



ELABORAÇÃO DE MAPA DE INUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO NO MUNICÍPIO DE CERRO AZUL/PR – ESTUDO DE CASO

Vinícius Euzébio da Silveira¹

Marcio Luiz Geremias²

Resumo: A atual legislação brasileira sobre barragens estabelece diversas medidas regulatórias específicas para as barragens de mineração, dentre elas está a execução de um estudo de inundação para as que estiverem inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Para a realização do presente trabalho foram utilizados dados de uma barragem de rejeitos finos de fluorita localizada no município de Cerro Azul, PR. O modelo de inundação foi desenvolvido utilizando o programa gratuito HEC-RAS, dados do Modelo Digital de Elevação do projeto Topodata e equações empíricas para a definição dos parâmetros de ruptura da barragem. Através do modelo gerado foi possível observar que o rejeito atingiu uma estrada rural e o rio Ribeira de Iguape, totalizando uma área de aproximadamente 78 hectares, sendo 26 de vegetação nativa. Não existe população a jusante da barragem, tornando desnecessária a definição das zonas de autossalvamento e de segurança secundária.

Palavras-chave: HEC-RAS. Barragem de rejeito. Mineração. Mapa de inundação.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de rejeito são construções essenciais na indústria de mineração, já que, por meio do armazenamento de resíduos advindos do processo de beneficiamento mineral, impedem contaminações do meio ambiente. Apesar da importância das barragens, o rompimento delas pode acarretar diversos problemas graves, que vão além do prejuízo material, como inundações, perda de vidas humanas e danos ambientais. Por esse motivo, garantir a segurança das barragens de rejeito se faz fundamental. A segurança das barragens busca minimizar ao máximo os riscos

¹ Graduando em Engenharia de Minas, 2023. E-mail: vinieuzebio@hotmail.com

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: geremias@terra.com.br



e acidentes associados a essas estruturas, fazendo-se necessário adotar medidas preventivas, monitorando e gerindo riscos, buscando garantir a integridade tanto das barragens em si, quanto das comunidades e do meio ambiente a jusante.

O Brasil apresenta um histórico preocupante de acidentes em barragens de rejeito nos últimos anos, sendo os que causaram maiores repercussões foram os desastres de Mariana e Brumadinho.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo apresentar a simulação da ocorrência de um possível acidente com consequente inundação causada pelo rompimento de uma barragem; este trabalho refere-se a um estudo de caso baseado em informações reais da Barragem Pinheirinho no município de Cerro Azul - PR de propriedade da empresa Mineração Nossa Senhora do Carmo Ltda.

Para o desenvolvimento deste trabalho (simulação do cenário) foi utilizado o programa computacional HEC-RAS - versão 6.3.3; a partir das informações obtidas da referida barragem, pôde-se definir os parâmetros de um possível rompimento e sua onda de inundação.

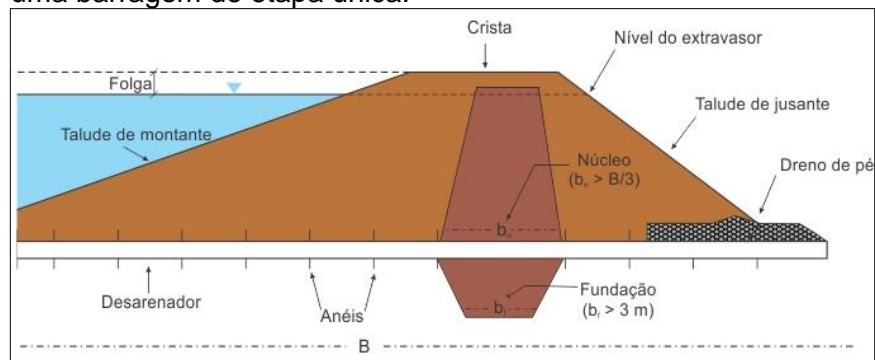
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS

As barragens de rejeito são comumente construídas com aterro ou com os próprios rejeitos provenientes do beneficiamento mineral e podem ser erguidas em etapa única, ou com métodos de alteamento por etapas (ANM, 2023) (acesso em 05/05/2023).

Segundo a Agência Nacional de Mineração (2023), o método construtivo mais utilizado é o de etapa única (Figura 1); das 921 barragens cadastradas no SNISB, cerca de 502 foram construídas utilizando este método, que consiste em realizar a construção de um único dique, que será utilizado até atingir sua capacidade máxima.

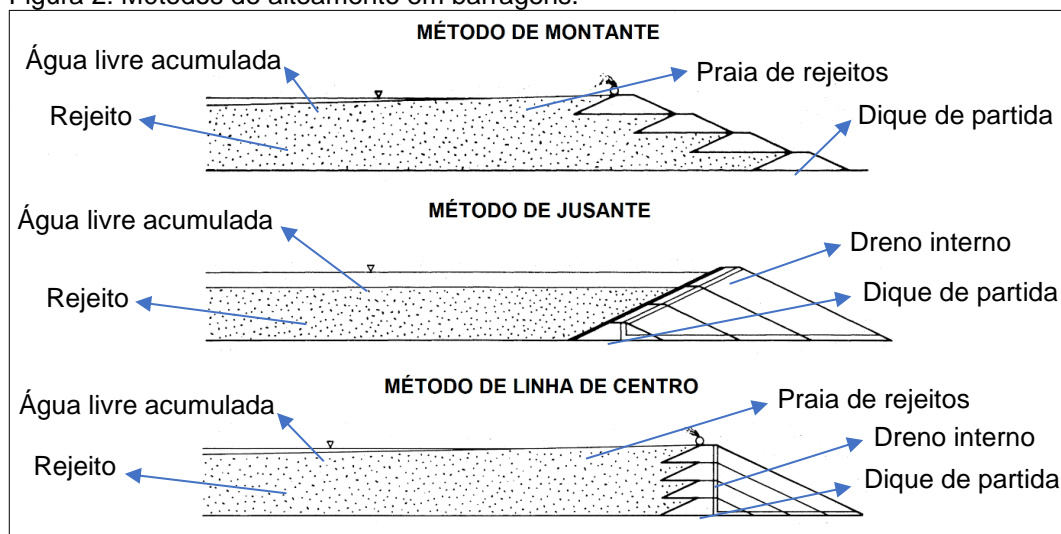
Figura 1: Representação esquemática dos elementos básicos de uma barragem de etapa única.



Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas (2023)

Nos métodos de alteamento, a barragem é esporadicamente ampliada em termos de volume, o que aumenta sua vida útil e diluindo os custos de sua construção. Para a realização de alteamentos, existem três métodos disponíveis, sendo eles: montante, jusante ou linha de centro, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Métodos de alteamento em barragens.



Fonte: Adaptado de Vick (1990).

No método de montante, o rejeito adensado é utilizado como fundação para o dique seguinte, resultando no deslocamento do eixo da barragem em direção à montante a cada novo alteamento.

Entre os métodos de alteamento mencionados, o método de montante é o mais econômico e mais fácil de realizar, contudo, é também considerado o mais arriscado por conta de sua baixa resistência mecânica. A maior parte dos acidentes



causados por ruptura de barragem aconteceram em barragens alteadas a montante (SOUZA, 2022).

No método de alteamento a jusante, os rejeitos são inicialmente descarregados a montante do dique inicial e os alteamentos feitos posteriormente são construídos com a colocação de aterro ou o próprio rejeito no talude a jusante do dique anterior (VICK, 1990).

Segundo Machado (2007), o alteamento a jusante é o método mais seguro pois evita a ocorrência de ruptura por liquefação. Porém necessita de maiores volumes de material para a construção dos diques superiores, além da implantação de um sistema de drenagem, aumentando seu custo. Outro empecilho para a construção de barragens alteadas a jusante é a necessidade de uma maior área de ocupação.

O método da linha de centro une os métodos de montante e jusante, visando a construção de uma barragem que seja segura e viável economicamente. Esta técnica utiliza o rejeito adensado como parte de sua fundação, seguindo em direção à jusante para se apoiar também sobre o talude inferior. O eixo da barragem é o mesmo até sua etapa final.

2.2 RUPTURA DE BARRAGENS

2.2.1 Causas de Ruptura

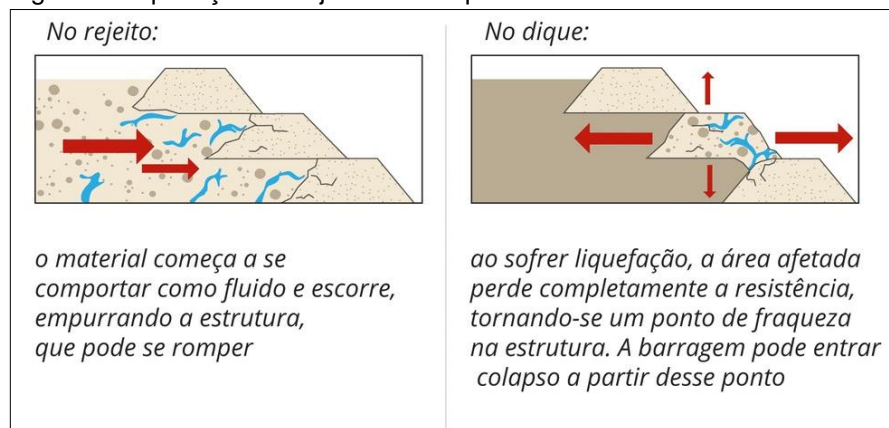
Mascarenhas (1990) afirma que as causas de ruptura de uma barragem podem ser divididas em duas categorias: causas naturais e causas humanas, que podem ocorrer de forma simultânea ou isolada.

As principais causas naturais de ruptura incluem: liquefação, galgamento, entubamento, infiltração, deslizamento das fundações ou do enrocamento, acomodações geológicas, efeitos sísmicos ou terremotos e enchentes extremas. Já as rupturas causadas pela ação humana podem ser devido a: falha no projeto ou construção, operação inadequada da barragem, terremotos induzidos, ações de guerra e terrorismo (MASCARENHAS, 1990).

Amann (2019) explica que a liquefação (Figura 3) é a perda de resistência ao cisalhamento do material depositado na barragem devido ao aumento repentino da

pressão da água nos vazios entre os grãos. Este fenômeno ocorre quando o depósito apresenta baixa permeabilidade, fazendo com que a água nos vazios não consiga se deslocar para as regiões de baixa pressão, resultando na condição não-drenada, na qual a água suporta praticamente toda a tensão aplicada. Isso faz com que os grãos fiquem aliviados de parte da carga e reduz o atrito entre eles, deixando o rejeito em um estado semelhante ao de um líquido viscoso e a água é expulsa em direção ao ponto de menor resistência, ou seja, o talude da barragem. A liquefação pode ocorrer tanto no rejeito quanto no dique.

