflow* (zonas de entrada de fluxo e término da simulação). O *inflow* foi delimitado logo na saída do reservatório de B1 e o *outflow* marcado no encontro com o Rio Paraopeba, representando o final da ZAS.

Indicados os preceitos fundamentais do modelo, no módulo “*Unsteady Flow Data*” foram adicionados os parâmetros hidráulicos e hidrodinâmicos para o escoamento do fluxo. Utilizando o regime de escoamento não permanente, pressupôs-se que a velocidade e a pressão foram variantes ao longo do tempo em um mesmo ponto, e dele para outro. Foram feitas as valorações dos *inflows*, que tiveram como base o *flow hydrograph*, ou hidrograma de ruptura da barragem. Para o *outflow*, foi considerada a condição de *normal depth* (escoamento normal). Neste mesmo módulo, foram dadas as entradas de condição para o fluido não-newtoniano em “*Non-newtonians Methods and Parameters*”, considerando o fluido do tipo plástico de Bingham (não escoam a não ser que a tensão de cisalhamento seja excedida).

Para retirada de dados sobre a reologia dos rejeitos tomou-se como base uma aproximação das informações aferidas por Antonio et al (2019). Adotou-se uma concentração volumétrica não variável, constante ao longo do tempo de 0,55, com viscosidade ( $\eta$ ) = 0,61 Pa.s, com tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) = 43 Pa e temperatura constante de 25°C. A rugosidade da superfície foi estipulada segundo o Coeficiente de Rugosidade de Manning ( $n$ ), que segundo Lauriano (2009), deve ser utilizado para descrever a resistência do fluxo devido a rugosidade do canal. Nesta simulação optou-se por calibrar o modelo referente o Coeficiente de Rugosidade de Manning recomendado por Rocha (2015), entre 0,1; 0,2 e 0,3.

Inseridos os valores, e definidas as limitações do fluxo em tempo, o botão “*Perform a unsteady flow simulation*”, pediu a indução dos tempos de controle da simulação, e o intervalo de verificação dentro do intervalo de tempo. Foi utilizado o tempo de 12h28min às 14h00min do dia 25 de janeiro de 2019, com intervalo de aferição no sistema e saída dos gráficos de um minuto, para uma malha bidimensional de 10 x 10 metros. O trecho modelado no Hec-RAS® 6.0, abrangeu uma extensão de aproximadamente 10 km, partindo da própria barragem do B1, perpassando pela área administrativa da mina, seguindo o curso de inundação até o rio Paraopeba. Este trecho foi definido respeitando os preceitos da Portaria nº 70.389 (ANM, 2017), que define a Zona de Autossalvamento (ZAS) preconizada nos estudos de *dam break* como

sendo a maior distância entre 30 minutos de tempo de chegada de onda ou 10 km de simulação feita. Com as manchas geradas nos parâmetros requeridos, retornou-se ao ArcGis® 10.5, para configuração dos mapas finais deste trabalho.

Os dados obtidos foram tomados a título de validação com o estudo *dam break* oficial da barragem B1 feito pelo consórcio Potamos Engenharia e Hidrologia, Tüv Süd Bureau de Projetos e Amplo Engenharia, no ano de 2018 dentro do *software* HEC-RAS® 5.0.3, e pelos laudos técnicos de referência elaborados por Robertson et al. (2019), CIAEA (2020), MPMG (2019) e TRTMG (2019), dentre outros.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

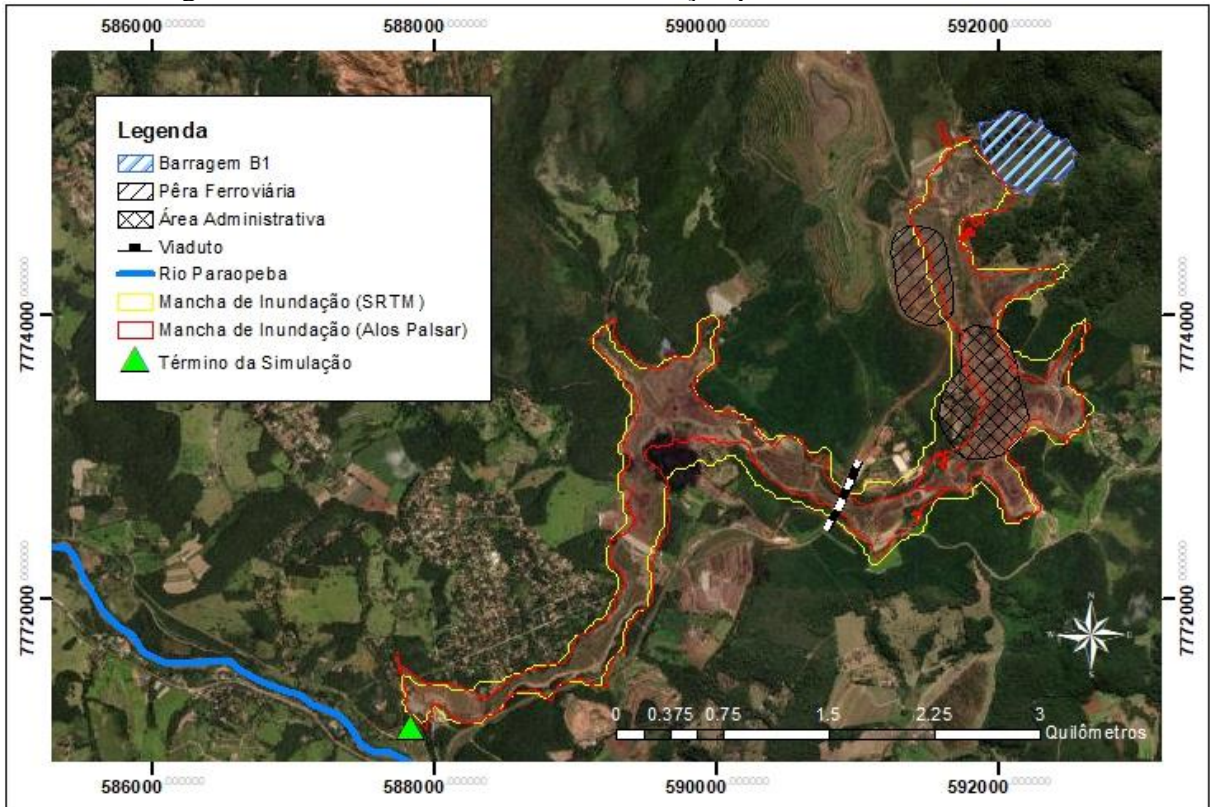
Com a entrada de dados, pode-se obter vários mapas referentes às situações de emergência para a ZAS - Zona de Autossalvamento delimitada. Dentre obtidos pela modelagem, encontram-se a seguir: *Inundation Boundary* (Mancha de Inundação), *Depth* (Profundidade do Fluxo), *Arrival Time* (Tempo de Chegada), *Velocity* (Velocidade do Fluxo) e *Depth x Velocity<sup>2</sup>* (Risco Hidrodinâmico).

### 4.1 Mancha de Inundação

A Figura 49 mostra a delimitação das duas manchas de inundação geradas pelos cenários da base SRTM e Alos Palsar sendo visíveis as diferenças da envoltória entre si. A mancha SRTM apresenta pouco detalhamento em seções que são exigidos maiores aprimoramentos em relação à presença de vegetação, em detrimento de Alos Palsar. Por ser uma base retirada ainda nos anos 2000, e atualizada com o passar do tempo por agências brasileiras como a EMBRAPA e o INPE, a mudança da paisagem inerente ao tempo pode ter afetado o modelo.

