



LIZIANE SILVA

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM B1 DE BRUMADINHO:
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA MANCHA DE
INUNDAÇÃO DO MODELO MUK3D COM O CENÁRIO REAL**

**LAVRAS – MG
2021**

LIZIANE SILVA

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM B1 DE BRUMADINHO:
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA MANCHA DE
INUNDAÇÃO DO MODELO MUK3D COM O CENÁRIO REAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

LIZIANE SILVA

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM B1 DE BRUMADINHO:
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA MANCHA DE
INUNDAÇÃO DO MODELO MUK3D COM O CENÁRIO REAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 19 de novembro de 2021.
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA
Prof. Dr. Lucas Henrique Pedrozo Abreu
Prof. Dr. Geovane Junqueira Alves



Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Sueli e Oriel, por todo apoio e dedicação desde o início da minha vida. Vocês sempre se empenharam e me proporcionaram uma bela educação para que eu pudesse viver toda essa experiência acadêmica passando por altos e baixos, mas sempre seguindo em frente.

Obrigada Lorryne e Layane, minhas irmãs que sempre estiveram ao meu lado. Me inspirei na caminhada de cada uma, e sei que estou aqui hoje pois pude apoiar em vocês e crescer com ótimas referências.

Aos meus amigos que estiveram comigo do início ao fim dessa caminhada, sem vocês sei que nada disso seria possível. Afinal, nesses últimos 5 anos vocês foram a minha família, minha gratidão a todos vocês que de alguma forma fizeram desses anos mais leves e felizes.

Carlos Rogério, meu orientador, por me auxiliar e se mostrar disposto sempre quando precisei.

Gabrielly e Paloma, amigas da WALM Engenharia, que compartilharam seus conhecimentos e paciência para desenvolvimento desse estudo, que abriram caminho e me incentivaram a isso. A Flávia, que confiou em mim e me deu a oportunidade de entrar na empresa e atuar na área que hoje tanto amo. Tenho vocês como referência para mim.

Raquel, me faltam palavras para agradecer ao companheirismo, apoio, amizade e amor que você transbordou nessa caminhada.

Por fim, a Universidade Federal de Lavras, pela ótima estrutura e pelas oportunidades oferecidas. Um lugar onde fiz amizades incríveis, me conheci e reconheci, vivi intensamente meus dias e terei sempre memórias incríveis.

RESUMO

As barragens são grandes elementos estruturais da Engenharia Civil, estruturas que propiciam o represamento e oferecem benefícios para a humanidade. Porém, também são consideradas como estruturas com alto risco potencial associado. Esse risco pode estar ligado ao volume de armazenamento ou ao tipo de material reservado. Desta forma, é de extrema importância a realização de estudos de Ruptura Hipotética, também chamado de “*DamBreak*”, o qual compreende a caracterização da propagação da onda de cheia e a delimitação das áreas potencialmente inundáveis. Esse estudo apresenta a mancha de inundação do cenário de ruptura da Barragem B1 da Mina Córrego do Feijão, por meio do estudo de *dambreak*, utilizando o *software* MUK3D, desenvolvido pela MineBridge. O objetivo é verificar a eficácia do modelo MUK3D comparando as manchas de inundação resultantes das simulações para diferentes cenários com o cenário real decorrente da ruptura da Barragem B1, que ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019, ocasionando grande impacto social e ambiental no município de Brumadinho e cidades a jusante da estrutura. Para a análise foram utilizadas diferentes declividades na deposição do rejeito dentro do reservatório e três ângulos de deposição na ruptura, a fim de obter o cenário mais próximo do real. Com base nos resultados dos cenários com distintas declividades, foi possível perceber que declividades menores atingiram porções mais distantes e cotas mais baixas, enquanto declividades maiores preencheram cotas mais altas. Para obtenção do melhor resultado foi realizada a sobreposição das manchas de diferentes declividades com a mancha real, a qual a mancha com declividade de 1,5% se aproximou mais do resultado esperado. Por fim, a partir dos resultados obtidos da comparação da simulação com os dados reais, conclui-se que para estudos preliminares e simplificados o modelo se mostra satisfatório, sendo sensíveis os resultados ao nível de detalhe das bases topográficas do local de estudo.

Palavras-chave: Modelagem hidrodinâmica. Mancha de inundação. Rompimento de Barragem. Brumadinho. MUK3D.

ABSTRACT

Dams are great elements that introduce Civil Engineering, structures that provide damming and benefits for humanity. However, they are also considered as structures with a high potential associated risk. This risk can be linked to the volume of storage or the type of material reserved. Thus, it is extremely important to carry out Hypothetical Rupture studies, also called “DamBreak”, which comprises the characterization of the flood wave propagation and a delimitation of potentially floodable areas. This study presents a flood spot of the B1 Dam failure scenario at Córrego do Feijão Mine, through a dambreak study, using the MUK3D software, developed by MineBridge. The objective is to verify the effectiveness of the MUK3D model by comparing the simulation of floods in the simulations for different scenarios with the real scenario resulting from the rupture of Dam B1, which occurred on January 25, 2019, causing a great social and environmental impact in the municipality of Brumadinho and cities downstream of the structure. For the analysis, different slopes were used in the tailings deposition inside the reservoir and three deposition angles in the rupture, in order to obtain a scenario closer to the real one. Based on the results of scenarios with different slopes, it was possible to notice that smaller slopes reached more distant portions and lower elevations, while larger slopes filled higher elevations. To obtain the best result, an overlapping of the spots with different slopes was performed with a real spot, a qualification of the spot with a slope of 1.5% was closer to the expected result. Finally, from the results obtained from the comparison of simulated results with real data, it is concluded that for preliminary and simplified studies the model is satisfactory, being sensitive to the results at the level of detail of the topographic bases of the study site.

Keywords: Hydrodynamic modeling. Flooded area. Dam Break. Brumadinho. MUK3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Recorrência e causas de ruptura de barragens de rejeitos.....	17
Figura 2 – Ruptura por liquefação da Barragem B1 de Brumadinho.....	18
Figura 3 – Cenário final da Barragem B1.....	19
Figura 4 – Cenários adotados na modelagem para estudo de ruptura hipotética.	22
Figura 5 – Exemplo de formação da brecha de uma barragem.	23
Figura 6 – Vista aérea da Barragem B1e B6 em junho de 2014.	26
Figura 7 – Área de contribuição da Barragem B1.	27
Figura 8 – Talvegue principal que foi realizada modelagem da mancha de inundação.	28
Figura 9 – Modelagem da brecha no MUK3D.....	29
Figura 10 – Representação do volume lançado pelo MUK3D.....	30
Figura 11 – Área de contribuição total e uso do solo da Barragem B1.	33
Figura 12 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia ALOS e declividade 1%.....	36
Figura 13 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia SRTM e declividade 1,0%.....	37
Figura 14 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia ALOS e declividade 1,5%.....	37
Figura 15 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia SRTM e declividade 1,5%.....	38
Figura 16 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia ALOS e declividade 2%.....	38
Figura 17 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia SRTM e declividade 2%.....	39
Figura 18 – Mancha de inundação com sobreposição das manchas geradas pelas declividades 1,5% e 2% - Topografia ALOS.	39
Figura 19 – Mancha de inundação com sobreposição das manchas geradas pelas declividades 1,5% e 2% - Topografia SRTM.....	40
Figura 20 – Comparação da mancha real de ruptura com as manchas das bases topográficas simuladas.	41
Figura 21 – Comparação da mancha real de ruptura com as manchas de com diferentes volumes depositados.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores referentes à brecha para estimar volume de rejeitos lançados.	32
Tabela 2 – Resumo dos parâmetros físicos e hidrológicos da bacia hidrográfica da B1.	33
Tabela 3 – Resultado da modelagem da estrutura no modelo MUK3D e valores da VALE. ...	34
Tabela 4 – Resultados do volume total de rejeitos por diferentes elevações e declividade da brecha – Topografia ALOS.	35
Tabela 5 – Resultados do volume total de rejeitos por diferentes elevações e declividade da brecha – Topografia SRTM.	35
Tabela 6 – Área das manchas de inundação.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação	12
1.2	Organização do trabalho	13
2	OBJETIVOS	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	Barragens de rejeito	15
3.2	Ruptura de barragens	15
3.2.1	Ruptura por liquefação	18
3.2.2	Ruptura por galgamento.....	19
3.2.3	Ruptura erosão interna (<i>Piping</i>)	19
3.2.4	Ruptura por falha na fundação.....	19
3.3	PAE – Plano de Ações Emergenciais	20
3.4	Modelos de ruptura de barragem	21
3.5	MUK 3D	23
3.5.1	Volume de rejeitos lançados	24
4	METODOLOGIA	25
4.1	Descrição da área de estudos	25
4.2	Moledo MUK3D.....	28
4.2.1	Estimativa do volume de rejeitos lançados	28
4.2.2	Bases topográficas	30
4.2.3	Elevação da brecha.....	31
4.2.4	Geração da mancha de inundação (<i>DamBreak</i>)	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	Resultados da implantação do maciço	33
5.2	Volumes de rejeitos lançados.....	34
5.3	Resultado das manchas de inundação (<i>DamBreak</i>).....	36

5.4	Comparação das manchas com o cenário real.....	41
6	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes elementos estruturais da Engenharia Civil são as barragens, estruturas artificiais que necessitam de um represamento em cursos d'água e que há mais de cinco séculos oferecem alguns benefícios para a humanidade. Desses benefícios podem ser citados, irrigação, geração de energia elétrica, contenção de rejeitos de mineração, abastecimento público, controle de cheias e algumas outras funções (CARMO, 2013).

Embora essas obras resultem em grandes benefícios, também são consideradas como estruturas com alto risco potencial associado. Esse risco pode estar ligado ao volume de armazenamento ou ao tipo de material reservado. No caso de haver uma ruptura do maciço, a onda gerada por esse volume e material armazenado no reservatório pode ocasionar uma alteração significativa na vazão do rio em que a estrutura está projetada, e como efeito trazer uma grande devastação para a área a jusante, como, destruição de propriedades ou cidades, perdas de vidas humanas, alteração na fauna e flora local, dependendo do tipo de material armazenado, o acidente pode se tornar ainda mais prejudicial afetando quilômetros de rio a jusante e gerar um grande e por longo tempo, gerando impacto ambiental.

Após alguns acidentes ligados à ruptura de barragens no mundo, vários países criaram sua própria legislação sobre a segurança de barragens. Atualmente, no Brasil, nos projetos de construção de barragens é necessária a elaboração do PAE (Plano de Ação de Emergência). Esse documento precisa estar de acordo com os preceitos e os requerimentos estabelecidos pela Portaria da ANM N° 70.389 de 17 de Maio de 2017 (DNPM, 2017). A promulgação dessa portaria foi realizada depois que no ano de 2015, no dia 5 de novembro, no município de Mariana-MG, aconteceu um dos maiores acidentes com barragens de rejeito do mundo. A Barragem de Fundão, a qual era utilizada para acumulação de rejeitos da extração de minério de ferro, pela Mina do Germano, da mineradora Samarco se rompeu.

O acidente no município de Mariana, no estado de Minas Gerais, provocou diversos impactos sociais e ambientais e em municípios dependentes do Rio Doce, maior curso d'água afetado pelo rompimento. Além do contágio do rio com o rejeito armazenado na barragem, diversas localidades tiveram o abastecimento de água cessado, com prejuízos econômicos vultuosos e afetando também a população ribeirinha dependente da água do Rio doce. Além disso, o incidente provocou um total de 19 mortes e um desaparecido. Com isso, além da promulgação da Agência Nacional de Mineração (ANM), n° 70.389, a Lei Federal de Segurança de Barragens n° 12.344 de 20 de setembro de 2010, se tornou ainda mais fortalecida.

Posteriormente, no ano de 2019, em 25 de janeiro, ocorreu o maior acidente com barragem de rejeitos em número de mortes no Brasil. Denominada Barragem B1, de propriedade da mineradora Vale, a qual estava localizada na região do Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, rompeu-se e, ao atingir o refeitório da mina localizado a jusante da Barragem em questão de minutos, ocasionou 261 mortes e 9 desaparecidos, até o dia 26 agosto 2021, segundo o endereço eletrônico da Vale (VALE, 2021).

Depois de alguns acidentes com Barragens no Brasil e no mundo, tem-se que o estudo de ruptura hipotética de barragens de contenção de rejeitos se torna ainda mais importante, pois além garantir a segurança das estruturas, também preserva a vida da população e o bioma que habitam no vale a jusante dessas barragens. Com isso, é de extrema importância a realização do estudo de Ruptura Hipotética, também chamado de “*DamBreak*”, o qual compreende a caracterização da propagação da onda de cheia e a delimitação das áreas potencialmente inundáveis à jusante e futura elaboração do PAE.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe a avaliação e comparação da mancha causada pelo rompimento da Barragem B1, por meio da simulação hidrodinâmica realizada no modelo MUK3D, o qual é capaz de propagar o fluido presente na barragem utilizando a ângulo e volume do rejeito armazenado no reservatório. Com isso, será feita a comparação da mancha de alagamento, realizada por essa ferramenta, com o cenário real por meio de imagens áreas de domínio público.