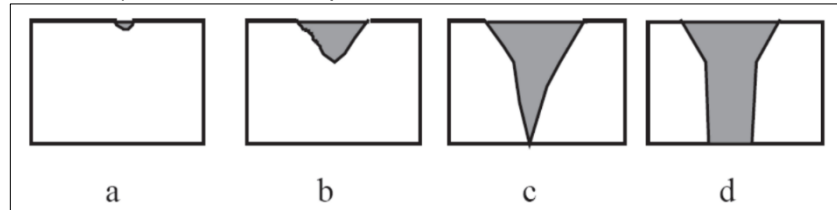
Figura 3: Liquefação no rejeito e no dique.



Fonte: Adaptado de G1 (2019).

Lauriano (2009) descreve que o galgamento (Figura 4) ocorre quando a água passa sobre a barragem, em partes não projetadas para verter água, podendo iniciar o processo de ruptura do maciço da barragem. Este fenômeno pode ser causado por falha operacional durante a cheia (causa humana), pela ocorrência de uma cheia extraordinária, que resulta na incapacidade de o vertedouro liberar grandes volumes de água (pode ser falha do projeto ou um risco assumido) ou pela formação de uma onda dentro do reservatório, causada pelo deslizamento de uma grande quantidade de terra das encostas ou terremotos (causas naturais). A brecha se inicia em um ponto fraco qualquer da barragem e cresce por erosão, numa velocidade que depende das características do reservatório e do material da barragem (COLLINSCHONN, 1997).

Figura 4: Formação de brecha de ruptura por galgamento - a) início em um ponto mais fraco; b) brecha em forma de "V"; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão.

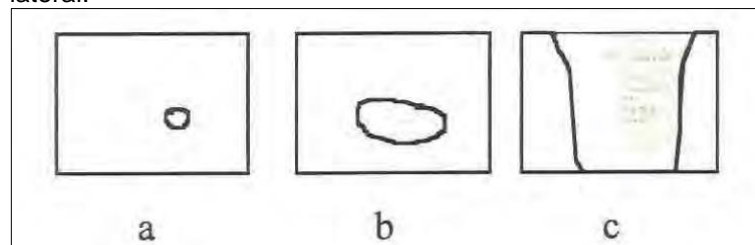


Fonte: Johnson e Illes (1976) *apud*. Collinschonn (1997).

Ladeira (2007) define o piping (Figura 5) como a formação de um tubo de escoamento preferencial, causado por erosão interna regressiva. A falha por piping se inicia do talude de jusante e se direciona à montante do maciço de terra compactada.

O surgimento de uma falha por piping em uma barragem ocorre quando um poro se forma em uma localização arbitrária na estrutura, expandindo-se progressivamente em todas as direções até o ponto de colapso.

Figura 5: Formação da brecha por entubamento ou *piping*. a) Surgimento do poro (pode ser na base da barragem); b) Aumento por erosão; c) Colapso da porção superior e erosão lateral.



Fonte: Johnson e Illes (1976) *apud*. Collinschonn (1997).

2.2.2 Histórico de Ruptura

Considerado o maior desastre socioambiental do país no setor de mineração, o incidente de ruptura da barragem de Fundão, da empresa mineradora Samarco, em Mariana (MG), resultou na liberação de aproximadamente 45 milhões de metros cúbicos de rejeitos no meio ambiente. O desastre ocorreu em 5 de novembro de 2015. Compostos principalmente por óxido de ferro e sílica, os rejeitos fluíram além da barragem de Santarém, percorrendo 77 km nos rios Gualaxo do Norte e do Carmo antes de atingir o rio Doce. A lama cobriu o subdistrito de Bento Rodrigues e deixou um rastro de destruição até o litoral do Espírito Santo, percorrendo 663,2 km

de cursos d'água. A tragédia resultou na perda de 19 vidas e na destruição de 1.469 hectares, incluindo Áreas de Preservação Permanente (APPs) (IBAMA, 2016).

A Figura 6 ilustra parte dos danos causados no subdistrito de Bento Rodrigues. De acordo com Ferreira et al. (2017), no momento da ruptura, a barragem de Fundão estava passando por um processo de alteamento a montante. Estudos revelaram que um dos diques de contenção estava estruturalmente instável, incapaz de suportar um novo alteamento, e identificaram uma alta taxa de liquefação nos rejeitos anteriormente depositados.

Figura 6: Vista de Bento Rodrigues após a ruptura.



Fonte: Ohde (2016) *apud*. Ferreira et al. (2017).

Pouco mais de três anos após o desastre em Mariana, outro significativo rompimento ocorreu a cerca de 70 km, no município de Brumadinho, também em Minas Gerais. Em 25 de janeiro de 2019, a Barragem 1 da mina do Córrego do Feijão, pertencente à mineradora Vale, se rompeu, liberando 12,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos que atingiram a comunidade Vila Ferteco e o rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco (WETERMAN; GALVÃO, 2019). Segundo a Vale (2022), 270 pessoas perderam a vida em Brumadinho. Isso se deve ao fato de que a área administrativa e o refeitório da empresa estavam localizados a jusante da barragem, sendo atingidos cerca de três minutos após o rompimento. Conforme matéria publicada pelo G1 (2019), nenhuma sirene de emergência foi acionada no momento do acidente, dificultando a evacuação do local.

O rompimento da Barragem 1 também ocorreu devido ao fenômeno de liquefação, causado por perfurações verticais realizadas em um ponto crítico da estrutura (Mansur, 2021). A Figura 7 mostra a área inundada em Brumadinho.

Figura 7: Área inundada em Brumadinho



Fonte: Moriyama (2019).