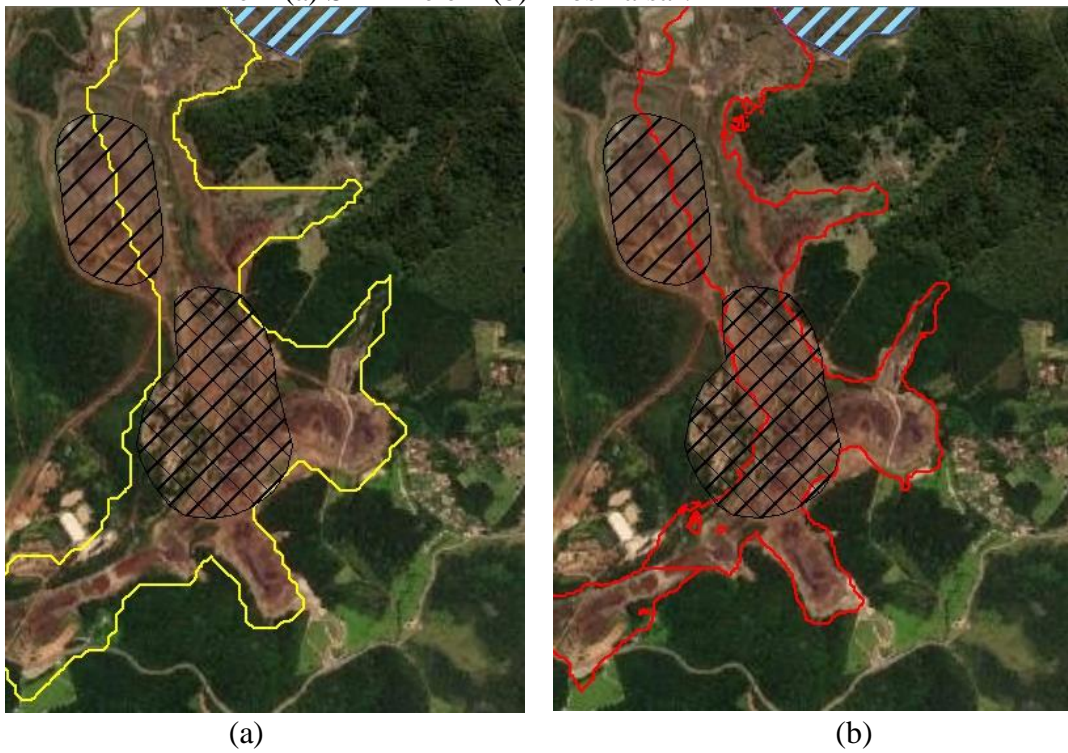
O modelo Alos Palsar, do ano 2011, tem maior detalhamento em nível topográfico, como ressaltado por Lima *et al.* (2020a) ao observarem o comportamento da mancha de inundação de B1 gerada após uma simulação com os MDE's SRTM e Alos Palsar. Os autores obtiveram um resultado de que há uma qualidade geral semelhante com uma pequena vantagem de Alos Palsar sobre o SRTM, apresentando um erro quadrado de cerca de 6 m. Na Figura 50, é possível perceber um detalhamento mais assertivo da área inundada na área administrativa no cenário de Alos Palsar (b) em detrimento de SRTM (a), assim como relatado no trabalhado anteriormente mencionado.

Figura 49 - Envoltória máxima de inundação por SRTM e Alos Palsar.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 50 – Detalhamento da mancha de inundação na área administrativa em (a) SRTM e em (b) Alos Palsar.



Fonte: A Autora (2021).

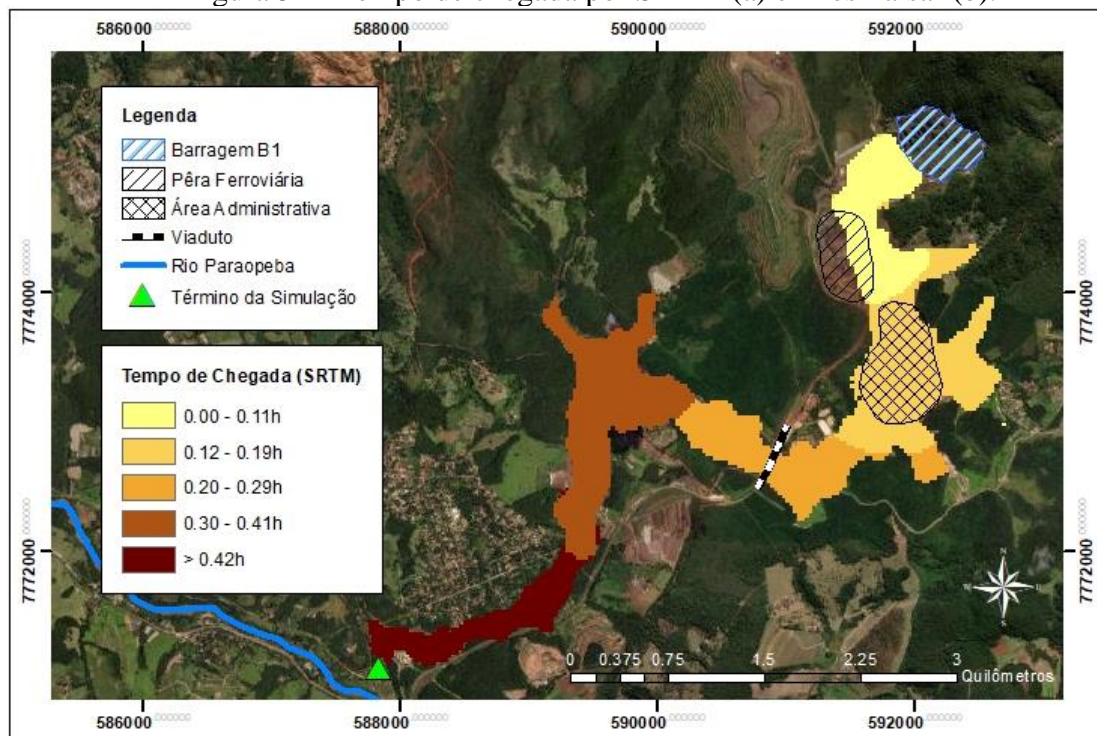


É possível observar que em ambos os modelos gratuitos, as reconstituições feitas neste trabalho abrangem as principais áreas de interesse para aferição do risco. Apesar de algumas diferenciações com a situação real no modelo SRTM, levando em conta a precisão do material e a tendência que o mesmo tem de majorar e não minorar a situação de risco, sendo mais conservador. Pode-se dizer que o padrão definido em ambos os modelos é aceitável, sobretudo diante das aferições necessárias e valores altos de material dispersos como no caso de uma ruptura por liquefação.

#### 4.2 Tempo de Chegada

Neste estudo, os resultados obtidos sobre o tempo de chegada nos pontos de interesse para idealização da Zona de Autossalvamento (ZAS) e Zona de Salvamento Secundária (ZSS) estão apresentados em suma, na Figura 51. Obteve-se que o tempo de chegada na região de saída do fluxo ou a Pêra Ferroviária foi inferior a 3 minutos (0.01 h) para ambos os modelos, que converge com os estudos de Ligier (2020), que aferiu para o rompimento de B1 uma duração do fluxo de saída na barragem entre 3 e 7 minutos.

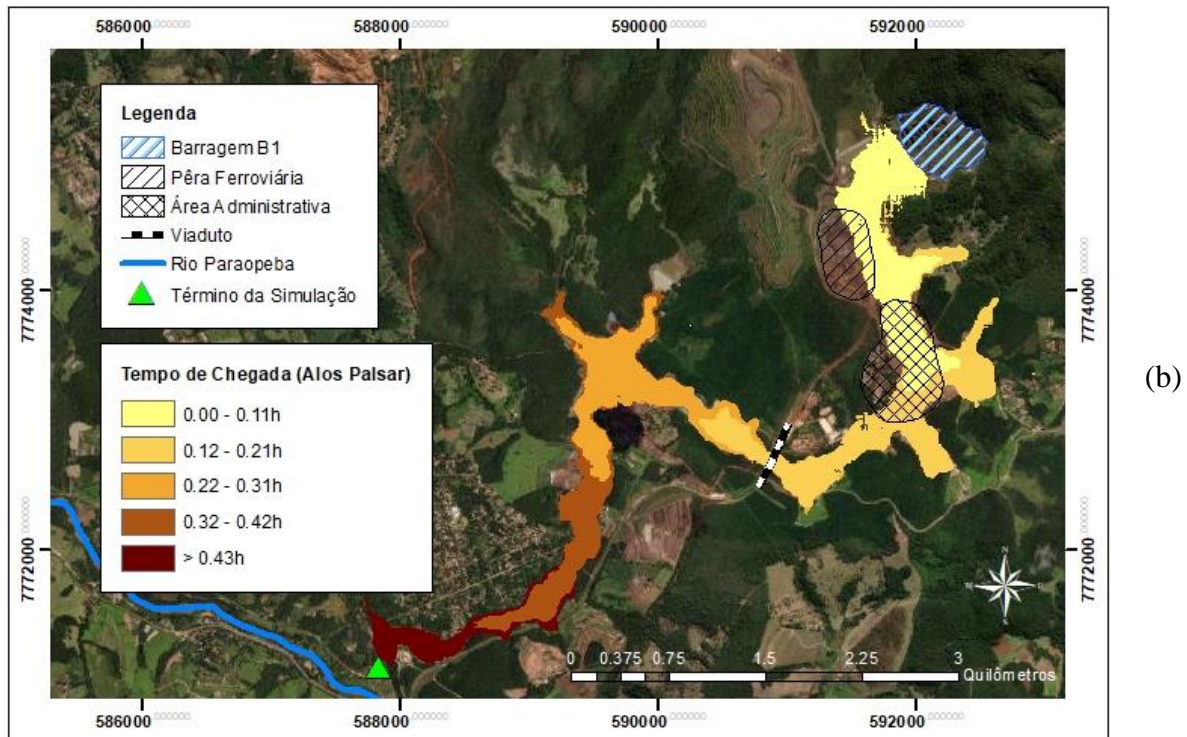
Figura 51 - Tempo de chegada por SRTM (a) e Alos Palsar (b).