1.1 Motivação

O presente trabalho tem como motivação a verificação da eficácia do modelo MUK3D por meio da reprodução da mancha de inundação simplificada da Barragem B1 de Brumadinho.

O modelo MUK3D exige um número reduzido de parâmetros e de dados de entrada, os quais estão disponíveis em domínios públicos. Portanto, este modelo permite a aplicação do método em qualquer região do país, sendo possível realizar a análise de informações preliminares a respeito de possíveis áreas impactadas a jusante de possíveis estruturas ranqueadas, com a obtenção do alagamento da ruptura em âmbito de extensão, e possibilitando assim tomadas de decisões mais rápidas.

1.2 Organização do trabalho

Essa monografia está organizada de forma que no Capítulo 1, é apresentada a Introdução do trabalho, incluindo o contexto histórico das Barragens de Rejeito e o cenário atual do Brasil da segurança de Barragens, abrangendo os acidentes mais recentes e a legislações atualizadas. Além disso também é apresentado a motivação do trabalho.

Posteriormente, no Capítulo 2 é apresentado os objetivos tanto geral como específicos e também a estruturação que foi adotada para descrever os resultados. Na sequência, tem-se o Capítulo 3, o qual é apresentado o referencial teórico, onde serão feitas uma revisão de literatura, essa apresentará a contextualização das Barragens de Rejeito, tipos de ruptura hipotética, conceitos e importância dos modelos hidrodinâmicos e apresentação do modelo MUK3D.

No Capítulo 4, é descrita a metodologia do estudo proposto, na qual são trabalhadas as informações e as definições topográficas que foram encontradas para elaboração da mancha de ruptura. Além disso, também é apresentado a descrição da área de estudo, abrangendo o reservatório da Barragem B1 e as bacias hidrográficas.

O Capítulo 5 apresenta a análise e a discussão dos resultados alcançados com a simulação no software MUK3D. No Capítulo 5, encontra-se ainda a observação dos parâmetros de entrada e saída do modelo em comparação ao cenário real da Barragem B1.

Por fim, no Capítulo 6, tem-se a apresentação das conclusões acerca dos resultados do modelo e a verificação da eficácia do modelo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta monografia é analisar a eficácia do modelo MUK3D para reprodução da mancha de inundação de Barragens de Rejeito a partir da comparação do resultado da mancha modelada com a mancha real da Barragem B1 de Brumadinho.

Os objetivos específicos dessa monografia são:

- Analisar os parâmetros de entrada do modelo MUK3D.
- Realizar a modelagem hidrodinâmica utilizando duas bases topográficas, disponíveis em domínio público.
- Avaliar os resultados obtidos pelo modelo com a mancha real e as dificuldades atribuídas na realização da modelagem.
- Comparar a mancha de inundação de um evento real com a do modelo, avaliando a precisão do modelo para estudos preliminares de possíveis alternativas de barragens.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Barragens de rejeito

As barragens de rejeito são grandes barreiras artificiais, as quais foram construídas com a função de conter volumes de resíduos sólidos e também líquidos provindos da exploração do minério ou atividades ligadas a indústria com a intenção de não depositar os rejeitos erroneamente no meio ambiente.

De acordo com Duarte (2008), até meados do século XV, a quantidade de rejeitos produzida pelas companhias de mineração era insignificante e com isso o descarte não era considerado um problema. Portanto, a deposição em cursos d'água ou em terrenos próximos à área de mineração não passavam por um controle ou vigilância ambiental.

Com o passar dos anos, o desenvolvimento da tecnologia e a valorização do minério fez com que alguns municípios começassem a se desenvolver em prol da mineração. Porém, a agricultura local começou a associar a baixa produção com os impactos ambientais gerados pela disposição de rejeitos nos terrenos e cursos d'água. A partir disso, no século XX, divergências entre a mineração e agricultura foram o pivô para elaboração das primeiras legislações acerca do destino final dos resíduos de mineração (DUARTE, 2008).

Atualmente, depois de vários acidentes com barragens de rejeitos no Brasil e no mundo, a segurança socioambiental tem grande importância, tanto para novas construções, quanto para empreendimentos já existentes. Com isso, a melhoria nos métodos de construção e segurança do funcionamento se tornaram mais rígidos a fim de evitar algum tipo de falha. Contudo, apesar das leis vigentes, os projetos de Engenharia continuam suscetíveis a erros de projeto, carência de supervisão adequada e até mesmo negligência nas fases de execução e operação.

3.2 Ruptura de barragens

Os eventos de rupturas de barragens estão associados a um potencial de destruição muito elevado do vale localizado a jusante da estrutura, causando prejuízos imensuráveis para a população e meio ambiente, porém, esse fenômeno tem baixa frequência. Alguns fatores podem ser determinantes para análise dessa ruptura e eles variam de acordo com a altura da barragem, características do vertedor, capacidade do reservatório, tipo do barramento e tipo de

material reservado.

A tecnologia de construção das barragens, capaz de dominar o meio ambiente através da construção civil, foi de suma importância para o desenvolvimento e evolução da sociedade, porém, quanto maior a magnitude das estruturas e alterações causadas no meio ambiente, maiores são os riscos associados à execução e operação. A partir do impacto gerado à sociedade e ao ambiente, Balbi (2008) cita que a segurança deve ser a ponto mais visado para a engenharia em todas as fases do projeto.

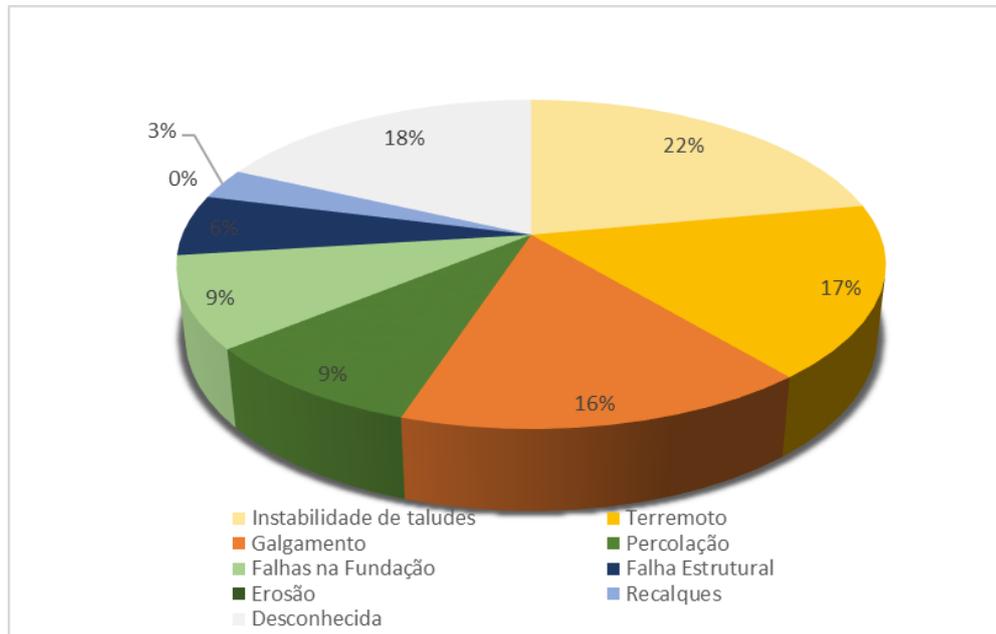
As rupturas de barragens são um fenômeno que podem ser causados por motivos naturais ou pela ação humana. Os eventos de ruptura podem ser desencadeados por um fator isolado ou pela combinação de mais de um fator (MASCARENHAS, 1990). Para as barragens de rejeito deve-se ter cuidado especial na elaboração do projeto devido às características do material armazenado e sua capacidade de contaminação e riscos ambientais associados.

Atualmente, mesmo com todas as técnicas e equipamentos tecnológicos desenvolvidos para assegurar a segurança da estrutura, acidentes continuam acontecendo. De acordo com Blight (2010), as principais causas para a ruptura das barragens são:

- Galgamento;
- erosão interna (*Piping*) e infiltração;
- falha na fundação;
- instabilidade dos taludes;
- falha estrutural;
- terremoto.

Na Figura 1 é apresentado a recorrência das causas de ruptura das barragens de rejeitos.

Figura 1 – Recorrência e causas de ruptura de barragens de rejeitos.



Fonte: Adaptado de Blight (2010).

Portanto, existem várias causas que podem resultar em uma ruptura de uma barragem. Para Duarte (2008), a perda de compreensão dos fatores de controle, como falhas na instrumentação e monitoramento, podem ser causas do acidente. As ocorrências dos eventos muitas vezes podem ser previsíveis devido às observações de campo, ou seja, os incidentes podem estar ligados com investigações inadequadas, monitoramento ineficaz, projetos mal elaborados, ou a união dessas causas.

No Brasil, mais especificamente em Minas Gerais, depois dos acidentes com a Barragem do Fundão e da Barragem B1, a Defesa Civil determina que as avaliações dos modos de falha devem ser feitas pelo menos de quatro formas: erosão interna, galgamento, liquefação do maciço e liquefação da fundação. Visto que barragens com potencial de liquefação, o método para cálculo do rejeito mobilizado deve ser de acordo com o ângulo de estabilização (CEDEC, 2019).

O fenômeno da liquefação em barragens é relacionado, principalmente, com as rupturas de barragens devido às vibrações, como por exemplo, terremotos. Os abalos sísmicos são capazes de modificar as propriedades dos solos e assim torná-los mais suscetíveis a liquefação.

3.2.1 Ruptura por liquefação

O fenômeno de liquefação acontece em situações não drenadas, as quais a poropressão gerada por carregamentos cíclicos ou monotônicos (liquefação estática) pode chegar a reduzir a zero a tensão efetiva, com as partículas sólidas perdendo contato entre si, em estado de suspensão no solo, comportando-se como um líquido viscoso (ISHIHARA, 1977).

De acordo com Amann (2019), sobre a Barragem B1 de Brumadinho, a massa de rejeito, acrescentada ao longo dos anos, aplica seu peso sobre as camadas inferiores. Com isso, os grãos de rejeito dessas camadas inferiores sofrem redução de volume devido à compressão exercida, visto que o material foi lançado pela técnica de aterro hidráulico e com isso as partículas sedimentaram-se no estado fofo (não compacto). Com essa redução de volume, a água contida nos vazios dos grãos sofre também uma intensa compressão, mas não consegue se deslocar para regiões de baixa pressão, pois a região no seu entorno possui muitos finos entre os vazios, o que reduz a permeabilidade. A água então, sendo um líquido incompressível, suporta praticamente toda a tensão e com isso os grãos ficam aliviados de parte da carga e sofrem redução das forças de contato entre si, o que faz cair bruscamente a resistência ao cisalhamento devido à redução do atrito entre eles.

Na Figura 2 tem-se a representação da vista frontal da barragem e o início da ruptura por liquefação no lado direito na porção inferior. E na Figura 3, tem-se o cenário final da barragem, após o rompimento.

Figura 2 – Ruptura por liquefação da Barragem B1 de Brumadinho.



Fonte: Adaptado de Amann (2019).

Figura 3 – Cenário final da Barragem B1.



Fonte: Amann (2019).

3.2.2 Ruptura por galgamento

A ruptura por galgamento ocorre pelo extravasamento da água armazenada de forma não controlada sobre o maciço da barragem. Tem como origem o mau dimensionamento do sistema de controle hidráulico, de problemas operacionais ou de ocorrência de eventos hidrológicos que superam o tempo de retorno estipulado no projeto (BRASIL et al, 2005). De acordo com Froehlich (2008), um terço das barragens tem suas ocorrências de galgamento nos aterros associadas a má capacidade dos vertedouros.

3.2.3 Ruptura erosão interna (*Piping*)

Segundo Fiori (2015), a ruptura por erosão interna é um processo erosivo caracterizado pelo arraste e arranque de partículas de solos semelhante ao que ocorre na erosão superficial devido à chuva. Dentro da sequência de processos são formados tubos (canículos) que aumentam a forma retrogressiva, gerando a retroerosão tubular. Esta situação ocorre quando a superfície do nível freático intercepta uma escavação ou um aterro.

3.2.4 Ruptura por falha na fundação

A ruptura por falha na fundação em barragens de rejeitos, se dá através defeitos inerentes a camada de suporte da estrutura, os quais podem acarretar deformações diferenciais excessivas culminando em fissuras, deslizamento e/ou escorregamento de materiais no corpo da barragem (SOUZA JR, 2018).