2.3 SEGURANÇA DE BARRAGENS

2.3.1 Legislação Brasileira

Após os desastres de Mariana e Brumadinho, a segurança das barragens de rejeito no Brasil tornou-se uma questão urgente. Para evitar novas tragédias, em 2020 o governo federal modificou a lei que regula o setor, a lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A nova lei, nº 14.066/2020, estabelece normas mais rígidas e penalidades mais severas para os responsáveis pelas barragens. Uma das principais mudanças é a proibição do método de alteamento a montante, que consiste em elevar a altura da barragem usando o próprio rejeito previamente depositado como base. Esse método é considerado mais barato, mas também mais instável e perigoso. As barragens que já foram construídas com esse método deveriam ser desativadas e descaracterizadas até 25 de fevereiro de 2022 (BRASIL, 2020), porém nem todas as empresas conseguiram cumprir este prazo.

O SNISB é um sistema que coleta e divulga dados sobre as barragens existentes no Brasil. O sistema classifica as barragens de acordo com a sua Categoria de Risco (CR), que classifica a possibilidade de ocorrência de um acidente ou desastre, e o Dano Potencial Associado (DPA), que classifica de acordo com o dano que pode ocorrer devido ao rompimento ou mau funcionamento da barragem,



independente da possibilidade de ocorrência (ANM, 2022). Segundo o SNISB (2023) (acesso em 23/04/2023), há 24.226 barragens registradas no país, de diferentes tipos e finalidades, sendo 921 dessas, fiscalizadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Segundo a ANM (2023), 457 barragens estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) por apresentarem pelo menos uma das seguintes características:

- altura do maciço maior ou igual a 15 metros;
- capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³;
- contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- categoria de dano potencial associado médio ou alto;
- categoria de risco alto (BRASIL, 2010).

A lei nº 14.066/2020 estabelece a obrigatoriedade de execução de um mapa de inundação, considerando o pior cenário identificado, para empreendimentos que possuam barragem de rejeito inseridas no PNSB (BRASIL, 2020).

Os mapas de inundação mostram as áreas que podem ser afetadas por um eventual ruptura ou vazamento de uma barragem de rejeito de mineração. Esses mapas devem ser elaborados pelos empreendedores responsáveis pelas barragens e enviados à Agência Nacional de Mineração (ANM), conforme a Resolução ANM nº 95/2022. Os mapas de inundação devem indicar, separadamente, a zona de autossalvamento (ZAS) e a zona de segurança secundária (ZSS), que são as áreas onde há maior risco para as pessoas e o meio ambiente em caso de emergência. O PSB deve ser atualizado periodicamente e estar de acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e as normas da ANM.

2.3.2 Análise de Risco

A segurança é um fator primordial em barragens de rejeito, devendo ser priorizada em todas as etapas, desde o início do projeto até o seu descomissionamento. Mesmo o projeto e a construção sendo adequados, deve-se estabelecer mecanismos e procedimentos que possibilitem a detecção prévia das situações de risco e as medidas para mitigá-las (BALBI, 2008 *apud*. LAURIANO, 2009).



Segundo Silva (2017), o gerenciamento de riscos é responsável por delimitar os níveis de tolerância acerca dos riscos e as medidas de controle que poderão ser utilizadas para cada caso. Seu principal objetivo é auxiliar na tomada de decisões acerca desses riscos, observando se as medidas em vigor são adequadas, e, caso não sejam, pensar em novas soluções.

No caso das barragens, deve-se adotar um plano de segurança, a fim de identificar e descrever cenários que representem riscos à integridade da barragem. Esse plano deve conter medidas estruturais que devem ser tomadas para garantir a segurança da estrutura, além de medidas como sistemas de alerta, zoneamento de riscos, treinamentos para as populações a jusante, etc.

2.4 ANÁLISE DA RUPTURA

Brasil (2005) sugere que se considere diferentes cenários de ruptura, devido a impossibilidade de validar os resultados de um estudo de ruptura, fazendo com que não seja possível escolher um único conjunto de parâmetros para a simulação da onda de cheia.

Viseu e Martins (1997) *apud* Brasil (2005) recomendam que três cenários sejam estabelecidos, um de operação sob condições de cheia extrema e dois de ruptura hipotética da barragem. Pode-se utilizar também um cenário em se considera a onda de cheia proveniente apenas da ruptura da barragem, denominado *sunny day dam failure*, onde se desconsidera o hidrograma afluente ao reservatório (NRM, 2002 *apud* BRASIL, 2005). Segundo Brasil (2005), os quatro cenários representativos para um estudo de ruptura são:

- Cenário extremo de ruptura: define a envoltória máxima para as áreas de risco a jusante. Deve ser utilizado para estabelecer o plano de emergência e o sistema de avisos e alertas;
- Cenário de ruptura mais provável: é o que melhor se ajusta a uma situação real. Deve-se utilizá-lo para fins de uso e ocupação do território a jusante;
- Cenário de operação extrema: considera um evento de cheia que leva o funcionamento dos órgãos extravasores a condições críticas, porém sem ocorrer o colapso da estrutura;

- Cenário considerando somente a ruptura: o hidrograma afluente ao reservatório é desconsiderado, sendo a onda de cheia proveniente apenas da ruptura da barragem.

De acordo com Silva (2017), o Comitê Internacional de Grandes Barragens recomenda, em seu Boletim 111, a execução de quatro passos para a análise da ruptura de uma barragem: elaboração do hidrograma de ruptura, propagação da onda de cheia, geração dos mapas de inundação e elaboração de Planos de Contingência.