(a)

(Continua)

Figura 51 - Tempo de chegada por SRTM (a) e Alos Palsar (b). (Continuação)



Fonte: A Autora (2021).

American Geophysical Union (2019) obteve em seu estudo que a lama chegou à área administrativa percorrendo o trajeto em 25 segundos, concordando com a aproximação do segundo modelo deste estudo, onde obteve-se como tempo de chegada para a área administrativa em Alos Palsar de 0,01 h (30 s) e 30 minutos para chegar ao rio. Em SRTM o tempo foi maior, 0,03 h (144 s) e 30 minutos para chegar ao Rio Paraopeba, um resultado mais parecido com o de Yu, Tang e Chen (2020) que mostrou que o fluxo demorou 150 s percorrer o espaço até a área administrativa, e até 40 minutos para chegar ao Rio Paraopeba.

Lumbroso et al. (2020), trouxe em seus estudos, um tempo de chegada ao Rio Paraopeba de 01:26 hora, enquanto o relatório técnico da CPI da Câmara dos Deputados (2019), que diz que os rejeitos alcançaram o rio Paraopeba às 15h50min, tendo pouco mais de 3 horas do rompimento, tempo concordante com os estudos de Raman e Liu (2019).

Nos cenários de *dam break* realizados para a barragem B1 (POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA; TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS; AMPLO ENGENHARIA, 2018), obteve-se o tempo de chegada total de 0,65 h (37 minutos) em um *sunny day* (dia seco), e 0,43 h (25 minutos) em *rainy day* (dia chuvoso) nos primeiros 9 km percorridos pela mancha, ou até a proximidade do Rio Paraopeba, convergindo mais em aproximação com os resultados obtidos neste estudo.

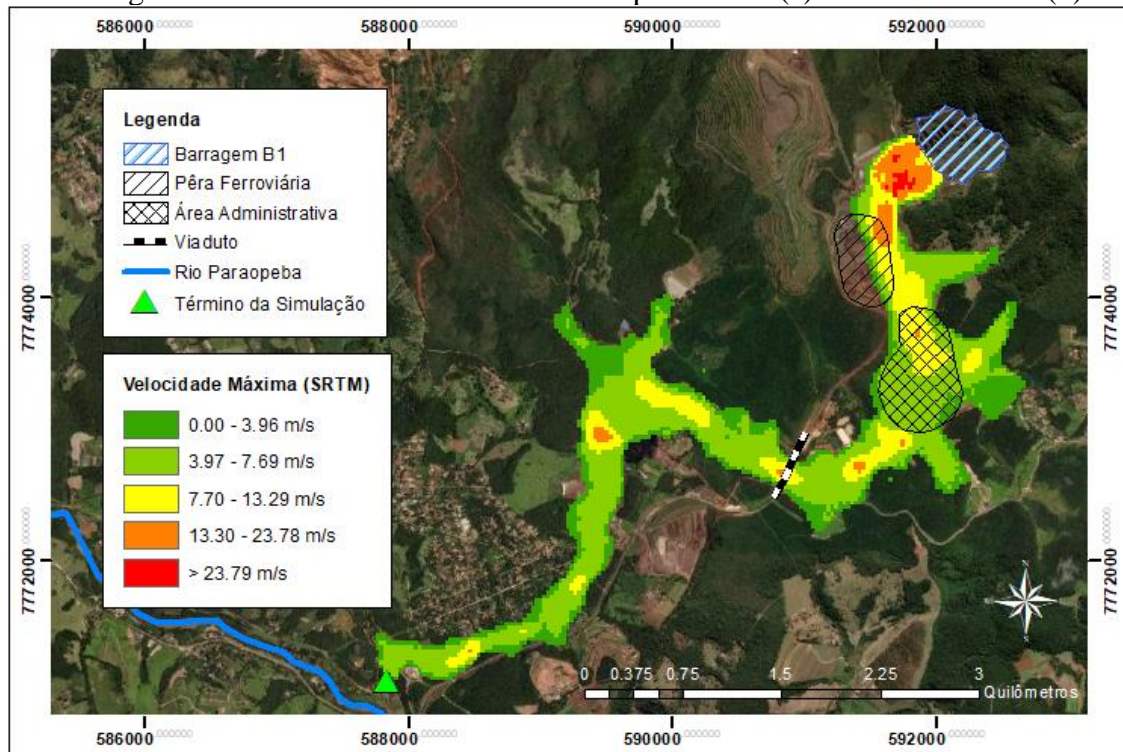


### 4.3 Velocidade do Fluxo

Os cenários de *dam break* realizados para a barragem B1 (POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA; TÜV SÜD BUREAU DE PROJETOS; AMPLO ENGENHARIA, 2018), obtiveram que a velocidade média do fluxo de 3,8 m/s em um *sunny day* (dia seco), e 5,8 m/s em *rainy day* (dia chuvoso). A simulação da velocidade do fluxo para este trabalho está representada na Figura 52. Em contraponto ao estudo do PAEBM de B1, o relatório da CPI da Câmara dos Deputados (2019), que toma as imagens captadas pelas câmeras no momento do rompimento, dá que a velocidade da lama tenha alcançado cerca de 80 km/h, ou 22,2 m/s.

Nos estudos de American Geophysical Union (2019), os autores consideram que de B1 até a Pêra Ferroviária, a lama alcançou uma velocidade de 120 km/h (33 m/s), uma taxa muito rápida, sugerindo um enfraquecimento extremamente rápido da massa de detritos, indicando a falha por liquefação. Até a estrutura administrativa, a velocidade média encontrada pelos autores foi de 66 km/h (18,4 m/s). Yu, Tang e Chen (2020) obtiveram que na ruptura, a velocidade dada era mais do que 20 m/s. Posteriormente, chegou na área administrativa e na comunidade a jusante, com uma velocidade de 15 m/s. Na região do viaduto carregado, a velocidade foi de menos 5 m/s, e na fluência para o Rio Paraopeba, inferior a 2 m/s.

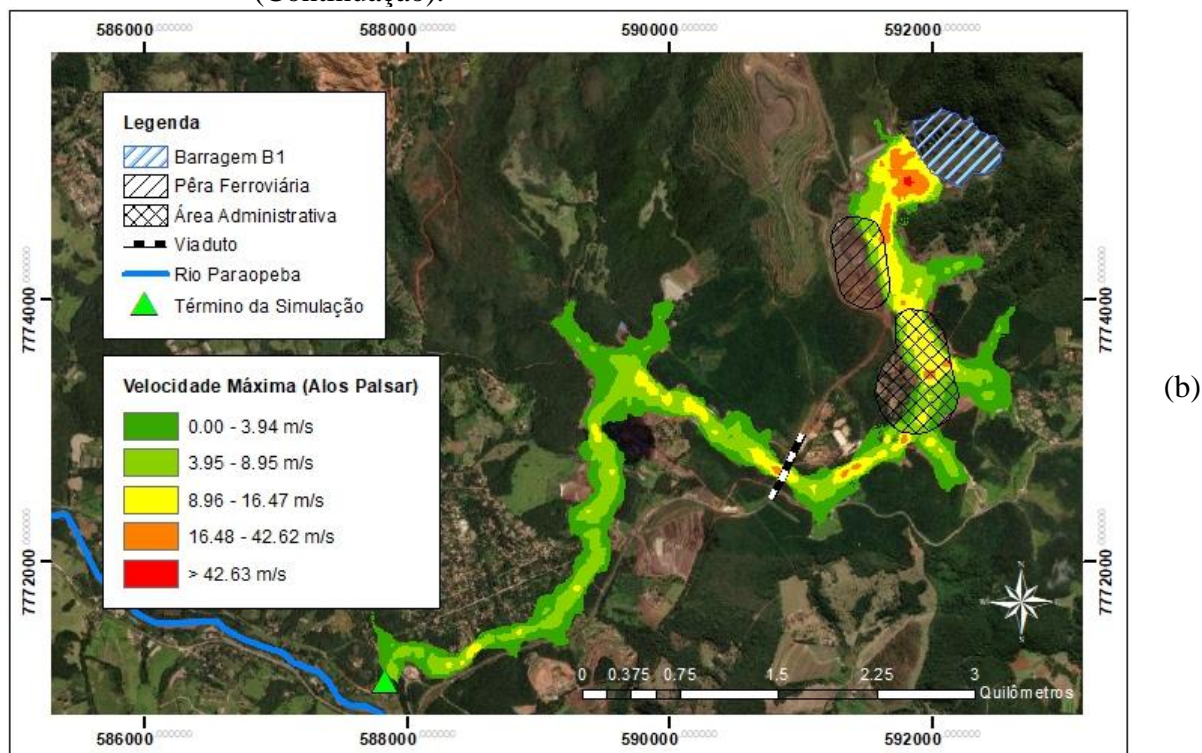
Figura 52 - Velocidade máxima do fluxo por SRTM (a) e em Alos Palsar (b).