3.3 PAE – Plano de Ações Emergenciais

O PAE ou PAEBM (para a agência Nacional de Mineração) é um documento elaborado com a objetivo de identificar e classificar situações que coloquem em risco a estabilidade da barragem, e, com isso, determinar quais ações são necessárias para possíveis situações de emergência e contato de diversos agentes envolvidos no empreendimento em questão.

No Brasil, com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), faz-se obrigatória a elaboração do PAE, de acordo com a Lei Federal nº 12.334/2010 alterada pela 14.066/2020 para todas as barragens de contenção de resíduos, rejeitos ou acumulação de água classificadas com dano potencial associado alto.

O Plano de Ações de Emergência descreve as ações a serem executadas no caso de algum evento de emergência, as quais devem ser delegadas pelo proprietário e operador da barragem. As exigências determinadas pelo PAE têm como elementos claros do planejamento, a coordenação e as responsabilidades no caso de uma situação de um desastre e também compõem normas de diversos países desde a década de 90 (COLLISCHONN, 1997). A mancha de inundação tem um papel importante dentro do PAE, pois através dela é possível demarcar os pontos de encontro da comunidade e de trabalhadores do empreendimento, os locais de implantação de sirenes, rotas de fugas, entre outros.

A mancha de inundação também a base para outras ações no contexto da PNSB, como a elaboração do Plano de Mitigação de Carreamento de Rejeito e do Plano de Monitoramento Qualitativo de Água e de Sedimentos.

São classificadas como “situações de emergência” eventos adversos que possam afetar a segurança da barragem e causar danos à integridade estrutural e operacional da estrutura, risco de perda de vidas humanas, prejuízos ambientais e socioeconômicos. O período do tempo entre a ruptura da barragem e a notificação da ruptura é considerado um dos fatores mais importantes para início da operação de resgate (MAIJALA, 2001). Por meio do PAE, podem ser executadas operações de resgate mais efetivas, pois através da análise da mancha de inundação são traçadas rotas de fugas e pontos de encontros, teste de funcionalidades das sirenes, treinamentos internos e com as comunidades possivelmente afetadas.

Além disso, vale citar que esse treinamento é realizado para os 10 km a jusante da barragem, onde é compreendida a Zona de Auto Salvamento (ZAS), considerada a mais sensível logo após o rompimento.

3.4 Modelos de ruptura de barragem

Os modelos envolvidos no rompimento de barragens de água e rejeito são realizados através de algumas etapas de estudo. Inicialmente, são analisados os principais tipos de falhas da estrutura e os cenários que podem causá-las. De acordo com Balbi (2008), pode haver apenas uma causa ou uma combinação de falhas para a ruptura, entre elas: evento iniciador (geralmente ligado à funcionalidade e segurança da estrutura), velocidade do vento, nível de água do reservatório, posicionamento das comportas, modo de ruptura, onda de cheia provocada pela ruptura.

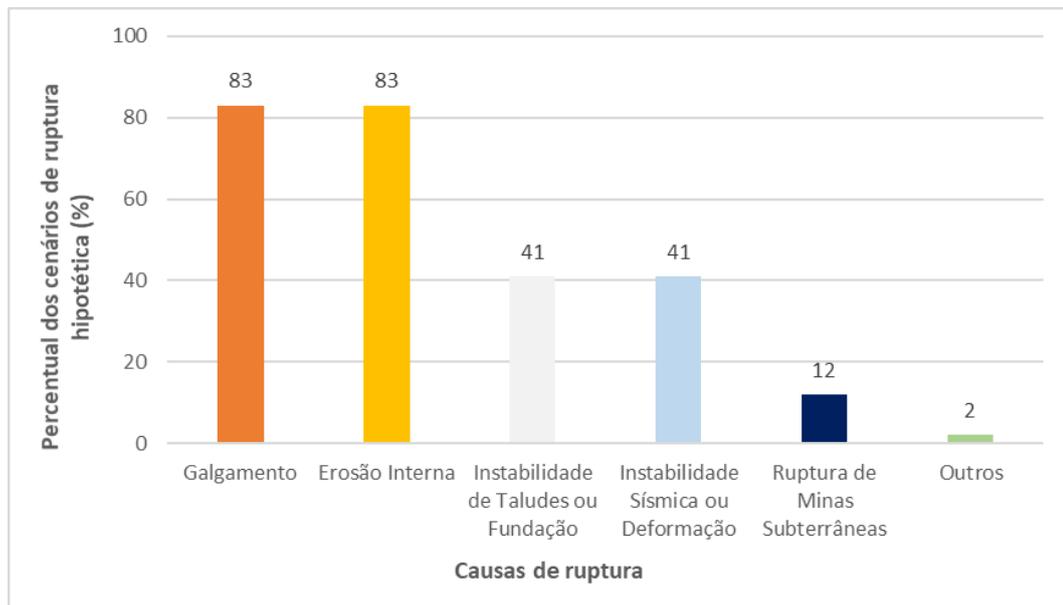
Em relação às barragens de rejeitos há uma incerteza associada ao volume de rejeito mobilizado no cenário de ruptura. Segundo Ribeiro (2015), o volume de rejeito mobilizado está vinculado ao ângulo de estabilização dos rejeitos dispostos no reservatório. Já Rico et al. (2007), ao analisar diversas rupturas de barragens, por diferentes tipos de falhas, teve o resultado de que, em média, um terço do volume de rejeitos e água compõe a mancha de inundação.

Para a modelagem, de acordo com Martinez (2011), os cenários mais adotados em estudos de ruptura de barragens em relação ao tipo de falha são:

- Galgamento;
- erosão interna;
- instabilidade dos taludes ou fundação;
- instabilidade sísmica ou deformação;
- ruptura de minas subterrâneas;
- outros;

A Figura 4 abaixo mostra os dados distribuídos estatisticamente para os cenários utilizados nos estudos de ruptura de barragens.

Figura 4 – Cenários adotados na modelagem para estudo de ruptura hipotética.



Fonte: Adaptado de Martinez (2011).

Além dos tipos de falha, também é analisado os mecanismos e tempo de formação da brecha. A brecha tem como definição a abertura na barragem, causada por falha, através dela, a água do reservatório pode passar, alargando e aprofundando a brecha inicial (COLLISCHONN, 1997). Esse fator tem ligação direta com mancha de inundação, a magnitude, a forma e duração do evento de ruptura.

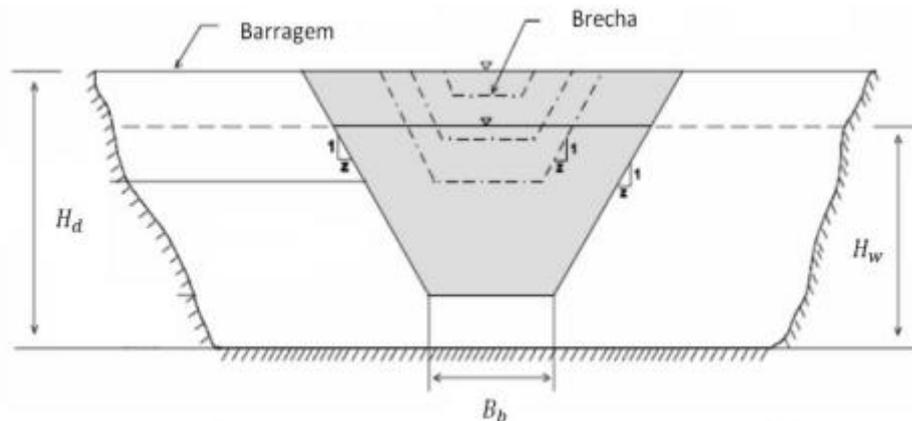
De acordo com Monte-Mor et al. (2008), o fenômeno de ruptura pode ser dividido nos seguintes componentes: localização da brecha, tempo/taxa de desenvolvimento da brecha e previsão do escoamento através da brecha. Segundo o autor, os fatores que podem influenciar mais na formação da brecha em uma barragem, independente do material do maciço, são:

- Forma da brecha;
- tempo de formação;
- profundidade da brecha;
- largura final;
- taxa de crescimento.

Para representar um processo de geração de brecha em uma barragem, é apresentado na Figura 5 uma brecha de formato trapezoidal. A representação é de uma brecha de uma barragem

qualquer, a qual depende da sua inclinação (parâmetro z), e sua extensão final varia de acordo com a largura do fundo (B_b). E para fins de cálculo, é considerado a altura da lâmina d'água (H_w) equivalente à altura da barragem (H_d), com isso, é representado a situação mais crítica e os resultados ficam a favor da segurança.

Figura 5 – Exemplo de formação da brecha de uma barragem.



Fonte: Fread e Lewis (1998), citado por Uemura (2009).

Para a modelagem e simulação da ruptura hipotética das barragens existem alguns modelos que podem ser utilizados para obtenção da mancha de inundação como HEC-RAS, DAMBREK, FLO-2D, MUK 3D.

3.5 MUK 3D

Muk3D é uma ferramenta CAD 3D (*computer aided design*) especializada para o projeto e a modelagem de barragens de rejeitos. É um modelo geométrico que permite que praias de rejeitos sejam criadas usando perfis de inclinação (COOPER; GROBLER; REYES, 2018). Desta forma, o modelo MUK3D se diferencia dos demais modelos de rompimento de barragem, os quais, em geral, são hidrodinâmicos. Ou seja, para prever a maneira como os rejeitos se comportam depois após deixarem o reservatório da barragem, nos modelos hidrodinâmicos, é levada em consideração a equação governante de tal fenômeno físico, onde é necessário caracterizar diversos parâmetros, como, por exemplo, o grau de saturação, a densidade dos rejeitos, a porosidade, a rugosidade etc.

Como é mencionado por MINEBRIDGE (2019), na modelagem utilizando o *software* MUK3D, a barragem rompe e os rejeitos fluem sob a gravidade, sem considerar uma grande quantidade de água mobilizando os rejeitos. Se houver um volume significativo de água e isso se tornar o impulsionador da saída, torna-se um problema de modelagem de fluxo hidráulico de detritos e

a abordagem usada no Muk3D não é adequada. Portanto, ressalta que o modelo não é apropriado para a aplicação em barragens em que ocorre um grande volume de água e o rompimento é causado por galgamento.

Outra limitação, é que o MUK3D não possui um modelo de balanço hídrico embutido, com isso, o plano de deposição precisa ser extraído manualmente. Os parâmetros relevantes do balanço de massa e água (volume do reservatório, volume depositado de rejeitos) precisam ser estimados para sua incorporação ao modelo 3D. Esses dados podem ser obtidos a partir criação do maciço da barragem através da elevação da crista e automaticamente o reservatório será traçado de acordo com a elevação e a base topográfica utilizada.

3.5.1 Volume de rejeitos lançados

Como citado anteriormente, a previsão do volume de rejeitos lançados pode ser considerada de diferentes formas e não é uma tarefa de fácil execução, pois depende de muitos fatores, incluindo o mecanismo de ruptura, o volume de água represada, a elevação e largura da ruptura, a resistência dos rejeitos no reservatório e geometria da barragem (MINEBRIDGE, 2019).

Como não é possível prever com precisão o comportamento dos rejeitos depois de deixar a estrutura de contenção e ocupar o vale a jusante, é necessário reconhecer que todas as suposições têm algum grau de incerteza e que simular mais de um cenário é de suma importância, pois a mancha de inundação no modelo MUK3D é representada apenas com os dados referente ao volume de rejeitos lançado e a declividade residual dos rejeitos.

Por isso, é recomendada a simulação em intervalos de inclinações, ou até mesmo uma sobreposição das manchas geradas para cada cenário de ângulo de deposição considerado, para comparação do impacto no vale a jusante.

Alguns casos históricos indicam que o cone de depressão da massa de rejeitos remanescente se forma em ângulos de 3,5° a 6°, enquanto os rejeitos saturados liquefeitos estabilizam a jusante nas encostas de 1° a 4°, com a deposição dos rejeitos largamente depositados, dependendo da sua reologia, da topografia a jusante e dos declives de riachos/vales (LUCIA, 1981). Ainda, segundo Olson (2001), a grande maioria dos casos históricos de ruptura indicam uma faixa de ângulos entre 1° a 6°, dependendo do grau de adensamento dos rejeitos.

4 METODOLOGIA

A presente monografia, dedicou-se a analisar a propagação da mancha de inundação, proveniente da ruptura da Barragem B1, localizada no Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, Minas Gerais. Neste tópico, são descritas as etapas de modelagem do MUK 3D e posteriormente é avaliado os resultados do modelo com a inundação observada através de imagem de satélite registrada após a tragédia. Esse documento não tem como finalidade analisar a causa do acidente e nem faz julgamento de culpabilidade.

Primeiramente, para a elaboração desse estudo, foram realizadas pesquisas e busca de dados, para alimentar o modelo e também a descrição da área de estudo. Vale ressaltar, que todos os dados utilizados no trabalho são de domínio público e não apresentam informações com níveis elevados de detalhe.