2.4.1 Hidrograma de ruptura

Barfield *et al.* (1981) *apud.* Silva Júnior (2013) define que o hidrograma com decaimento parabólico é o mais condizente com casos ocorridos em barragem de terra, sendo regido pela equação 1. O modelo está representado na Figura 8.

$$Q(t) = Q_p \times \left[\left(\frac{t}{t_p} \times e^{\left(1 - \frac{t}{t_p}\right)} \right) \right]^k \quad (1)$$

Onde:

Q = Vazão (m^3/s);

t = variável independente relativa ao tempo (s);

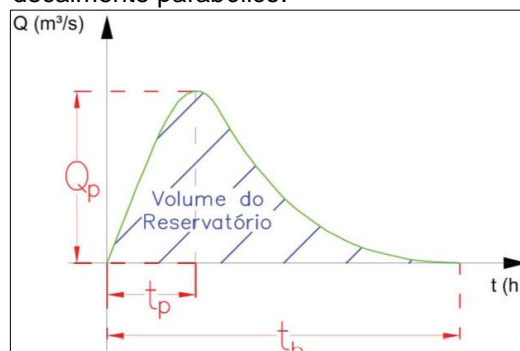
Q_p = Vazão de pico (m^3/s);

t_p = tempo de pico (s);

e = constante de Euler (---);

k = fator de ponderação (---).

Figura 8: Hidrograma de ruptura com decaimento parabólico.



Fonte: Silva Júnior (2013).

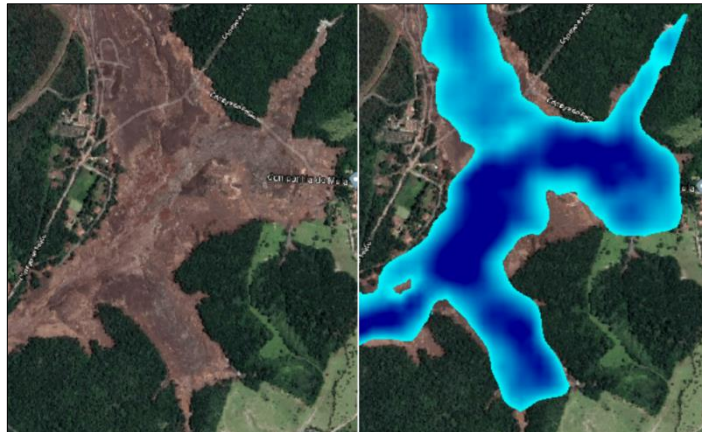
2.4.2 HEC-RAS

HEC-RAS é um *software* gratuito desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* em 1995, com o intuito de se realizar simulações uni e bidimensionais de fluxos constantes e instáveis (USACE, 2023).

Os métodos de rompimento possíveis de serem utilizados no *software* são *overtopping* e *piping*, cada um com seus respectivos dados de entrada. Os resultados da simulação serão dados através de hidrogramas, níveis de água e velocidade.

Raman e Liu (2019) utilizaram o HEC-RAS para elaborar um modelo de inundação para o rompimento da Barragem 1 da mina do Córrego do Feijão, com o intuito de comparar a área de inundação real causada pelo rompimento da barragem com a área de inundação hipotética elaborada com dados de fácil acesso e gratuitos, como imagens SRTM fornecidas pela NASA e imagens do *Google Earth*. A Figura 9 apresenta uma correlação entre o modelo observado e o simulado, sendo possível observar semelhanças entre o caso real e a simulação.

Figura 9: Comparação entre área afetada observada e modelada



Fonte: Raman e Liu (2019).

2.5 ÁREA DE ESTUDO

Localizada no município de Cerro Azul, no Paraná, a barragem Pinheirinho foi construída no início da década de 1990, com o objetivo de retenção e sedimentação de finos de rejeito do beneficiamento de fluorita. O talude foi construído pelo método de etapa única, composta por terra argilosa heterogênea, altamente compactada com



equipamentos pesados e pé de carneiro, possuindo filtro de areia e enrocamento de blocos de rochas magmáticas à montante e à jusante, com fundação em rocha sã, na qual foi engastada.

O talude apresenta 37 metros de altura máxima, 132 metros de comprimento e largura da crista de 5 metros, sua cota máxima é 402,5 metros. A inclinação do talude de montante é 34° e do talude de jusante é 26° e 34°. A barragem também conta com um vertedouro localizado no lado esquerdo do coroamento a montante, sistema de drenagem, marco de deslocamento superficial, 10 piezômetros, régua limnimétrica e filtro horizontal e vertical.