(a)

(Continua)

Figura 52 - Velocidade máxima do fluxo por SRTM (a) e em Alos Palsar (b).  
(Continuação).



Fonte: A autora (2021).

Os valores dos relatórios abordados convergiram para ambos os modelos criados. Na região a jusante da barragem foi encontrada uma velocidade de 23,99 e 25,52 m/s, na região administrativa 13,17 m/s e 17,94 m/s, na região do viaduto, onde há um estreitamento do vale, 14,80 e 18,74 m/s, seguido pelo desemboque no Rio Paraopeba, com 6,13 e 6,95 m/s, respectivamente em cada caso, SRTM e Alos Palsar.

Estes resultados podem ser classificados pelos critérios de Viseu (2006), quando ao nível de perigo pela velocidade do fluxo na inundação causada (TABELA 14).

Tabela 14 - Nível de perigo para edificações em função da velocidade.

NÍVEL	CLASSE	VELOCIDADE (V)
Reduzido	Verde	$V < 2$ m/s
Médio	Amarela	$2 < V < 4$ m/s
Importante	Laranja	$4 < V < 5,5$ m/s
Muito importante	Vermelha	$V > 5,5$ m/s

Fonte: Adaptado de Viseu (2006).

Com base nesta classificação, pode-se perceber que há um perigo considerado “muito importante” em razão da velocidade encontrada estar sempre acima de 5,5 m/s, e em alguns

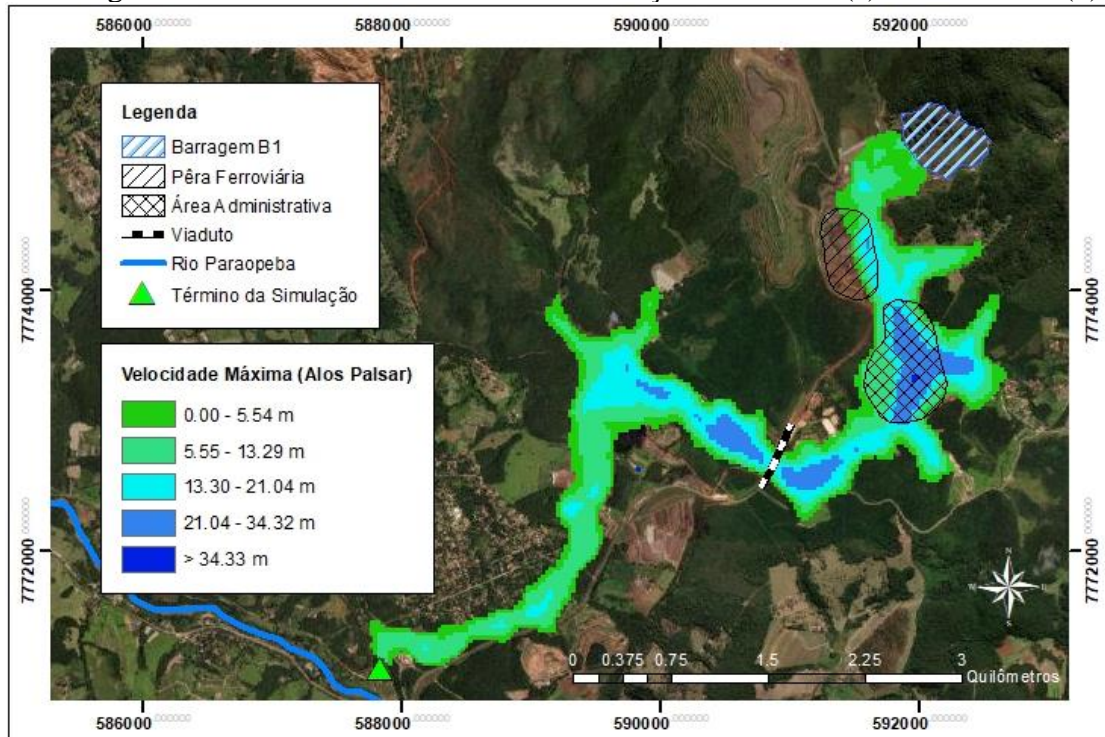
casos quadruplicando este valor, sobretudo nas áreas de circulação humana como a área administrativa sobretudo com o avanço da onda sobre equipamentos, instalações e destroços, que aumentaram o poder destrutivo do fluxo.

#### 4.4 Profundidade Máxima da Inundação

A Figura 53 mostra os resultados obtidos para a profundidade da inundação pela onda de rejeitos sobre a estrutura administrativa da Mina Córrego do Feijão e adjacências. Os estudos de Atif, Cawood e Mahboob (2020), mostraram por análise de satélite, que muitas terras agrícolas foram varridas e deixadas sob um mar de lama com profundidades de cerca de 8 m.

Nos mapas gerados, observa-se que as profundidades foram maiores no modelo SRTM. Neste modelo, para além das áreas agrícolas anteriormente mencionadas, na área administrativa a profundidade máxima da lama atingida foi de cerca de 29.07 m, praticamente o dobro do que foi calculado modelo Alos Palsar (14.90 m). Nesta região, vídeos mostram um fluxo extremamente turbulento e destrutivo pela proximidade com a saída da barragem.

Figura 53 - Profundidade máxima da inundação em SRTM (a) e Alos Palsar (b).

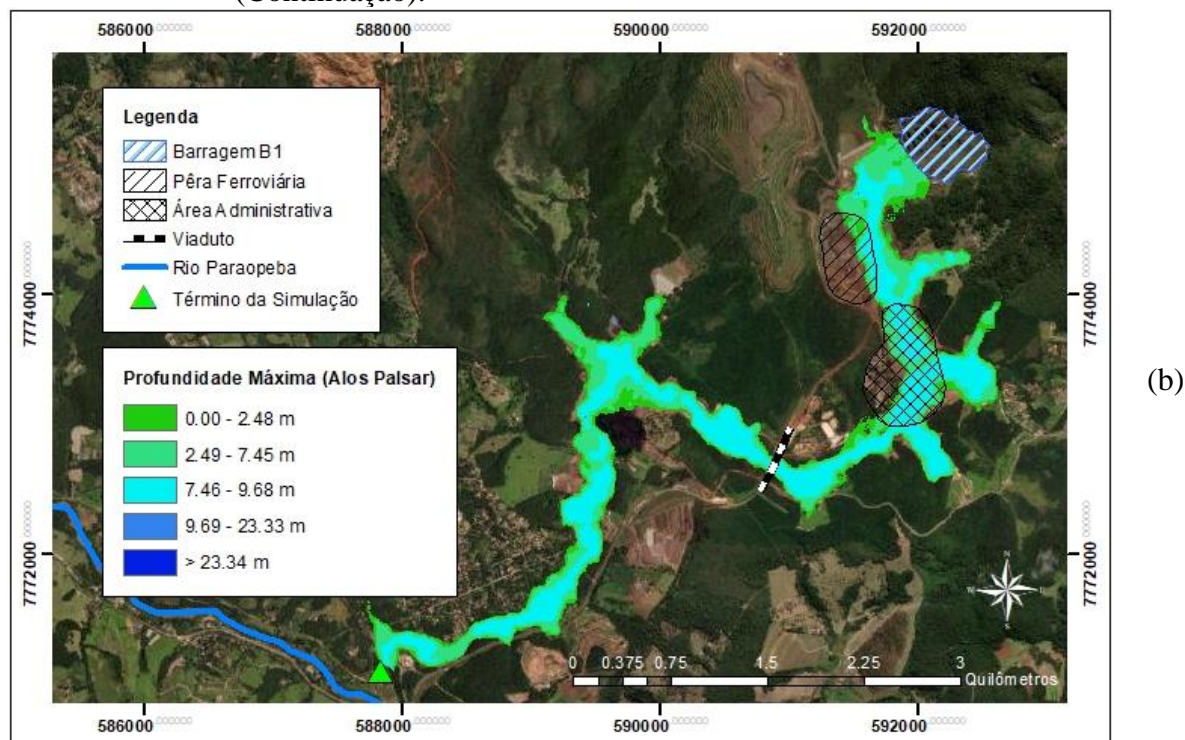


(a)

(Continua)



Figura 53 – Profundidade máxima da inundação em SRTM (a) e Alos Palsar (b).  
(Continuação).