4.1 Descrição da área de estudos

A Barragem B1 estava localizada na região sudeste do estado de Minas Gerais, nos domínios da Mina Córrego do Feijão, pertencente ao Complexo Paraopeba. A barragem foi construída em 1976, pela Ferteco Mineração (adquirida pela VALE em 27 de Abril de 2001), pelo método de alteamento a montante, no município de Brumadinho. Na Figura 6, tem-se a imagem aérea da estrutura em 2014. A Barragem B1 tinha como finalidade a disposição de rejeitos provenientes da produção de minério de ferro. Porém, devido ao fim de sua vida útil a estrutura não estava sendo mais operada para essa finalidade. O efluente da barragem era direcionado para a Barragem B6, de onde era recirculado para área industrial (VALE, 2019).

Figura 6 – Vista aérea da Barragem B1 e B6 em junho de 2014.



Fonte: Adaptado de VALE (2019).

No dia 25 de janeiro de 2019, houve a ruptura da Barragem I da mina Córrego do Feijão, operada pela VALE por volta de 12h28. Os rejeitos dispostos ocupavam uma área de 249.500 m² e o volume disposto era de 11.700.000 m³ (VALE, 2019).

Depois de passar por alguns alteamentos pelo método a montante, no dia da ruptura, a estrutura se encontrava na El. 942,0m, com a altura no barramento de 86m e comprimento da crista de aproximadamente 680m (POTAMOS et al., 2018 apud Costa, 2019). Esses foram os dados considerados para a realização da mancha de inundação no modelo MUK3D.

Através da topografia ALOS PALSAR (ASF, 2015), com resolução de 12,5 metros, foi feita a descrição da área de drenagem da Barragem B1. Assim, foi possível determinar a área de drenagem da barragem e as bacias hidrográficas que a compõe, com o auxílio de ferramentas do QGIS. Além disso, ainda utilizando o QGIS, foi determinado o tempo de concentração (TC) e o valor do “*Curve Number*” (CN) da bacia hidrográfica.

- (TC) denota o tempo de concentração da bacia, o qual foi calculado a partir da formulação de G. B. Williams, recomendada para bacias rurais, a qual é dada por:

Equação 1:

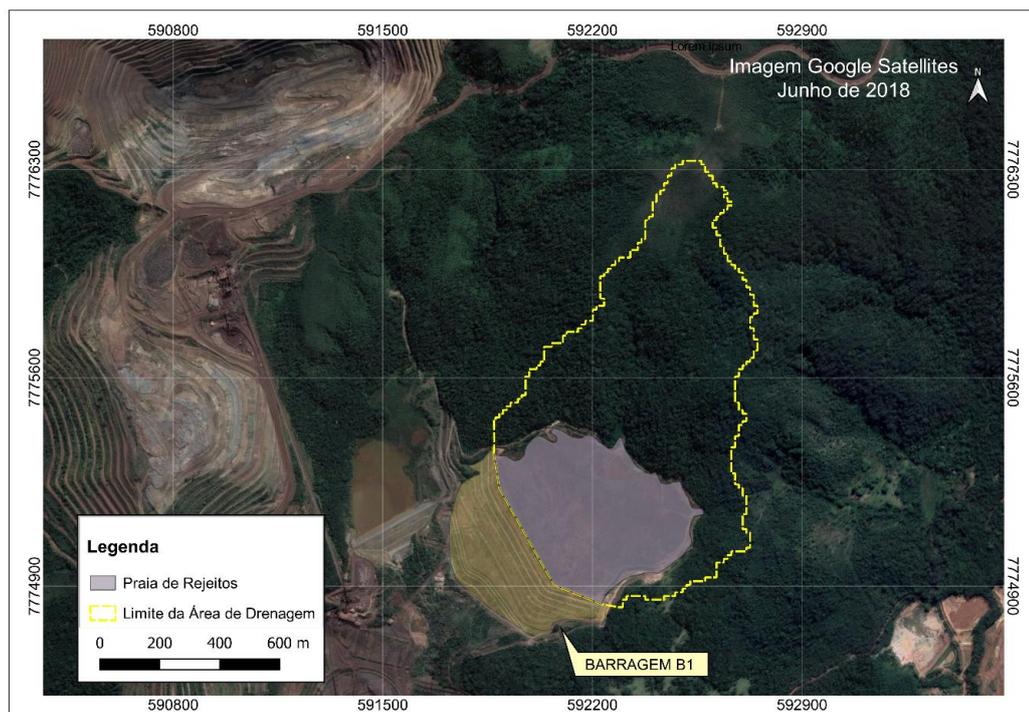
$$tc = \frac{0,61.L}{A^{0,11} \cdot Se^{0,20}}$$

Sendo:

- L = comprimento axial (Km);
- A = Área de drenagem (Km²);
- Se = declividade média (%).
- (CN) denota a “*Curve Number*”, o qual depende do uso e da ocupação do solo no terreno da bacia de contribuição. Na ponderação do parâmetro CN foram utilizados valores de referência para solos do grupo hidrológico C (composição Argissolo Vermelho-Amarelo + Latossolo Vermelho-Amarelo) conforme IBGE/EMBRAPA (2001) e Sartori et al. (2005), e condição de umidade antecedente II;

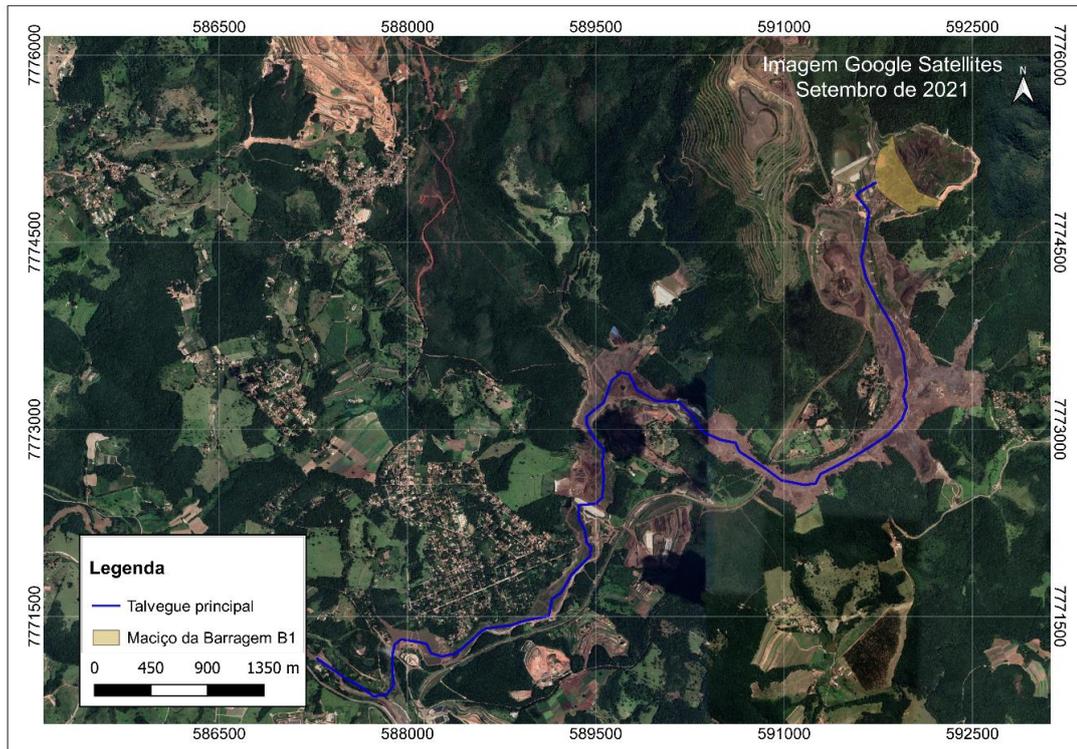
Na Figura 7 está representado o limite de contribuição da drenagem da Barragem B1 e na Figura 8, tem-se o talvegue principal, a jusante da barragem, que foi realizada a modelagem da mancha de inundação.

Figura 7 – Área de contribuição da Barragem B1.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 8 – Talvegue principal que foi realizada modelagem da mancha de inundação.



Fonte: Do autor (2021).

4.2 Moledo MUK3D

Como já explicitado, o MUK3D não possui um modelo de balanço hídrico embutido, e para obter a mancha de inundação são fundamentais os dados do plano de deposição. Portanto, é necessário fazer a estimativa do volume do reservatório e do volume que será lançado após a ruptura manualmente. Desta forma, a seguir é apresentada a metodologia das estimativas dos volumes.

4.2.1 Estimativa do volume de rejeitos lançados

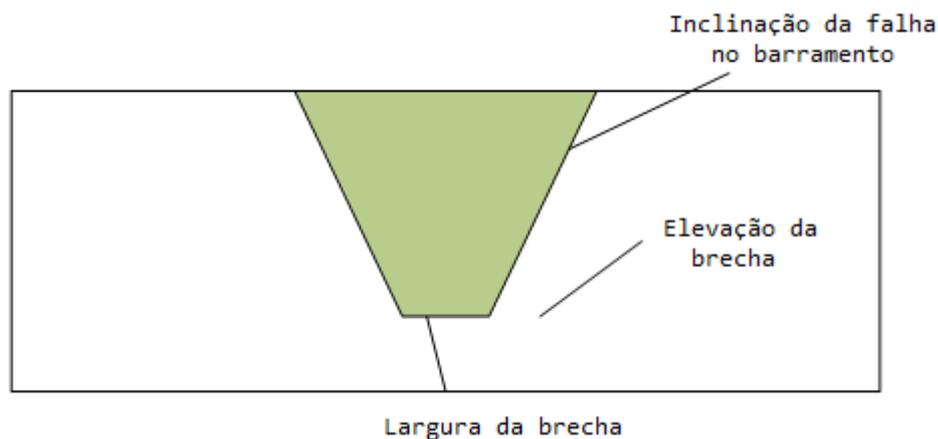
Para estimar o volume de liberação dos rejeitos, o modelo é baseado nos seguintes fatores:

- Elevação da brecha;
- Largura da brecha;

- Declive de falha de retorno dentro dos rejeitos;
- Pressuposto de que existe um pequeno volume de água no reservatório, que mobiliza um pequeno volume de rejeito em relação ao volume mobilizado pela gravidade;
- Declive da falha dentro da própria barragem;
- Localização da brecha.

Através da barragem, a brecha é modelada como uma seção trapezoidal, conforme mostrado na Figura 9 a seguir.

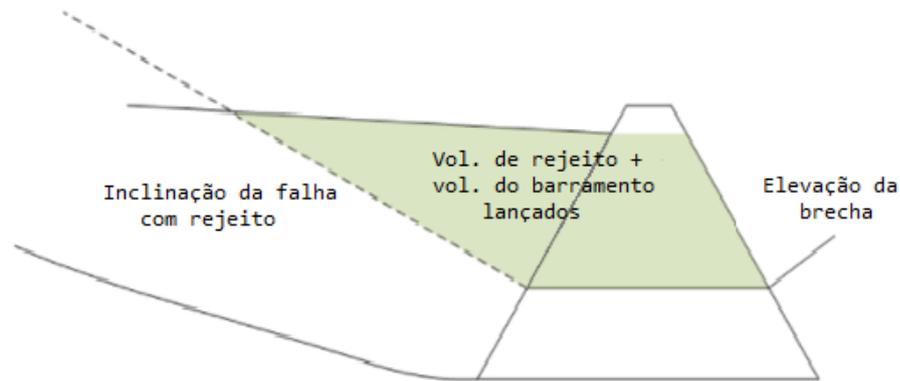
Figura 9 – Modelagem da brecha no MUK3D



Fonte: Adaptado de Minebridge (2019).

A partir do local da brecha, um cone invertido é projetado de volta para Barragem de Rejeitos com uma declividade determinada para o local de estudo, até que entre na superfície de rejeitos ou atinja o solo. O volume de rejeitos acima do solo original e acima do cone invertido é então considerado como o volume potencial de liberação. Na Figura 10, é representado o volume lançado pelo MUK3D.

Figura 10 – Representação do volume lançado pelo MUK3D.



Fonte: Adaptado de Minebridge (2019).

Para estimar os volumes são necessárias três superfícies:

- Terreno original, topografia pública da área de estudo;
- Terreno com a barragem implantada, estrutura final da barragem central fundida com o terreno original, representando o maciço da barragem com uma aproximação razoável;
- Superfície com rejeitos no momento da falha.

Com essas três superfícies e os parâmetros de rompimento, é possível estimar o volume mobilizado de rejeitos e material de enchimento da barragem. Com isso, é denominando o local da brecha, criando um corte com base na largura e elevação da brecha e estimando o volume de material do maciço perdido. Em seguida, um cone é criado no lado a montante da brecha e, assim, é determinado o volume de material de rejeito que pode ser mobilizado. Além do volume de rejeitos lançado, calculado pelo programa, um cenário com a mobilização do volume total do maciço também foi avaliado nesse estudo, isso foi realizado devido a observação real da ruptura da Barragem B1, que teve todo o seu maciço comprometido.