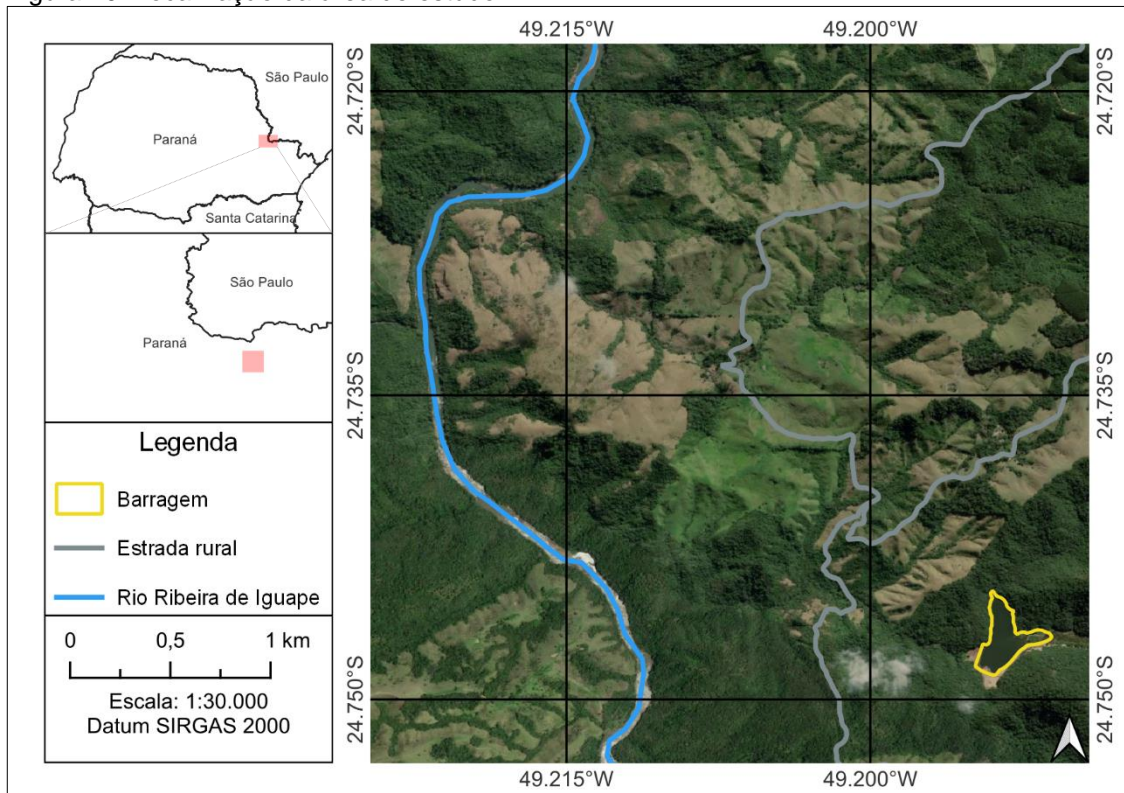
A barragem atualmente opera com cota máxima de 400 metros, porém foi projetada para operar até a cota 402,5 metros, deixando 2,5 metros de folga entre a crista o nível máximo. A capacidade total, considerando uma cheia até a cota máxima é de 672.407,9 m³, entretanto possui uma capacidade útil de aproximadamente 450.000 m³.

O reservatório foi construído com profundidade aproximada de 24,5 metros, porém devido seus 30 anos de operação, há muito rejeito sedimentado no fundo, fazendo com que atualmente a profundidade máxima seja de aproximadamente 11,5 metros.

A Figura 10 apresenta a localização da área de estudo, possibilitando identificar que não há população localizada a jusante, além da presença de uma estrada rural e do rio Ribeira de Iguape.

A barragem Pinheirinho se encontra inserida no PNSB devido a altura do talude e ao dano potencial associado do empreendimento, tornando necessária a criação de um modelo de inundação, que deve ser apresentado ao órgão fiscalizador.

Figura 10: Localização da área de estudo.



Fonte: Do autor (2023).

2.5.1 Rejeito

Em setembro de 2018 foram realizados ensaios laboratoriais para classificar os resíduos sólidos depositados na barragem Pinheirinho, visando identificar se o rejeito da mineração de fluorita é prejudicial ao meio ambiente.

O estudo foi realizado por uma empresa especializada em análises laboratoriais localizada em Curitiba, no estado do Paraná. Para classificar o resíduo fez-se o uso das seguintes NBR's – ABNT:

- NBR – 10004:2004 – Classificação de Resíduos Sólidos;
- NBR – 10005:2004 – Lixiviação de Resíduos;
- NBR – 10006:2004 – Solubilização de Resíduos;
- NBR – 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos.

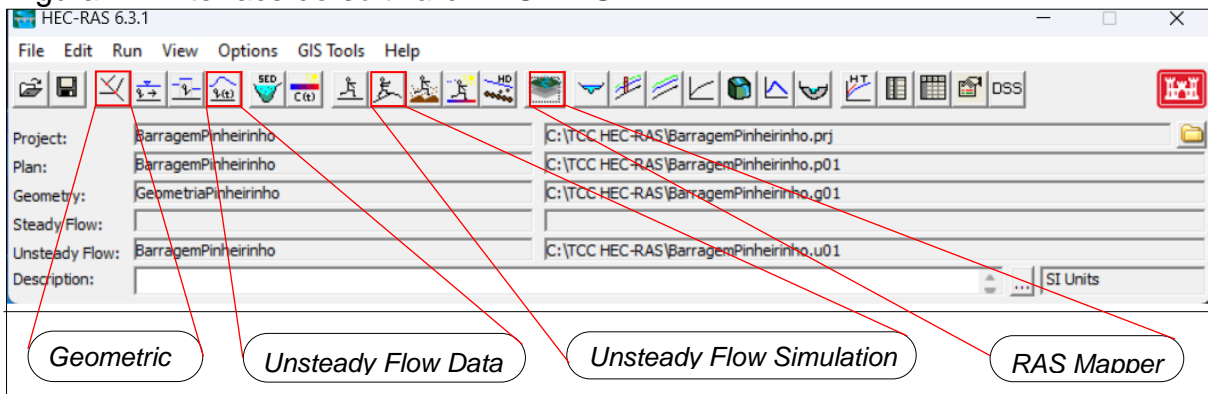
Comparando as normas com os resultados obtidos nas análises, foi constatado que o rejeito apresenta teores de bário, ferro e fluoretos acima dos limites máximos estabelecidos pelas normas (MINERAÇÃO NOSSA SENHORA DO CARMO, 2018). A empresa classificou o rejeito de fluorita depositado na barragem

Pinheirinho como sendo resíduo não inerte (Classe II A), sendo então um resíduo não perigoso, mas que pode ser prejudicial ao meio ambiente se descartado de maneira incorreta.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos experimentais empregados na criação de um mapa de inundação, decorrente de um cenário hipotético de ruptura de uma barragem. Os dados referentes a barragem foram fornecidos pela empresa Mineração Nossa Senhora do Carmo. Para o desenvolvimento do projeto, será utilizado o *software* HEC-RAS, na versão 6.3.1 (Figura 11).