Fonte: A Autora (2021).

Na região do viaduto levado, a profundidade máxima chegou a 18.38 m para SRTM e 15.0 m para Alos Palsar. Na região de saída do fluxo da barragem, houve uma convergência em torno de 16 m de profundidade máxima alcançada em ambos os modelos. Estes resultados são corroborados pelas informações repassadas pelas frentes de trabalho, de que há locais onde somente a profundidade real (e não a máxima) atinge 15 metros (RONAN; VALE, 2019).

No entanto, acredita-se também que as maiores profundidades mostradas nos modelos e em especial em SRTM (chegando a mais de 34.33 m), foram questões muito pontuais podendo estar ligadas a erros de inferência do satélite. Em comparação, os autores Ramam e Liu (2019), obtiveram uma mancha de inundação em profundidade máxima da região estudada, com o MDE SRTM (FIGURA 54).

Os resultados para o modelo SRTM obtidos neste presente trabalho são diferentes aos de Ramam e Liu (2019), que utilizaram a mesma base. Mesmo sem dados para acompanhamento das profundidades, observa-se que as áreas atingidas foram divergentes. Como motivos pode-se enumerar que os autores realizaram uma modelagem preliminar poucos meses após o rompimento, onde os dados ainda eram divagantes tanto para o volume mobilizado para criação do hidrograma. A época, o próprio HEC-RAS, ainda não permitia a

análise de rompimento para fluidos não-newtonianos. E por isso, foi considerado um alto coeficiente de rugosidade = 0,3.

Figura 54 - Mancha de inundação obtida por Ramam e Liu.



Fonte: Ramam e Liu (2019).

Neste trabalho com o uso da modelagem para fluidos não-newtonianos na interface HEC-RAS 6.0 utilizou-se um coeficiente = 0.1 por já estarem incluídos na simulação dados como a concentração volumétrica e viscosidade para delimitar melhor o fluxo.

#### 4.5 Risco Hidrodinâmico

O Risco Hidrodinâmico (RH) é uma associação da taxa de velocidade em um trecho, e a altura da queda no mesmo. Afere, portanto, os riscos inerentes às áreas de maior interesse na ZAS, como a região de trabalho na pêra ferroviária, a área administrativa, e os outros locais de impacto como o viaduto que foi colapsado.

Para análise dos resultados obtidos no risco hidrodinâmico, é usualmente empregado o estudo de Synaven (2000), o qual indica intervalos de interesse para o RH aferido, com valores de referência para entendimento da geração de danos a partir da ação da onda de cheia ou de rejeitos como no caso. A classificação dada pelos autores é tradicionalmente empregada, e está representada na Tabela 15.

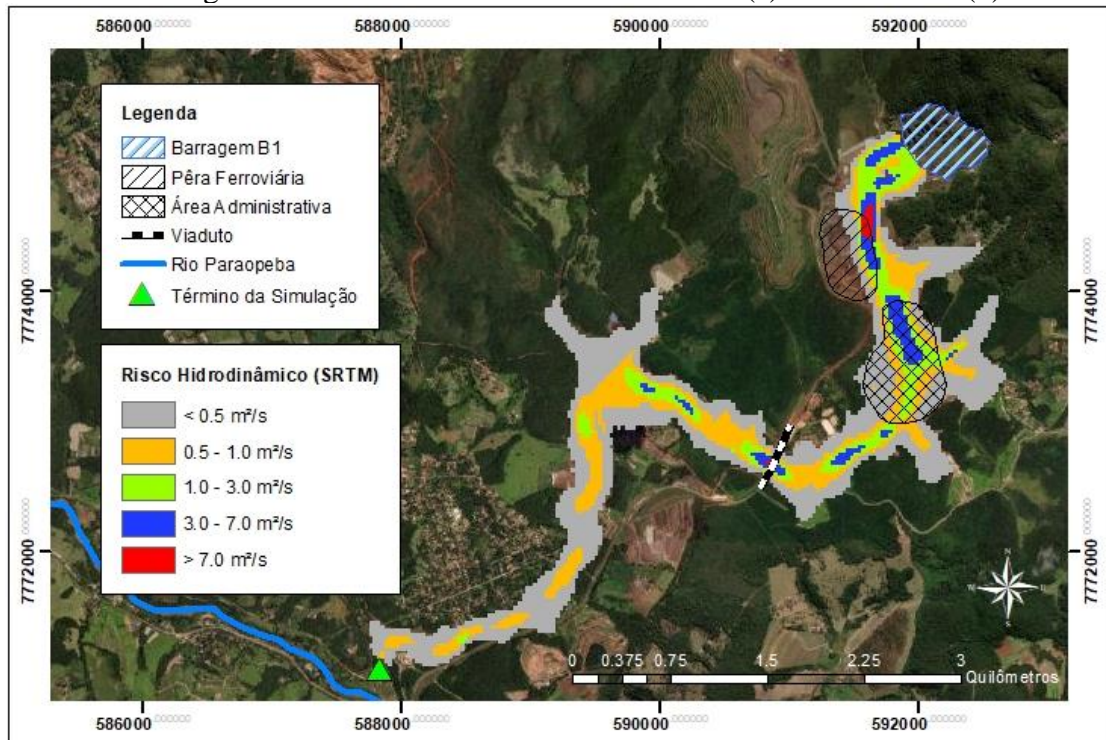
Tabela 15 - Classificação do risco hidrodinâmico.

RISCO HIDRODINÂMICO	CONSEQUÊNCIAS
< 0,5 m <sup>2</sup> /s	Crianças e deficientes são arrastados
0,5 – 1,0 m <sup>2</sup> /s	Adultos são arrastados
1,0 – 3,0 m <sup>2</sup> /s	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas
3,0 – 7,0 m <sup>2</sup> /s	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
> 7,0 m <sup>2</sup> /s	Colapso de certos edifícios

Fonte: Adaptado de Synaven, (2000).

Tendo como base estes intervalos, os resultados obtidos neste estudo estão representados analiticamente na Figura 55. É possível perceber pela classificação, que as zonas no entorno da barragem apresentam o maior RH, em função principalmente da declividade e consequente aumento da velocidade, que são base para formulação deste risco. A região imediatamente a montante da barragem também tem alto índice, em especial na área administrativa, classificada entre as cores “amarelo”, “verde” e “azul” em ambos os modelos, que se correlacionam ao intervalo de risco hidrodinâmico menor que 0,5 e maior que 7,0, podendo ter como riscos o arraste de pessoas, até danos em estruturas e colapso das estruturas.

Figura 55 - Risco hidrodinâmico em SRTM (a) e Alos Palsar (b).

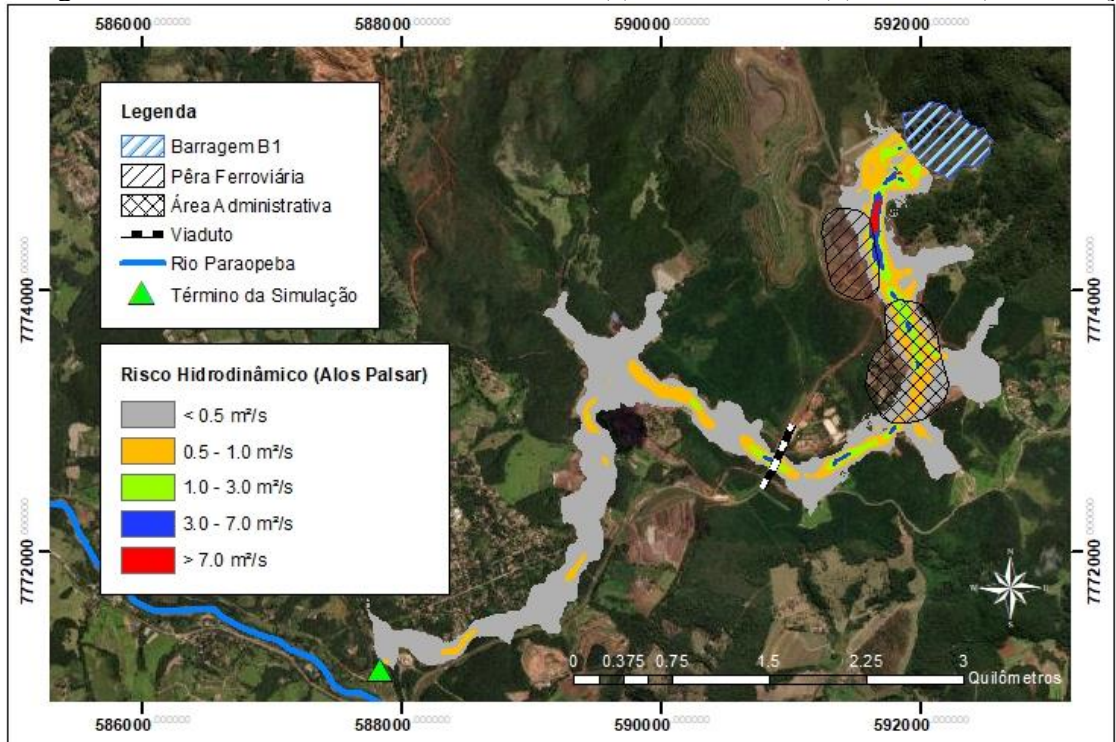


(a)