4.2.2 Bases topográficas

Nesse estudo, foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) resultante da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* com células de resolução espacial de 30 m, adquirido através do site da *United States Geological Survey – USGS*. Os dados de elevação foram processados a partir de sinais de radar de banda C espaçados em intervalos de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros) no Laboratório de Propulsão a Jato da NASA. Essa versão

foi então editada ou finalizada pela NGA para delinear e nivelar corpos d'água, definir melhor as linhas costeiras, remover picos e poços e preencher pequenos vazios (USGS, 2016).

Além da base topográfica SRTM, também foi simulada a mancha de inundação com a topografia ALOS PALSAR. De 2006 a 2011, o radar de abertura sintética (SAR) de banda L da PALSAR produziu observação detalhada, em todas as condições climáticas, dia e noite, bem como interferometria de passagem repetida. Esta base topográfica tem produtos nas resoluções de 12,5 e 30 metros, para melhores condições de mapeamento, observação de cobertura vegetal, sendo que para o monitoramento de desastres foi criado a correção radiométrica de terreno (RTC). Esse, é um projeto da Central de Satélite do Alasca que torna os dados SAR acessíveis a uma comunidade mais ampla de usuários. O projeto corrige a geometria e a radiometria do radar de abertura sintética (SAR) e apresenta os dados no formato GeoTIFF, amigável ao GIS (ASF, 2015).

As bases topográficas são de suma importância para a modelagem no MUK3D. Para o âmbito acadêmico, a resolução dessas bases podem ser aceitáveis, porém, para a elaboração de projeto de ações emergências, é recomendado, inclusive por resoluções e portarias, que sejam realizados levantamento topobatimétricos em toda região de estudo.

4.2.3 Elevação da brecha

A elevação da brecha, largura ou declividade da falha são parâmetros difíceis de se prever no caso da ruptura de uma barragem. Com isso, para a execução foram consideradas três elevações da brecha em três cenários de declividade de falha, a fim de comparar e definir o cenário mais próximo do real.

Como premissa, foi adotada a cota de fundo da brecha próximo à cota de fundação, sendo considerado também a largura máxima possível entre as cotas analisadas (100,00m), visando obter o maior volume de material mobilizado do barramento e dos rejeitos. Além disso, a inclinação dos taludes laterais na brecha foi de 1V:3H. Na Tabela 1, tem-se os valores simulados para topografia ALOS (ASF, 2015) e SRTM (USGS, 2007) utilizadas no projeto.

Tabela 1 – Valores referentes à brecha para estimar volume de rejeitos lançados.

Elevação da Brecha (m)	Declividade da Falha (m/m)	Largura da Brecha (m)	Inclinação dos Taludes laterais na Brecha (m)
915,00	0,01		
910,00	0,02	100,00	1V:3H
905,00	0,03		

Fonte: Do autor (2021).

4.2.4 Geração da mancha de inundação (*DamBreak*)

Não é possível prever com precisão como os rejeitos comportarão depois de deixarem a estrutura e alcançarem o lado a jusante dela. Dependendo de alguns fatores da barragem, como a quantidade de água no reservatório no momento da ruptura, a elevação da ruptura, a largura, a resistência dos rejeitos, é possível obter um resultado altamente variado em relação e extensão da mancha e do impacto gerado.

Novamente, é importante salientar que todas as suposições têm algum grau de incerteza e simular uma gama de resultados possibilita maior nível de assertividade na comparação. Portanto, foi simulado para o presente estudo 3 condições de deposição do material a jusante, considerando declividades de deposição com valores de 1%, 1,5% e 2%. Além disso, é possível fazer uma sobreposição dos cenários, a fim de obter um resultado mais satisfatório, essa proposição é também sugerida pela MINEBRIDGE(2019).

Para modelar a mancha de inundação foram utilizados os seguintes dados:

- Terreno com a barragem implantada;
- Volume total de rejeitos liberados pela ruptura;
- Ângulo de deposição de rejeitos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

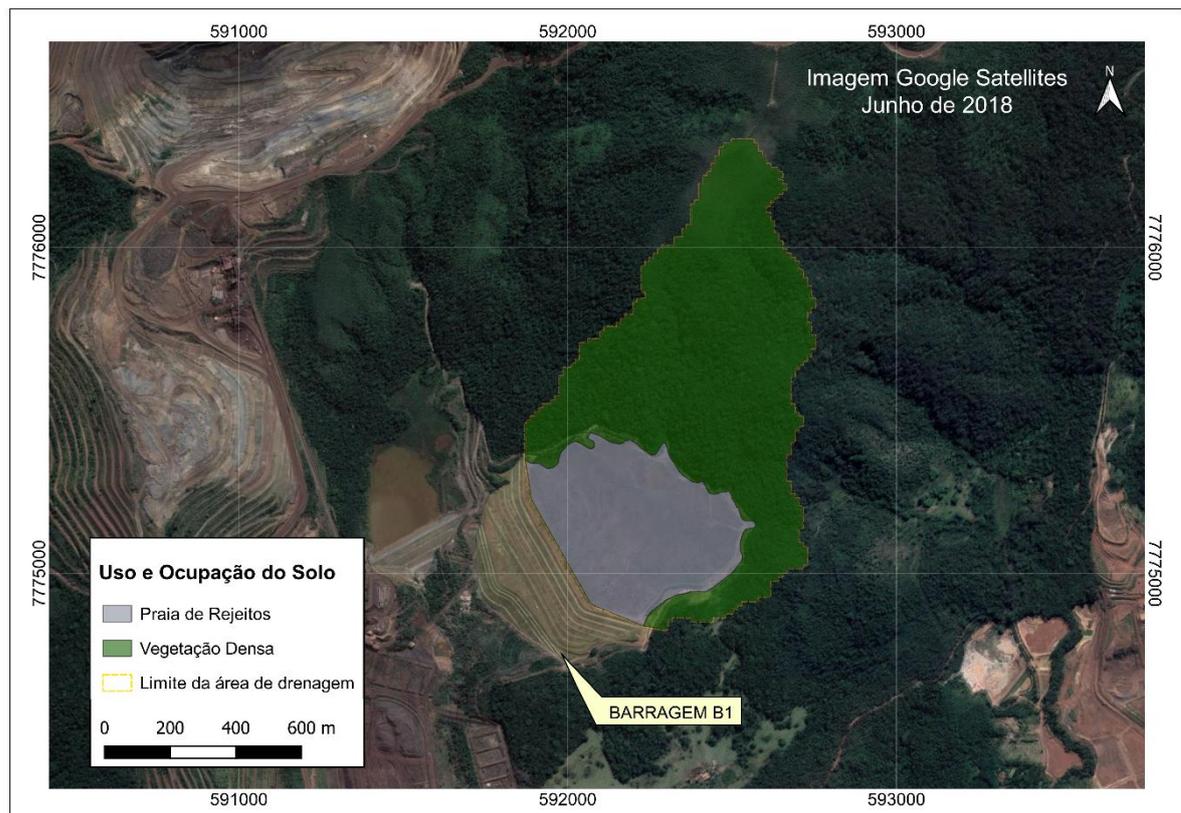
Para a caracterização física e hidrológica da área de estudo foram determinados os parâmetros apresentados na Tabela 2 e, na Figura 11, é apresentada a área de contribuição e uso do solo.

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros físicos e hidrológicos da bacia hidrográfica da B1.

Tipo de Solo	Área de Drenagem (m²)	Tc (min)	CN	CN Ponderado
Vegetação Densa	586.156		70	
Praia de Rejeitos	246.603	33,1	75	71,5
Total	832.759		-	

Fonte: Do autor (2021).

Figura 11 – Área de contribuição total e uso do solo da Barragem B1.



Fonte: Do autor (2021).

5.1 Resultados da implantação do maciço

Através do modelo MUK3D foi feita a construção de modelos de superfícies que

representam o barramento e o lago formado, com isso, foi calculado o volume do maciço, a área do reservatório e o volume de rejeitos.

Na Tabela 3, são apresentados os dados referentes ao barramento e ao reservatório para a topografia ALOS e SRTM, com a premissa de que o reservatório se encontrava a dois metros abaixo da crista (El. 940,00m) no momento da ruptura. Além disso, tem-se os dados disponibilizados pela VALE referentes aos valores reais da estrutura.

Tabela 3 – Resultado da modelagem da estrutura no modelo MUK3D e valores da VALE.

Topografia/Empresa	Volume do Maciço (m³)	Área do Reservatório (m²)	Volume de Rejeitos (m³)
ALOS	3.635.666	326.964	7.095.801
SRTM	3.139.494	290.702	5.376.696
VALE	-	249.500	11.700.000

Fonte: Do autor (2021).

A partir desses dados é possível verificar que a topografia ALOS, a qual tem uma resolução melhor, se aproxima mais do volume de rejeitos que estava disponível no cenário real da barragem, com um volume equivalente a 60% do volume real. Já o cálculo realizado com a topografia SRTM (USGS, 2007), o volume estimado equivale a apenas 46% do volume real. A partir desses dados, já era esperado que o resultado da mancha de inundação para a simulação a topografia ALOS se aproximasse mais da realidade.

Essa diferença se deve, principalmente, a precisão de cada base topográfica, sendo a ALOS com precisão de 12,5m e a SRTM 30,0m. Além disso, o ano em que foi realizado o caminhamento com os sinais de radar também podem influenciar, visto que a primeira tem dados desde o ano de 2011 e a segunda com topografias do ano 2000. Isso pode influenciar devido a mudança das interferências ao decorrer do tempo até o momento da ruptura, janeiro de 2019.

Portanto, reforça-se a importância de um levantamento topobatimétrico atualizado em toda a região de estudo para elaboração de projetos oficiais.

5.2 Volumes de rejeitos lançados

Para o cálculo de volume de rejeitos lançados foram utilizadas três elevações da brecha

e três declividades a fim de comparação. Na Tabela 4 e na Tabela 5, tem-se os resultados para as duas bases topográficas nas elevações utilizadas (905,00m, 910,00m e 915,00m) e as respectivas declividades para cada cota (1%, 1,5% e 2%).

Tabela 4 – Resultados do volume total de rejeitos por diferentes elevações e declividade da brecha – Topografia ALOS.

Elevação da brecha (m)	Declividade da falha (m/m)	Largura da brecha (m)	Declividade no maciço (m:m)	Volume de rejeitos lançado (m³)	Volume do maciço lançado (m³)	Volume total lançado (m³)
915,00	0,01	100,00	1V:3H	5.805.909,18	315.962,14	6.121.871,32
915,00	0,02	100,00	1V:3H	5.334.824,39	315.962,14	5.650.786,53
915,00	0,03	100,00	1V:3H	4.760.040,41	315.962,14	5.076.002,55
910,00	0,01	100,00	1V:3H	6.529.979,94	456.668,42	6.986.648,36
910,00	0,02	100,00	1V:3H	6.248.329,62	456.668,42	6.704.998,04
910,00	0,03	100,00	1V:3H	5.839.533,06	456.668,42	6.296.201,48
905,00	0,01	100,00	1V:3H	6.922.462,40	628.065,18	7.550.527,57
905,00	0,02	100,00	1V:3H	6.808.921,18	628.065,18	7.436.986,36
905,00	0,03	100,00	1V:3H	6.597.807,64	628.065,18	7.225.872,81

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 5 – Resultados do volume total de rejeitos por diferentes elevações e declividade da brecha – Topografia SRTM.

Elevação da brecha (m)	Declividade da falha (m/m)	Largura da brecha (m)	Declividade no maciço (m:m)	Volume de rejeitos lançado (m³)	Volume do maciço lançado (m³)	Volume total lançado (m³)
915,00	0,01	100,00	1V:3H	4.843.535,59	317.561,23	5.161.096,82
915,00	0,02	100,00	1V:3H	4.576.943,38	317.561,23	4.894.504,61
915,00	0,03	100,00	1V:3H	4.184.327,41	317.561,23	4.501.888,64
910,00	0,01	100,00	1V:3H	5.241.559,22	455.248,00	5.696.807,22
910,00	0,02	100,00	1V:3H	5.126.356,23	455.248,00	5.581.604,22
910,00	0,03	100,00	1V:3H	4.920.303,36	455.248,00	5.375.551,36
905,00	0,01	100,00	1V:3H	5.364.897,83	599.838,77	5.964.736,60
905,00	0,02	100,00	1V:3H	5.340.134,70	599.838,77	5.939.973,48
905,00	0,03	100,00	1V:3H	5.279.136,50	599.838,77	5.878.975,28

Fonte: Do autor (2021).