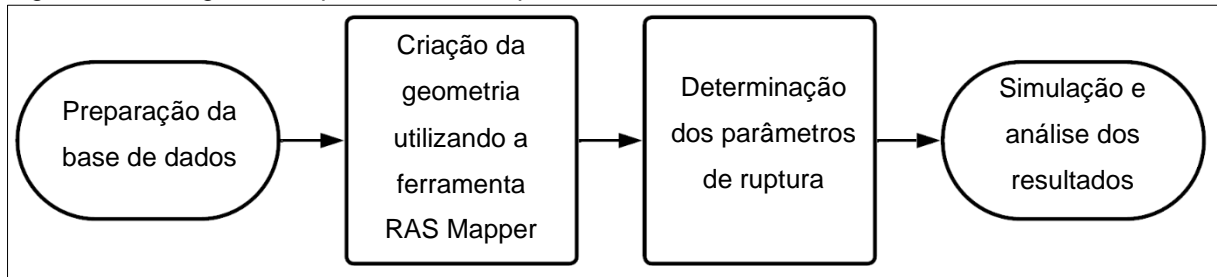
Figura 11: Interface do *software* HEC-RAS.



Fonte: Do autor (2023).

Para o desenvolvimento do presente estudo, será utilizada a metodologia proposta por Mendes (2022), que consiste em três principais fases de trabalho, sendo elas, o pré-processamento, seguido pelo processamento e finalizada com o pós-processamento. A Figura 12 representa, por intermédio de um fluxograma, as etapas envolvidas na realização do trabalho.

Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Do autor (2023).

3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Esta etapa consistiu em realizar a coleta e organização dos dados que serão utilizados para gerar o modelo de inundação no programa HEC-RAS.

3.1.1 Dados necessários para o estudo

Para a realização do estudo de ruptura de barragem, foram utilizadas as seguintes informações:

- Localização do empreendimento;
- Modelo Digital de Elevação (MDE) do vale localizado a jusante da barragem;
- Características físicas e dimensões do talude;
- Volume do reservatório;
- Informações sobre o vale a jusante.

O MDE utilizado para o desenvolvimento do estudo será o fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do projeto Topodata, o qual disponibiliza dados topográficos em cobertura nacional, com equidistância de 30 metros (INPE, 2023). As demais informações foram fornecidas pela empresa Mineração Nossa Senhora do Carmo.

3.2 PROCESSAMENTO

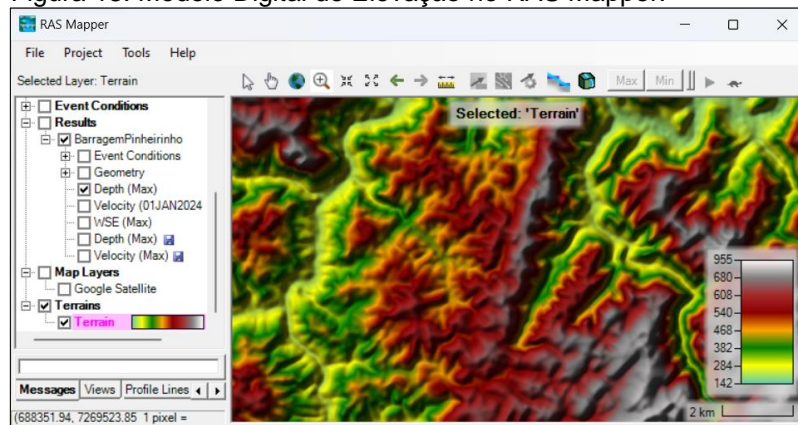
Para dar início ao projeto foi definida a projeção cartográfica utilizada, neste caso a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) *Datum* Sistema de

Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) na zona UTM 22S, correspondente ao local em que a barragem pinheirinho se localiza; na sequência foram criadas as geometrias necessárias.

3.2.1 Geometrias

Com a projeção já definida, utilizou-se a ferramenta *RAS Mapper* para a geração e edição das geometrias do projeto. Primeiramente, o MDE é inserido como modelo de terreno (*Terrain*), o qual serviu de base para as demais feições utilizadas. A Figura 13 mostra o resultado da interface do *software* utilizando a camada *terrain*.

Figura 13: Modelo Digital de Elevação no RAS Mapper.



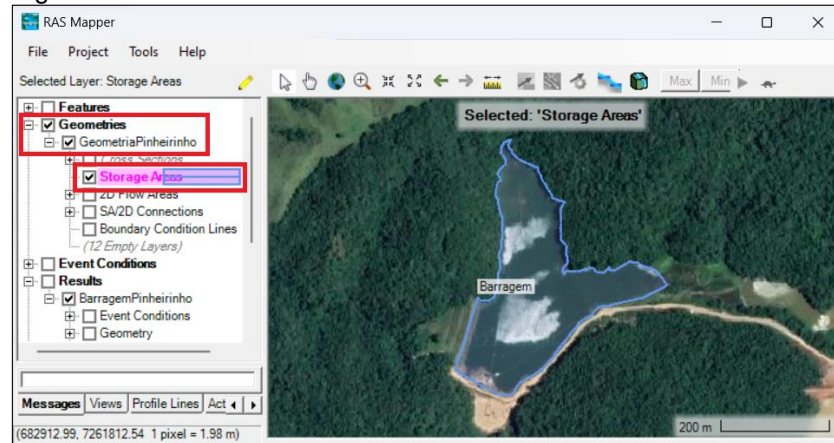
Fonte: Do autor (2023).