(Continua)



Figura 55 - Risco hidrodinâmico em SRTM (a) e Alos Palsar (b). (Continuação)



(b)

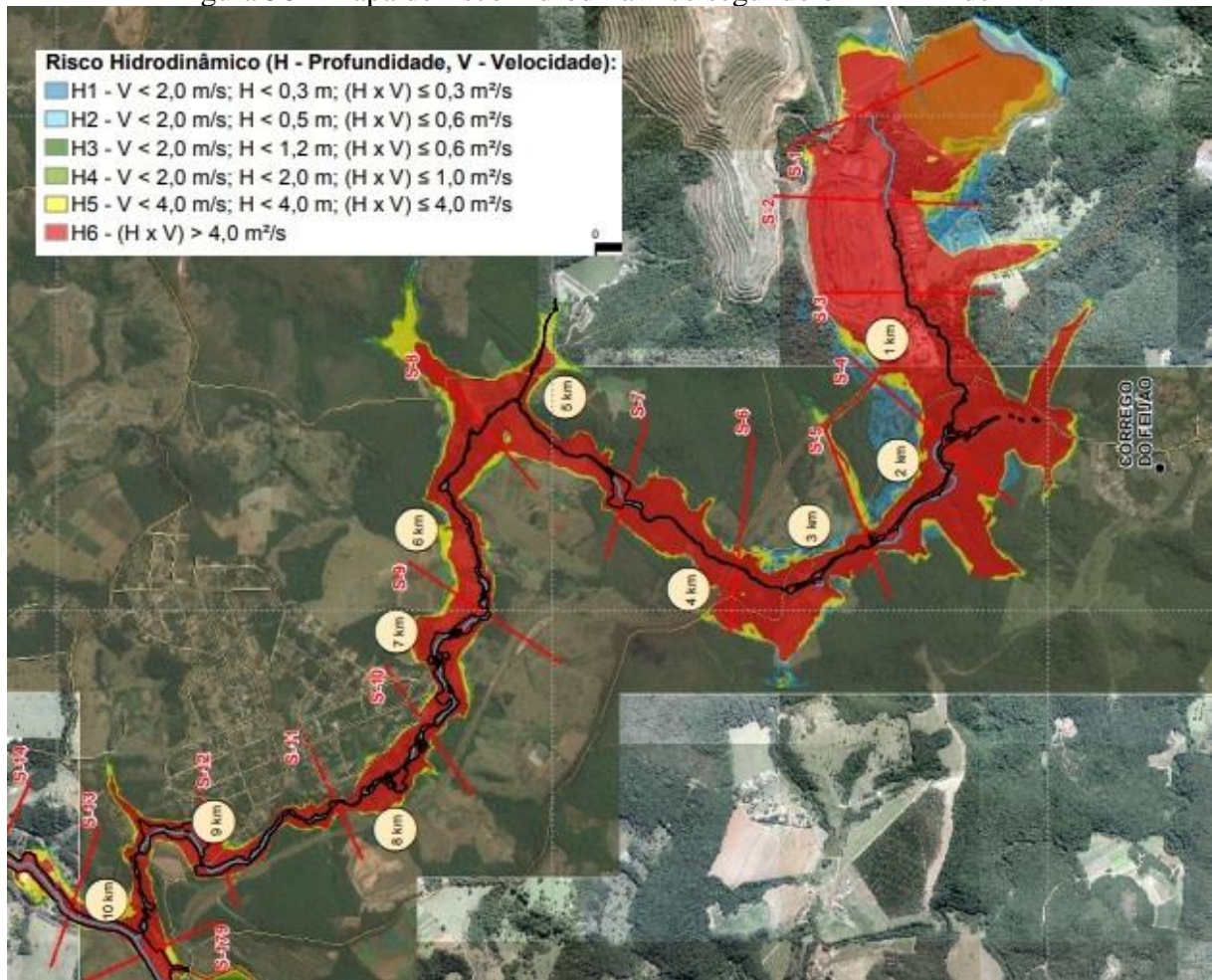
Fonte: A Autora (2021).

É interessante ressaltar que, no modelo SRTM o risco hidrodinâmico é bem maior em comparação a Alos, ficando majorado na aproximadamente a área da barragem. De certa forma, representa melhor a condição de risco encontrada realmente na área administrativa, onde sabe-se que houve o maior dano. Estas questões podem ainda ser validas em observação aos estudos de Lima et al. (2020b), que apresenta uma separação do mapa da ZAS em “Zonas de Capacidade Destrutiva”, cabendo à região imediatamente a jusante da barragem uma ZDC4 - “Zona de Capacidade Extremamente Destrutiva”, área de alta mortalidade relacionada à avalanche de detritos e o fluxo de alta energia; e na região da área administrativa e proximidades, ZDC3 - “Zona de Altíssima Capacidade Destrutiva”, com fluxo de detritos de baixa energia, mas com capacidade destrutiva em relação a edifícios, árvores, veículos, etc.

O trabalho anteriormente mencionado mostra similaridade quando comparado aos dados obtidos no risco hidrodinâmico para as áreas mais críticas sendo a chamada ZDC4 e ZDC3 representativas das áreas habitadas no entorno e administrativa da mina. A comparação da zona de risco pode ainda contemplar o estudo de *dam break* de B1 (POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA; TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS; AMPLO ENGENHARIA, 2018), na Figura 56.



Figura 56 - Mapa de risco hidrodinâmico segundo o PAEBM de B1.



Fonte: Adaptado de Potamos Engenharia e Hidrologia; Tüv Süd Bureau De Projetos; Amplo Engenharia (2018).

É notável a diferença entre os valores considerados para o risco hidrodinâmico gerado no modelo, e o resultado obtido para o *dam break* de composição do PAEBM de B1, onde o índice de RH é finalizado em  $4,0 \text{ m}^2/\text{s}$ . Este fato pode ser explicado pela consideração de uma metodologia diferente de classificação, conforme Quadro 13.

Quadro 13 - Critérios para classificação do risco hidrodinâmico e da ameaça potencial.

Classificação	Danos	Critério de classificação	Representação em mapas
H1	Não se tratando de exceções, área segura para veículos, pessoas e benfeitorias.	$V < 2,0 \text{ m/s}$ ; $H < 0,3 \text{ m}$ ; $(H \times V) \leq 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$	Azul

(Continua)

Quadro 13 - Critérios para classificação do risco hidrodinâmico e da ameaça potencial. (Continuação).

H2	Veículos pequenos (exceto SUV e afins) sujeitos a dano	$V < 2,0 \text{ m/s}; H < 0,5 \text{ m}; (H \times V) \leq 0,6 \text{ m}^2/$	Azul Claro
H3	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos, perigoso para crianças e idosos	$V < 2,0 \text{ m/s}; H < 1,2 \text{ m}; (H \times V) \leq 0,6 \text{ m}^2/s$	Verde
H4	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas	$V < 2,0 \text{ m/s}; H < 2,0 \text{ m}; (H \times V) \leq 1,0 \text{ m}^2/s$	Verde Claro
H5	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas. Todas as benfeitorias estão sujeitas a danos estruturais e benfeitorias com estruturas menos reforçadas* estão sujeitas a dano total.	$V < 4,0 \text{ m/s}; H < 4,0 \text{ m}; (H \times V) \leq 4,0 \text{ m}^2/s$	Amarelo
H6	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas. Todas as benfeitorias estão sujeitas a dano total.	$(H \times V) > 4,0 \text{ m}^2/s$	Vermelho

Fonte: Adaptado de Potamos Engenharia e Hidrologia; Tüv Süd Bureau de Projetos; Amplo Engenharia (2018).