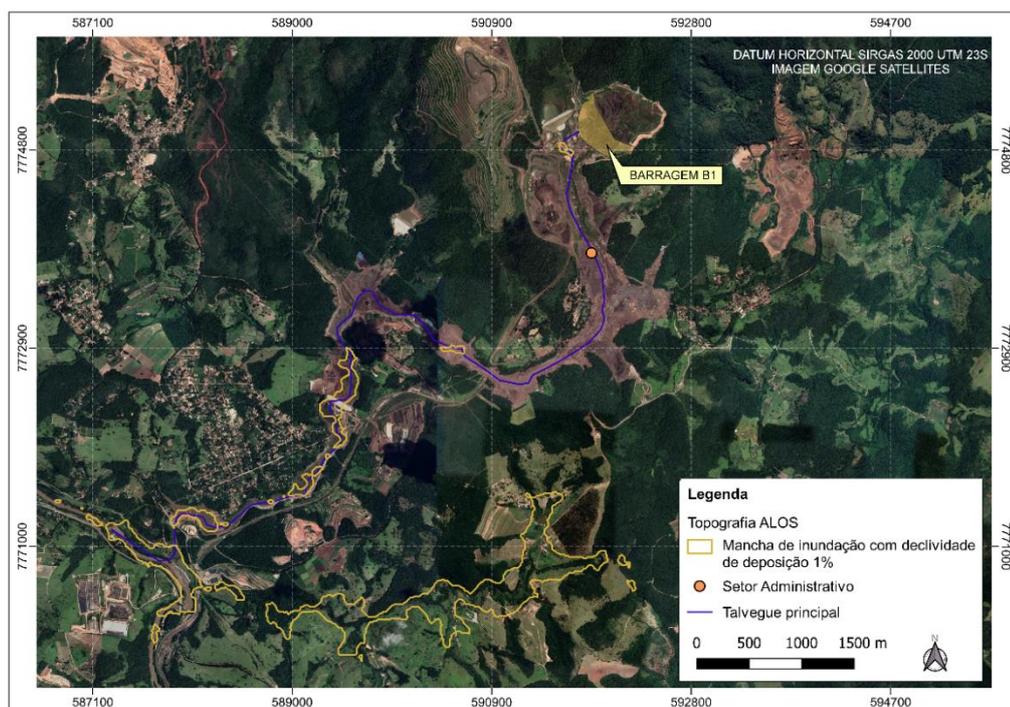
Ao analisar os resultados apresentados nas referidas tabelas, tem-se que a elevação que gerou maior volume lançado foi a de 905,00m, em ambas topografias, uma vez que esta elevação está mais próxima da cota de fundação. As declividades da falha utilizadas são recomendadas pelo modelo e mais usuais para o material, com isso tem-se que a declividade de 1% obteve o maior volume de rejeitos lançados. Os valores de largura da brecha e inclinação dos taludes laterais foram as premissas adotadas para o estudo.

Portanto, para a geração das manchas de inundação foram utilizados os maiores valores obtidos dos volumes lançados, para a Topografia ALOS, ou seja, um volume de 7.550.527,57m³ enquanto para a Topografia SRTM, este foi de 5.964.736,60m³.

5.3 Resultado das manchas de inundação (*DamBreak*)

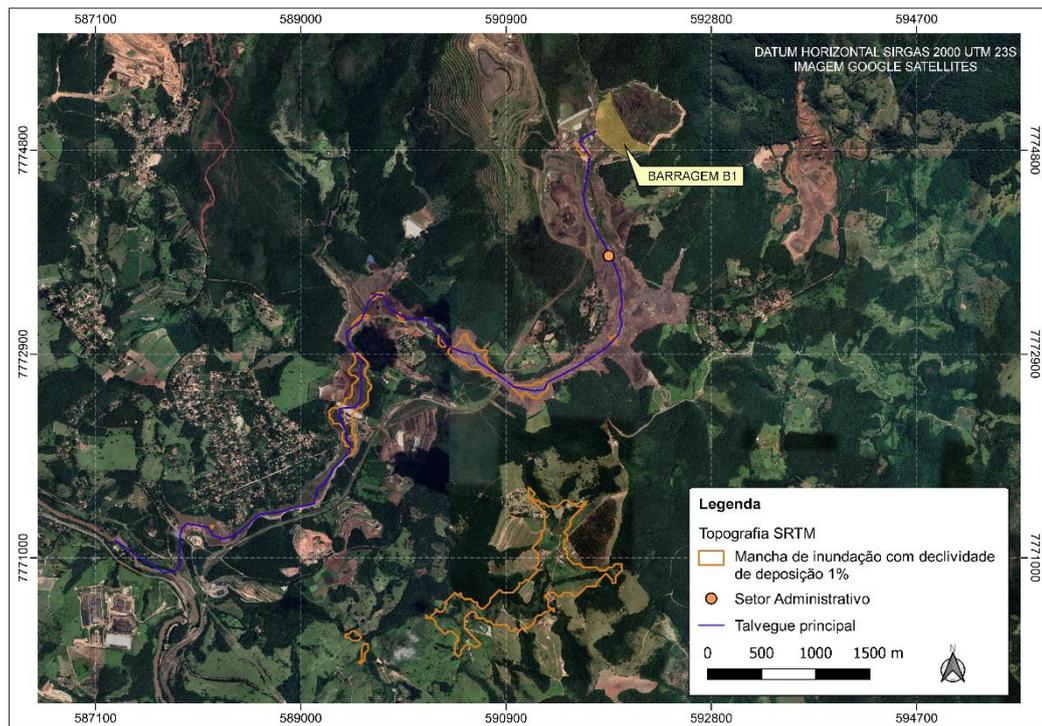
As simulações tiveram como produto o preenchimento do talvegue a jusante com o volume do rejeito lançado, gerando as manchas de inundação representadas através de mapas. Os resultados das respectivas manchas de inundação de cada cenário seguem nas Figuras 12 a 19.

Figura 12 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia ALOS e declividade 1%.



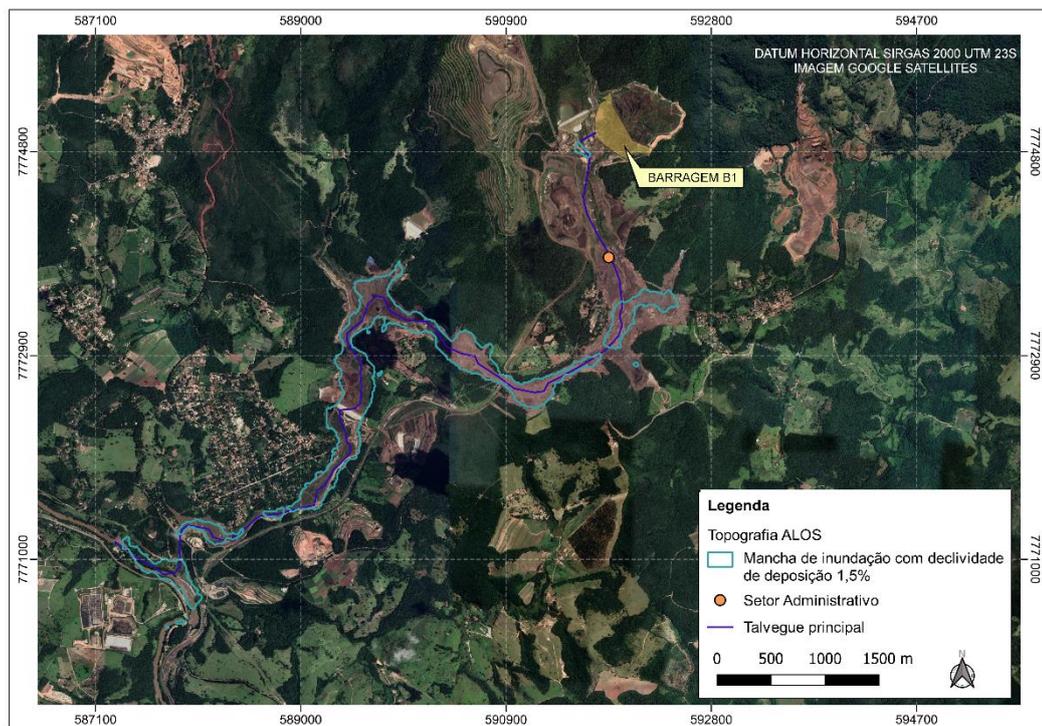
Fonte: Do autor (2021).

Figura 13 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia SRTM e declividade 1,0%.



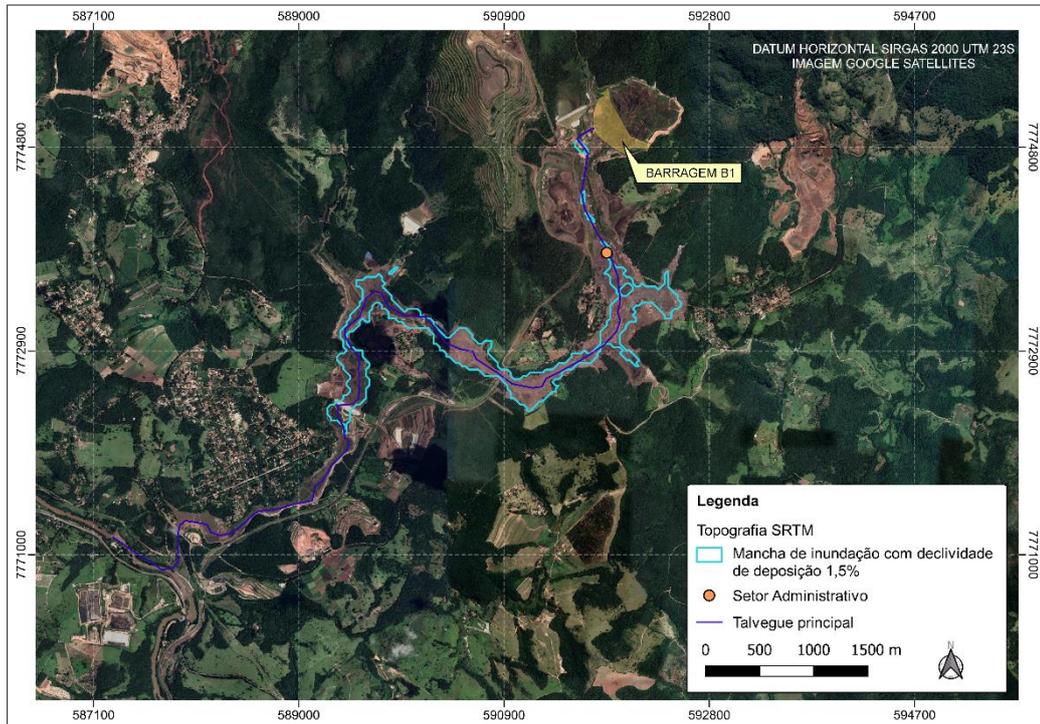
Fonte: Do autor (2021).

Figura 14 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia ALOS e declividade 1,5%.



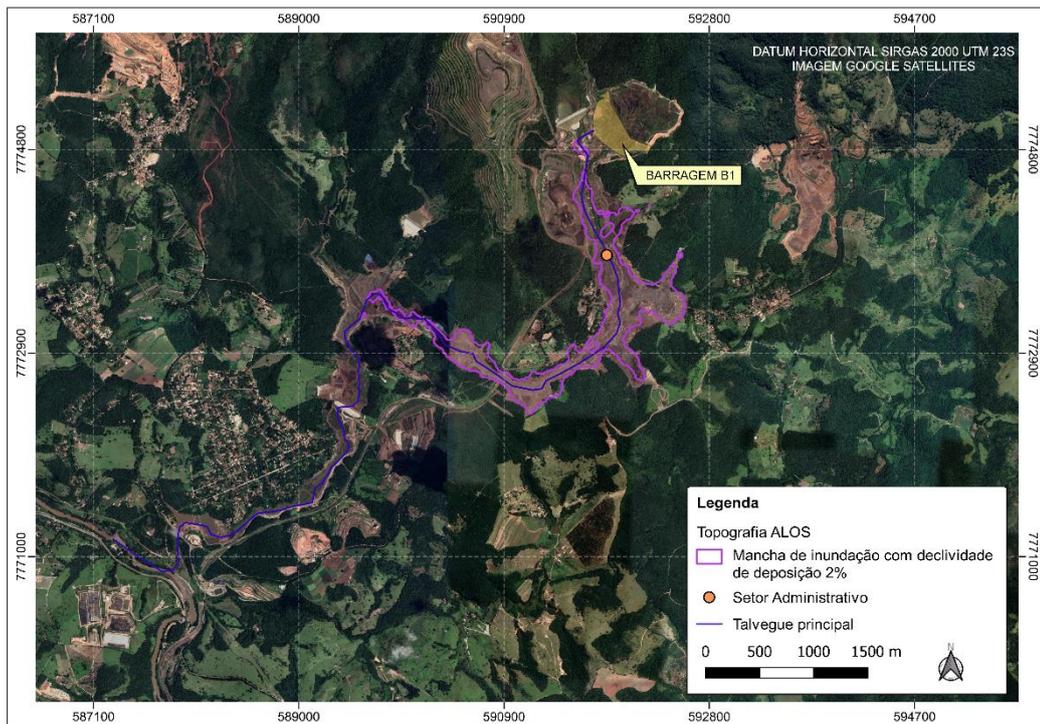
Fonte: Do autor (2021).