Desta forma, pode-se equivaler os índices H1, H2 e H3 ao índice 1 de Synaven (2000), (Tabela 15) o índice H4 ao índice 2, H5 aos índices 3 e 4 (atuação das forças hidrostáticas, empuxo, forças hidrodinâmicas, impulso, impactos de sólidos) e H6 ao índice 5, onde há convergência para a abrangência de danos a todos os tipos de veículos e pessoas. Pode-se dizer que o índice encontrado para o *dam break* de B1 trata a situação com o maior grau de risco em quase toda a extensão até o Rio Paraopeba. Vale ressaltar que diferente deste estudo, os profissionais que realizaram o estudo de *dam break* formulado para B1 visaram obter o cenário de pior situação possível, associando condições de chuvas intensas e o rompimento conjunto de todas as estruturas, incluindo todas as barragens e às vezes, as pilhas.

Na situação real, Atif, Cawood e Mahboob (2020), mostraram em análise por satélite, na qual um total de 109 edifícios foram danificados; 36 pertenciam à Vale e 73 restantes eram

residências locais. Acredita-se que o risco hidrodinâmico aferido nesta situação está condizente para a proposta de retroanálise, onde as condições aferidas não são as piores possíveis, mas as condições de controle no momento da ruptura.

Assim como apresentado em Cabral et al. (2016), com a calibração feita, a modelagem hidráulica feita no HEC-RAS® 6.0 em associação ao hidrograma do HEC-HMS® 4.7.1, quando se relaciona o coeficiente de Manning adotado apresentou-se como uma forma confiável de verificação deste tipo de evento.

No entanto, ainda que não aferido segundo a pior situação possível, o risco hidrodinâmico, apresentou valores altíssimos e inaceitáveis para as boas técnicas, uma vez que extrapolam em ambos os modelos, todos os valores razoáveis de segurança dados pela literatura técnica, em respeito principalmente as zonas “habitáveis” no caminho a jusante da barragem.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta retroanálise mostram divergências com os dados fornecidos pelo PAEBM da Barragem B1, onde apesar da utilização do mesmo *software* para formulação da ruptura hipotética, no estudo de Potamos Engenharia e Hidrologia; Tüv Süd Bureau de Projetos e Amplo Engenharia (2018), os profissionais relatam que a modelagem se deu por um modelo newtoniano com adaptações, uma vez que o HEC-RAS® ainda não havia implementado a incorporação para *debris* e *mud flow*. No estudo, há a indicação de que “a despeito dos bons resultados atribuídos aos modelos newtonianos, espera-se que o desprezo das forças viscosas e demais interações entre partículas apresente prognósticos de inundações mais extensas considerando todo o trecho analisado”. Esta condição ficou evidente em comparação com este trabalho, uma vez que a consideração dos parâmetros reológicos dos rejeitos neste estudo resultou em uma mancha de inundação menos conservadora do que a estudada por aqueles autores.

Com a inserção das informações reológicas, foi possível definir as envoltórias de inundação com boa previsibilidade a despeito das limitações de resolução dos MDE’s utilizados nas áreas a serem inundadas. As estimativas de tempo de chegada da lama na área administrativa foram assertivas na simulação com Alos Palsar (cerca de 30 segundos), em comparação com o resultado de observação do fluxo em vídeos por American Geophysical Union (2019) (25 segundos). Em SRTM, obteve-se um resultado para chegada na área administrativa de (144 segundos), mais próximo de Yu, Tang e Chen (2020) (150 segundos). Entende-se que no caso de Alos Palsar, houve uma situação mais fiel ao ocorrido, o que é um

bom resultado por se tratar do principal parâmetro para formular planos de segurança e monitorar pontos críticos na ZAS. As referências para as zonas críticas foram mais assertivas no caso da aferição pelo modelo Alos Palsar, visto que SRTM pela sua menor resolução, tende a majorar os resultados obtidos.

Na aferição da velocidade do fluxo, os valores dos relatórios (AGU, 2019) foram próximos dos encontrados neste estudo, sobretudo no modelo Alos Palsar pela velocidade para região da barragem: 25,52 m/s, e na área administrativa: 17,94 m/s, sendo este modelo criado, considerado de boa aferição técnica pelos resultados gerados. O modelo apesar das limitações se mostrou favorável em grande parte aos preceitos técnicos.

Por fim, pode-se concluir que o caso de B1 se mostra uma situação excepcional de estudo, onde todas as estruturas de interesse para a ZAS se encontram muito próximas à barragem, com tempos de chegada muito restritos, sobretudo diante do rompimento por liquefação. Os avanços na tecnologia do uso de SIG's – Sistemas de Informação Geográfica permitem simulações em grande escala como as realizadas neste estudo, prevendo entre outros, a própria inundação e a deposição de sedimentos ao longo do trajeto. É perceptível que neste caso, a modelagem dada pelo MDE Alos Palsar foi mais assertiva pela sua maior resolução para a topografia e dinâmica de leito de rios.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. B. **Emergência e Gestão do Risco**. In: Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 2001. 104p

AMERICAN GEOPHYSICAL UNION. **The Speed of the Brumadinho Tailings Dam Landslide**. Washington: AGU, 2019. 1 p. Disponível em: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/02/04/brumadinho-tailings-dam-landslide/>. Acesso em: 01 jul. 2021.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 17 maio 2017.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019**. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. Brasília, 15 de fevereiro 2019.

ANTONIO, Gabriela Branquinho *et al.* Modelagem Preliminar da Ruptura da Barragem de Brumadinho/MG. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física e Aplicada, 18., 2019, Brasília. **Anais [...]**. Fortaleza: SBGFA, 2019. p. 1-13.

ASF DATA SEARCH VERTEX. **Alos Palsar**. 2011. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

ATIF, I.; CAWOOD, F.T.; MAHBOOB, M.A. Modelling and Analysis of the Brumadinho Tailings Disaster Using Advanced Geospatial Analytics. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 120, n. 1, p. 450-414, jul. 2020.

BALBI, Diego Antonio Fonseca. **Gestão e Desempenho de Barragens: Planos de Ação de Emergência**. In: Curso de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília: ANA, 2011. 143 p.

CABRAL, Samuellson Lopes *et al.* Integração do SIG, Hec/HMS e Hec/RAS no Mapeamento de Área de Inundação Urbana: Aplicação à Bacia do Rio Granjeiro-CE. **Geociências**, São Paulo, p. 90-101, jan. 2016.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Relatório da Comissão Parlamentar de Inquérito**. Brasília: Câmara dos Deputados. 2019. 2287 p.

CIAEA – COMISSÃO INDEPENDENTE DE AVALIAÇÃO EXTRAORDINÁRIA DE APURAÇÃO. **Sumário Executivo do Relatório da Investigação Independente: Rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão – Brumadinho, MG.** 2019. 50 p.

GIBSON, S. *et al.* Comparing Single-Phase, Non-Newtonian Approaches with Experimental Results: Validating Flume: Scale Mud and Debris Flow in HEC-RAS. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.L.], v. 46, n. 3, p. 540-553, 19 jan. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.5044>.

GOOGLE EARTH. Cidade de Brumadinho. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em 01 mai. 2021.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Rompimento de barragem destruiu 269,84 hectares em Brumadinho (MG).** 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2019/01/rompimento-de-barragem-destruiu-269-84-hectares-em-brumadinho-mg>. Acesso em: 01 jun. 2021.

IGAM. **Avaliação da Qualidade das Águas e Sedimentos do Rio Paraopeba.** Disponível em [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/ACOES\\_RECUPERACAO\\_PARA\\_OPEBA/Caderno\\_1\\_ano\\_Igam\\_desastre\\_Brumadinho.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/ACOES_RECUPERACAO_PARA_OPEBA/Caderno_1_ano_Igam_desastre_Brumadinho.pdf)> Acesso em: 05 de jun. 2021.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Topodata: Base de Dados Geomorfométricos do Brasil.** 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em 01 jun. 2021.

KOPPE, Jair Carlos. Lessons Learned From the Two Major Tailings Dam Accidents in Brazil. **Mine Water and The Environment**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 166-173, 28 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>.

LAURIANO, André William. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação Entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS.** 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LIGIER, Pierre-Louis. Implementation of Non-Newtonian Rheological Models in TELEMAC-2D. In: Breugem, W. Alexander; Frederickx, Lesley; Koutrouveli, Theofano; Chu, Kai; Kulkarni, Rohit; Decrop, Boudewijn (Hg.). **Proceedings.** Antwerp: International Marine & Dredging Consultants, 2020. p. 14-25.

LIMA, Renato Eugenio de *et al.* An Anthropogenic Flow Type Gravitational Mass Movement: the Córrego do Feijão Tailings Dam Disaster, Brumadinho, Brazil. **Landslides**, [S.L.], v. 17, n. 12, p. 2895-2906, 23 jul. 2020a. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-020-01450-2>.

LIMA, Rodrigo Pereira *et al.* Assessment of Digital Terrain Models in Dam Break Simulation Studies. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.L.], v. 27, p. 1-20, jun. 2020b. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702021000100005>.



LUMBROSO, Darren *et al.* Modelling the Brumadinho Tailings Dam Failure, the Subsequent Loss of Life and How it Could Have Been Reduced. **Natural Hazard and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 1-24, 4 jun. 2020. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-2020-159>.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Procedimento Investigatório Criminal n.º MPMG-0090.19.000013-4**. Belo Horizonte: MPMG, 2019. 477 p.

MURDIANI, Kiki Marina *et al.* Pemodelan Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS 2D Studi Kasus Bendungan Gondang, Kabupaten Karanganyar. **Rekayasa**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 205-211, 1 ago. 2020. University of Trunojoyo Madura. <http://dx.doi.org/10.21107/rekayasa.v13i2.6872>.

O'BRIEN, Y Jim S.; JULIEN, D Pierre Y. Laboratory Analysis of Mudflow Properties. **J. Hydraul. Eng.**, Denver, v. 114, n. 8, p. 877-887, Jan. 1988.

PAIVA, Camila Adriane de. **Contribuições dos Estudos de Dam Break às Ações da Defesa Civil**. 2020. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

PF – POLÍCIA FEDERAL. **Laudo n.º 1070/2019 – SETEC/SR/PF/MG**. Belo Horizonte: PF, 2019. 207 p.

POTAMOS ENGENHARIA E HIDROLOGIA; TÜV SÜD BUREAU DE PROJÉTOS; AMPLO ENGENHARIA. **Cálculo Do Risco Monetizado Para Barragens e Diques - Barragem I**: Relatório Técnico Estudo de Ruptura Hipotética - Dam Break. Brumadinho: Potamos, 2018. 136 p.

PSOMIADIS, Emmanouil *et al.* Potential Dam Breach Analysis and Flood Wave Risk Assessment Using HEC-RAS and Remote Sensing Data: a multicriteria approach. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 364, 31 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13030364>.

RAMAN, Arun; LIU, Fei. An Investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC-RAS Simulation. **Computational Physics**, Nova York, v. 1, n. 1, p. 1-16, nov. 2019.

ROBERTSON, Peter K. *et al.* **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I**. Columbia: Expert Panel, 2019. 81 p.

ROCHA, Felipe Figueiredo. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RONAN, Gabriel; VALE, João Henrique do. **Profundidade de rejeitos em Brumadinho pode chegar a até 15 metros**. Belo Horizonte: Estado de Minas, 2019. Disponível em:

[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/01/27/interna\\_gerais,1025145/profundidade-de-rejeitos-em-brumadinho-pode-chegar-a-ate-15-metros.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/01/27/interna_gerais,1025145/profundidade-de-rejeitos-em-brumadinho-pode-chegar-a-ate-15-metros.shtml). Acesso em: 25 jun. 2021.

SILVA, Tiago; MAIA, Rodrigo; PINTO, Pedro. Estudo de Escoamentos Variáveis em Canais Naturais. Aplicação ao Caso de Ruptura de Uma Barragem: Unsteady Flow Study in Natural Channels: Application To a Dam Break's Case. In: Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 6., 2011, Porto. **Anais [...]**. Porto: FEUP, 2011. p. 127-137.

SISWANTO, Siswanto; SUPRAPTO, Suprpto; HUDA, Adib Lathiful. Pendekatan GIS dalam Pemodelan Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS 2D (Studi Kasus Bendungan Logung, Kabupaten Kudus). **Rekayasa**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 112-119, 31 out. 2019. University of Trunojoyo Madura. <http://dx.doi.org/10.21107/rekayasa.v12i2.5807>.

SYNAVEN, K. **The Pilot Project Kyrkojarvi Dam and Reservoir, Seinajoki, Finland**. In: Internacional Seminal and Workshop Risk Assesment, Dam-Break Flood Analisis and Emergency Action Planning. 2000. Seinajoki: Finnish.

TRTMG – TRIBUNAL REGIONAL DO TRABALHO DE MINAS GERAIS. **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho: Rompimento da Barragem BI da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019**. Belo Horizonte: TRTMG, 2019. 240 p.

TÜV SÜD BUREAU DE PROJETOS. **Revisão Periódica de Segurança de Barragem: Mina Córrego do Feijão - Barragem I - Relatório Técnico**. Brumadinho: TÜV SÜD, 2018. 265 p.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS 6.0**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

WISEU, T. **Segurança dos Vales a Jusante de Barragens – Metodologias de Apoio à Gestão dos Riscos**. 2006. 482f. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

YU, Dayu; TANG, Liyu; CHEN, Chongcheng. Three-Dimensional Numerical Simulation of Mud Flow from a Tailing Dam Failure Across Complex Terrain. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 727-741, 16 mar. 2020. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-20-727-2020>.

## TERCEIRA PARTE – CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

### 1 CONCLUSÕES GERAIS

É importante ressaltar que a realização de uma retroanálise não contempla a indicação de responsabilidade do ocorrido, mas sim um entendimento de precisão entre metodologias, sendo as fontes consultadas de domínio público e acesso universal, podendo existir incertezas. Uma delas está relacionada a inserção de parâmetros que por muitas vezes, são arbitrados pelo entendimento técnico em detrimento do uso de documentos de aferição que muitas vezes não estão disponíveis livremente, necessitando de tentativas/erros para formulação dos melhores parâmetros de representação real.

O uso do hidrograma retirado do HEC-HMS apresentou limitações quanto ao modo de falha, uma vez que este *software* pressupõe a falha apenas por *piping* e galgamento. Como situação mais próxima à de liquefação, optou-se pela falha em *piping*, buscando a indução de valores que induzam a simulação a um maior pico de vazão em um menor tempo, tal como acontece na situação real. Apesar dos resultados finais terem sido satisfatórios, entende-se que esta é uma limitação de entendimento complexo na geração do hidrograma de ruptura.

Nas simulações do HEC-RAS optou-se por calibrar o modelo com o Coeficiente de Rugosidade de Manning recomendado por Rocha (2015), entre 0,1; 0,2 e 0,3, para ajuste do *software* da técnica de “*pseudomanning*”. Realizadas as simulações, obteve-se em todos os casos uma relação melhor com a situação real utilizando 0,1, ao contrário de outros trabalhos onde a simulação acontece usando a rugosidade = 0,3. Neste trabalho ao ativar a função de análise por fluidos não newtonianos, não são necessários maiores ajustes para que ocorra o “*flow*” do material contido. Pelo contrário, a calibração com a rugosidade de 0,2 ou 0,3 tendeu a minorar a mancha de inundação, a velocidade e o risco, uma vez que o modelo tendeu a “reter” mais o material considerando-o um fluido muito concentrado para escoar livremente.

Por fim, pode-se mostrar que os modelos gerados a partir do modelo Alos Palsar pela sua maior resolução espacial, tenderam a ter informações mais confiáveis em Brumadinho e Mariana. Mesmo com as limitações do modelo, pode-se observar que as zonas de risco foram bem delimitadas e os resultados foram satisfatórios quando comparados às referências técnicas disponíveis, e aos conceitos técnicos de interpretação de engenharia. No entanto, recomenda-se que a análise pra formulação de estudo de *dam break* seja realizada com o maior detalhamento possível, isto é, com a obtenção por aerofotogrametria de Modelos Digitais do Terreno – MDT, onde as interferências de vegetação e outros, sejam minoradas.

## 2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma geral, com os resultados obtidos neste trabalho, recomenda-se as seguintes investigações para trabalhos futuros:

1. Realização de testes com Hidrograma de Decaimento Parabólico para comparar os resultados simulados para uma falha por liquefação em detrimento do *software* HEC-HMS, buscando a melhor maneira de ser ajustar a falha por liquefação nestes casos.
2. Obtenção de MDE's mais precisos a partir de levantamentos topobatimétricos obtidos nos locais de estudo para realização da retroanálise;
3. Estudo sobre a influência da barragem de Santarém e sua contribuição no desenvolvimento da onda à jusante até a chegada em Bento Rodrigues;
4. Realizar os estudos para cenários de *rainy day*, onde há maior interferência no fluxo de rejeitos.