Figura 15 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia SRTM e declividade 1,5%.



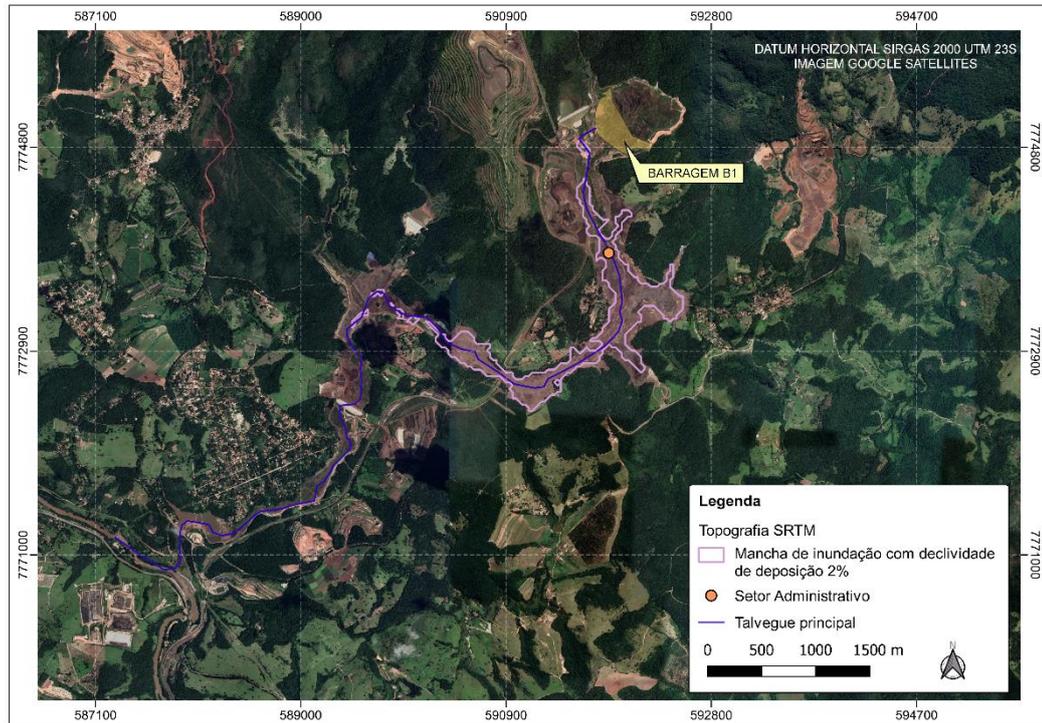
Fonte: Do autor (2021).

Figura 16 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia ALOS e declividade 2%.



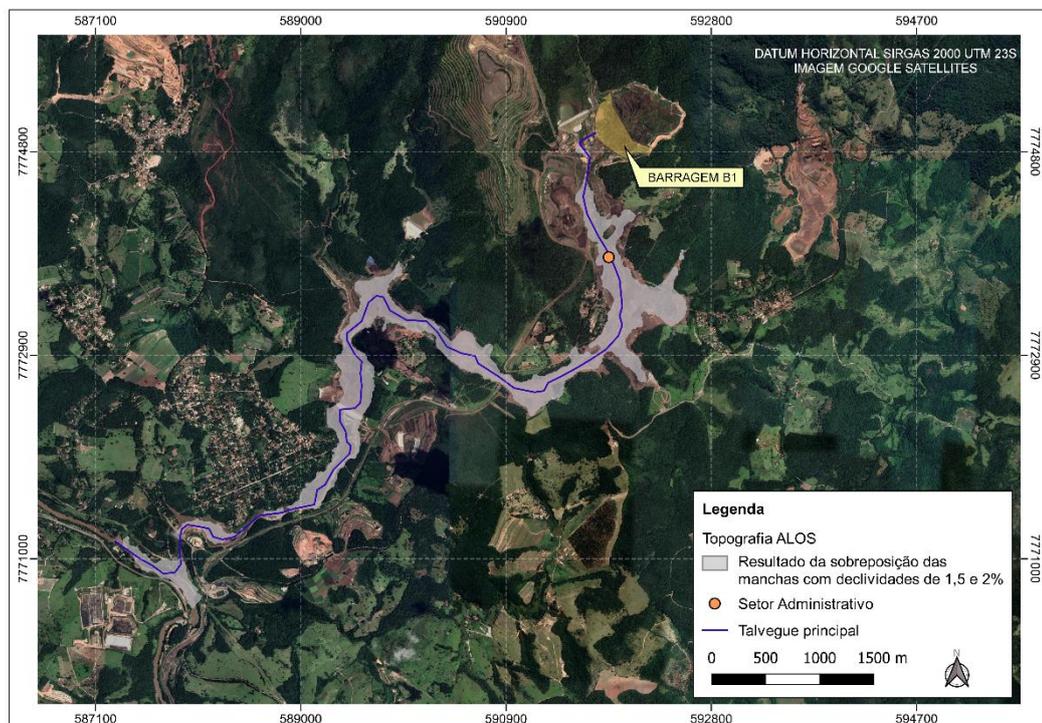
Fonte: Do autor (2021).

Figura 17 – Mancha de Inundação gerada com o volume da Topografia SRTM e declividade 2%.



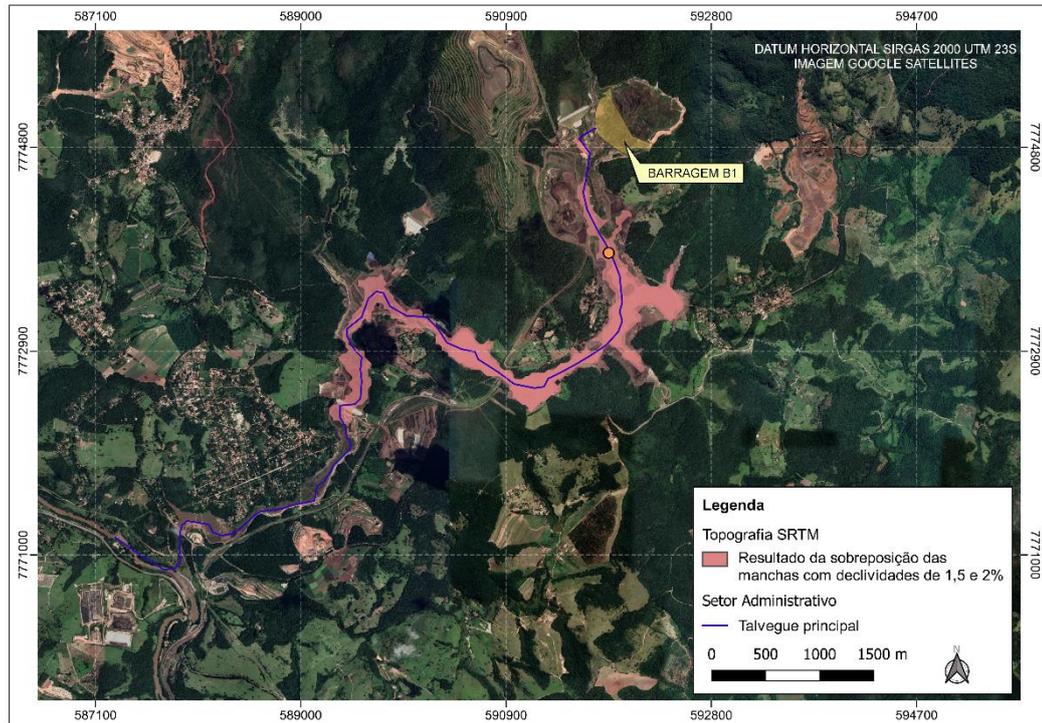
Fonte: Do autor (2021).

Figura 18 – Mancha de inundação com sobreposição das manchas geradas pelas declividades 1,5% e 2% - Topografia ALOS.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 19 – Mancha de inundação com sobreposição das manchas geradas pelas declividades 1,5% e 2% - Topografia SRTM.



Fonte: Do autor (2021).

A partir dos resultados obtidos, percebe-se que nenhuma das declividades conseguiu corresponder satisfatoriamente o talvegue principal desde o barramento até o ponto final analisando.

Além disso, a mancha com declividade de 1% se depositou em áreas que sequer foram atingidas pela ruptura real, isso ocorreu, pois, a mancha com menor declividade atinge maiores distâncias e cotas mais baixas, com isso, foi identificado pelo modelo pontos baixos ao sul do talvegue, representados na Figura 12 e Figura 13 que não condizem com o *dambrek*.

Já a mancha com declividade de 1,5% foi a mais satisfatória entre os cenários modelados, atingindo maiores distâncias e ocupando melhor os pontos que foram atingidos no cenário real. Apesar de atingir mais pontos, observa-se nas Figuras 14 e 15 que o local a jusante do barramento não está bem representado. Portanto, a mancha de 2% conseguiu atingir parte dessa localidade, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17. Isso é possível, visto que as manchas com maiores declividades se limitam a menores extensões, mas tendem a atingir maiores cotas em relação ao fundo do talvegue.

Por fim, foi realizada a sobreposição, como recomendado pela desenvolvedora, apenas das manchas com declividades de 1.5% e 2%, uma vez que a mancha de declividade 1% atingiu cotas que não representam o cenário real. Nas Figuras 18 e 19, vê-se que o cenário final das

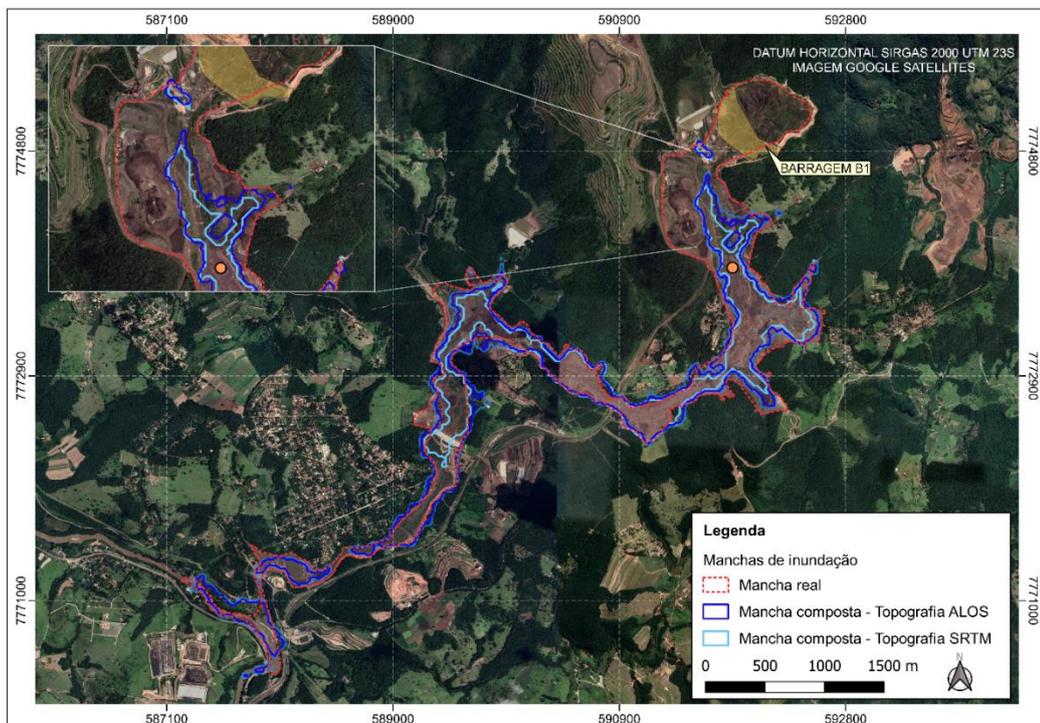
manchas se complementa e a mancha de inundação se torna mais satisfatória em relação ao talvegue analisado. Com isso, percebe-se que a topografia ALOS representa melhor o cenário, devido a melhor resolução e também ao maior volume de rejeitos mobilizados em comparação com a topografia SRTM, como já apresentado nas Tabelas 4 e 5.

5.4 Comparação das manchas com o cenário real

Como objetivo primordial desse estudo é a comparação da mancha gerada pelo modelo MUK3D com a mancha do cenário final do rompimento da Barragem B1. A mancha de inundação real foi feita de acordo com as imagens de satélites disponíveis em conjunto com dados disponibilizados pela VALE.

Na Figura 20, observa-se a projeção das manchas de inundação em comparação com a mancha real, dando ênfase em um ponto próximo ao barramento que não foi atingido por nenhuma mancha do modelo.

Figura 20 – Comparação da mancha real de ruptura com as manchas das bases topográficas simuladas.



Fonte: Do autor (2021).

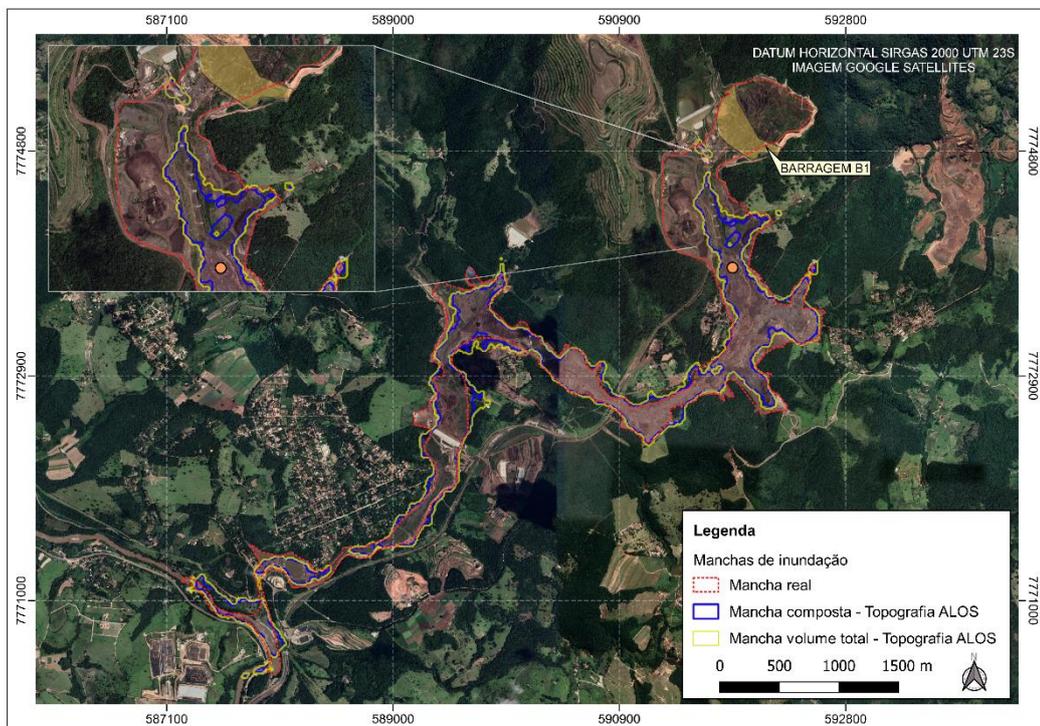
Como observado, a mancha de inundação gerada a partir da Topografia ALOS com a junção dos resultados de inclinação 1,5% e 2%, se mostrou condizente com a mancha real,

apresentando poucos pontos de falha na extensão da mancha e não preenchendo alguns extremos. Já a mancha com a Topografia SRTM, alcançou curtas distâncias, o que pode ser explicado pela definição da topografia e, conseqüentemente, baixo volume de rejeito calculado para a modelagem da deposição.

Por fim, também foi realizado uma mancha de inundação na Topografia ALOS, uma vez que esta apresenta melhor resolução, através da junção das declividades de 1,5% e 2%, utilizando o mesmo valor do volume de rejeito apresentado anteriormente ($6.922.462,40\text{m}^3$) e o volume total do maciço ($3.635.666,00\text{m}^3$), resultando em um total de $10.558.128,40\text{m}^3$, o qual se assemelha com o dado disponibilizado pela VALE, de $11.700.000\text{ m}^3$. A mancha também foi realizada com a junção das declividades de 1,5% e 2%. Isso foi feito a fim de se aproximar ainda mais do cenário real, devido a ruptura da Barragem B1 ter comprometido todo o maciço.

Na Figura 21, tem-se a representação da mancha com o acréscimo do volume total do maciço e a mancha com o volume total calculado pelo modelo MUK3D, ambas feitas com base na topografia ALOS.

Figura 21 – Comparação da mancha real de ruptura com as manchas de com diferentes volumes depositados.



Fonte: Do autor (2021).

Percebe-se que apesar do maior volume calculado, a mancha continuou apresentando falha ao local próximo a barragem. Porém, em alguns trechos preencheu melhor os extremos e

se mostrou satisfatória em comparação com o cenário final.

Na Tabela 6, tem-se o resultado das áreas das manchas até a localidade final analisado.

Tabela 6 – Área das manchas de inundação.

Cenário	Área (m²)
SRTM	1.065.884
ALOS	1.760.896
Volume total do maciço - ALOS	2.102.897
REAL	2.837.708

Fonte: Do autor (2021).

Com isso, observa-se que a topografia SRTM corresponde à, aproximadamente, um terço da área da mancha real e com a topografia ALOS, relaciona-se com dois terços do cenário final.

Em ambas as situações, o modelo MUK3D subestimou as manchas, especialmente na área próxima ao barramento. Isso pode ser explicado pois as topografias públicas utilizadas não estão totalmente de acordo com o terreno local, devido ao ano que foi realizado as sondas. Na Figura 20, pode-se observar através da ampliação, que naquele local foi realizado algumas movimentações de terra e criação de acessos para o transporte. Essa mudança na topografia certamente foi realizada em anos posteriores à disponibilização das bases topográficas e, com isso, a mudança de declividade no local não foi reconhecida pelo modelo. Além disso, devido à essa desatualização, a topografia pode não ter considerado o último alteamento da barragem, o que ocasiona em volumes de rejeitos menores dispostos no reservatório.

Além disso, vale ressaltar a localização do setor administrativo. Nesse local, além dos escritórios de administração do empreendimento, também se localizava o refeitório e estacionamento dos trabalhadores. Esse foi um dos maiores motivos para o grande número de mortos, pois a ruptura ocorreu numa sexta-feira no horário do almoço. Portanto, depois desse evento, a legislação brasileira reforçou que a zona de autossalvamento (ZAS) é considerada nos primeiros 10km ao longo do curso do vale, com isso, não é permitido construções residenciais, comerciais ou atividades que envolvam a permanência de pessoas no local.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, foi possível verificar que um dos grandes limitadores do programa é a base topográfica, uma vez que se trata de um modelo geométrico. A base topográfica é utilizada em todo o processo da modelagem de rompimento dentro do modelo MUK3D e afeta diretamente os resultados obtidos. Foram utilizadas duas topografias públicas, ALOS e SRTM, onde a primeira possui uma melhor definição e dados mais recentes, mostrando-se mais significativa e conseguindo aproximar-se mais do cenário real em relação ao volume de rejeitos e ao volume mobilizado da Barragem B1.

Para a delimitação da mancha de inundação, o cenário com uma declividade de deposição de rejeitos de 1,5% foi o mais representativo perante os outros dois simulados (declividades de 1% e 2%). No entanto, o cenário com declividade de deposição de 2%, apresentou resultados de cotas topográficas mais elevadas, sendo, assim, considerado um cenário mais restritivo. Utilizou-se, então, uma mancha composta pela sobreposição dos resultados dos cenários de declividade 1,5% e 2%, pois com ela é possível obter maiores distâncias e atingir tanto as cotas mais baixas quanto as mais altas do terreno.

Ainda sobre as declividades, é importante ressaltar que os resultados mostram significativa sensibilidade em relação a esse parâmetro, sendo muito importante para aplicação da metodologia em estudos de barragens a utilização de distintos cenários, devendo então, ser adotado o mais restritivo, ou até mesmo a combinação de dois ou mais resultados, tornando o método mais seguro. Ademais, o fato de a Barragem B1 estar seca durante o período de rompimento, faz com que o resultado obtido seja mais satisfatório, efetivando, assim, uma premissa básica do modelo.

Como finalidade do estudo, a comparação da mancha de inundação gerada com a topografia ALOS se mostrou satisfatória em relação à mancha real do evento. Com exceção ao trecho inicial a jusante do barramento, possivelmente ocasionada à uma movimentação de terra realizada após a elaboração da base topográfica. Com isso, reforça-se a necessidade de levantamentos topobatimétricos atualizados para a realização do *dambreak*.

A partir das informações geradas, tem-se que a mancha de inundação produzida por meio do modelo MUK3D se mostra satisfatória em âmbito de extensão e área atingida. Portanto, suas informações são bastante úteis como validação inicial de manchas e tomadas de decisões rápidas, como, por exemplo, em estudos de projetos em níveis conceituais de locação de

barragem. Porém, é importante ressaltar que essa ferramenta não apresenta parâmetros hidrodinâmicos, como velocidade da onda, profundidade da onda e tempo de chegada, que são exigidos na elaboração do documento do Plano de Ação de Emergências.

Desse modo, o modelo MUK3D pode ser utilizado para estudos em áreas com dados geológicos, hidrológicos e físicos restritos, possibilitando agilidade no processo e tomadas de decisões mais rápidas em projetos em fase conceitual.

REFERÊNCIAS

- ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF) DAAC. **Alos Palsar**. Alaska, 2015. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>>. Acesso: 10 set. 2021.
- AMANN, K. **Entendendo a liquefação na barragem de rejeitos de Brumadinho**. 2019. Disponível em: <<https://www.kurtamann.com.br/blog/2019/02/04/entendendo-a-liquefacao-na-barragem-de-rejeitos-de-brumadinho/>>. Acesso em: 28 set. 2021.
- BALBI, D. A. F. **Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens**. Estudo de caso: barragem de Peti/MG. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BLIGHT, G. E. **Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities**. 1st ed. Londres: Taylor & Francis Group, 2010.
- BRASIL, L. S. S. *et al.* Simulação de ondas de cheias causadas por ruptura de barragem e mapeamento de áreas inundáveis em meio urbano: estudo de caso de uma bacia de detenção em Uberaba, MG. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 16, 2005, João Pessoa. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005, V. 1, p. 10-15.
- CARMO, José Simão Antunes do. **Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos**. Coimbra, 2013.
- COLLISCHONN, W. Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, V. 2, no. 2, p. 191-206, 1997.
- COOPER, C., GROBLER, J., REYES, M. P. **3D Deposition and Water Balance Modelling with Muk3D and GoldSim**. Vancouver: Universidade da Colúmbia Britânica, 2018.
- COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL. **Ofício Circular 02 - 2019 GMG/CEDEC. Assunto: Solicitação de informações complementares ao PAEBM, preenchimento do questionário de pesquisa e encaminhamento de Termo de Referência para elaboração dos estudos de cenários de ruptura hipotética de barragens**. Belo Horizonte, 2019.

COSTA, K. R. **Retroanálise de parâmetros em modelagens hidrodinâmicas hipotéticas e reais associadas ao rompimento da Barragem I - Brumadinho, MG.** 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, Flórida, V. 134, no. 12, p. 1708-1721, 2008.

ISHIHARA, K. Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stress. **Soil and Foundation**, Japão, V. 15, no. 1, p. 29-44, 1977.

LUCIA, P.C. **Review of experiences with flow failures of tail- ings dams and waste impoundments.** 1981. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Universidade da Califórnia, Berkeley, 1981.

MAIJALA, T. RESCADAM. **Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis – Final Report**, Finlândia, 2001.

MARTINEZ, R. K. **ASDSO Survey of State Dam Safety Programs.** *In:* USSD Workshop on DamBreak Analysis Applied to Tailings Dams Denver, 2011. Disponível em: <www.infomine.com/library/publications/docs/Martinez2011.pdf>. Acesso em: 22 set. 2021

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens.** 1990. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MINEBRIDGE. **Estimating TSF runout volumes.** [s.l.], 2019. Disponível em: <<https://support.muk3d.com/hc/en-us/articles/360034314112-Estimating-TSF-runout-volumes>>. Acesso em: 29 set. 2021.

MINEBRIDGE. **Overview of dambreak modelling in MUK3D**. [s.l.], 2019. Disponível em: <<https://support.muk3d.com/hc/en-us/articles/360030995212-Overview-of-Dambreak-modelling-in-Muk3D>>. Acesso em: 29 set. 2021.

MONTE-MOR, R. C. A. *et al.* Mapeamento de áreas potencialmente inundáveis face à ruptura hipotética de barragens – estudo de caso: barragem de Funil e barragem de Manso. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 23, 2008, Cartagena De Indias. **Anais [...]** Cartagena De Indias: [s.n.], 2008, p. 1-20.

OLSON, S.M. **Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Illinois, Urbana, 2001.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação dos efeitos de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RICO, M. *et al.* Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**, Holanda, V. 152, no. 2, p. 846-852, 2007.

SOUZA JUNIOR, T. F. **Estudo para Avaliação do Volume de Rejeito Liberado do Reservatório Em Cenário de Ruptura De Barragem**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

TAILINGS AND MINE WASTE CONFERENCE, 2015, Vancouver. **Tailings mobilization estimates for dam breach studies**. **Anais [...]**. Vancouver: Knight Piésold Ltd, 2015.

UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE. **Earth Explorer**. Estados Unidos da América, 2007. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 29 set. 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE. **Landsat Missions**. Estados Unidos da América, 2016. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov>>. Acesso em: 28 set. 2021.

VALE. **Brumadinho**. Minas Gerais, 2019. Disponível em: <

Acesso em: 29 set. 2021.