Um arquivo deve ser criado no menu *Geometries* para armazenar as feições digitalizadas. A primeira desenhada é a área de armazenamento (*Storage Areas*), denominada Barragem (Figura 14) correspondente à área em planta; nesta etapa pode-se utilizar imagens de satélite (*Google Satellite*) como referência para identificar os limites do reservatório, adicionando a camada no menu *Map Layers*.

Em seguida é definida a área localizada a jusante da barragem que será afetada pelo fluxo (*2D Flow Areas*), denominada AreaJusante, identificada na Figura 15. Os limites da área de estudo devem ser definidos observando as cotas máximas relacionadas ao vale em que se encontra o reservatório. Após finalizar o desenho dos polígonos cria-se uma malha (*Mesh*), na função *Edit 2D Area Properties*, definindo um espaçamento de 20 metros em DX e DY e gerando os pontos de cálculo com todas

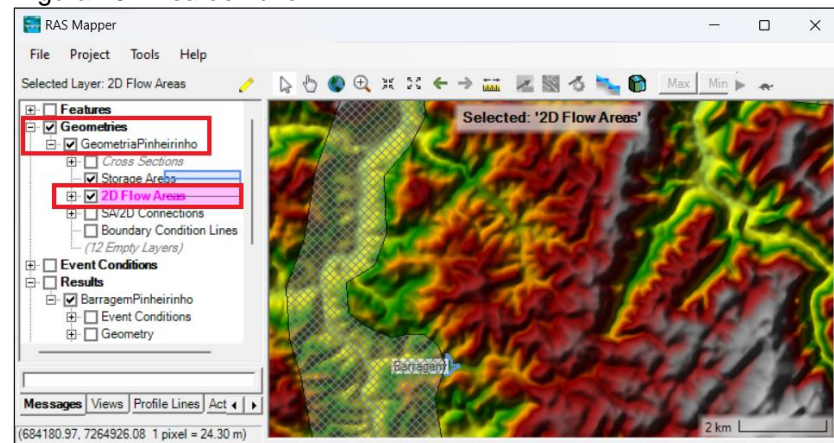
as *breaklines* (Figura 16). Ainda na mesma função é possível definir o coeficiente de rugosidade de Manning, considerado 0,035 no estudo.

Figura 14: Área de armazenamento.



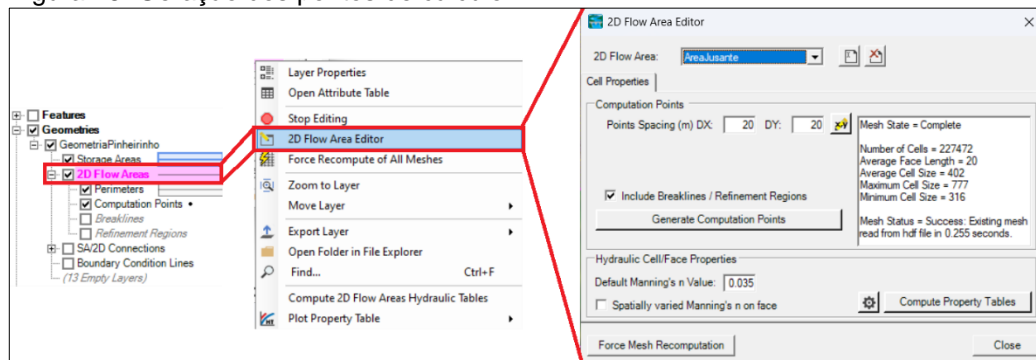
Fonte: Do autor (2023).

Figura 15: Área de fluxo.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 16: Geração dos pontos de cálculo.



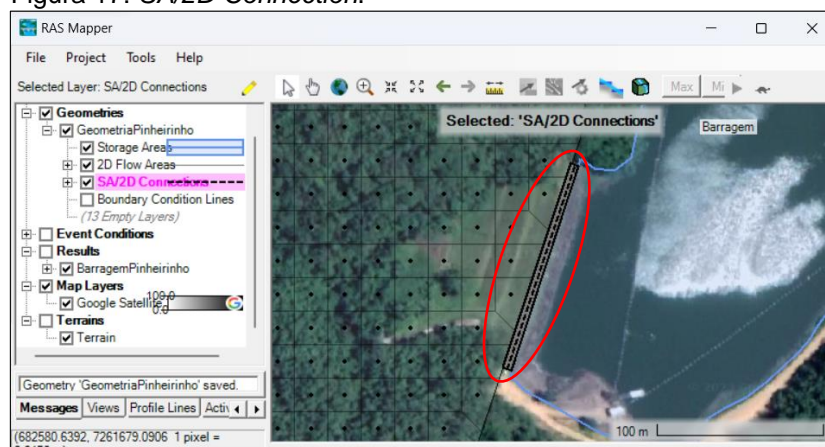
Fonte: Do autor (2023).

Após concluir a criação das poligonais, cria-se as estruturas lineares:

- *SA/2D Connection*, que conectará a área de armazenamento e a área de fluxo, representando o talude da barragem (Figura 17);
- *Boundary Condition Line*, que delimitará onde finaliza a feição de fluxo (Figura 18).

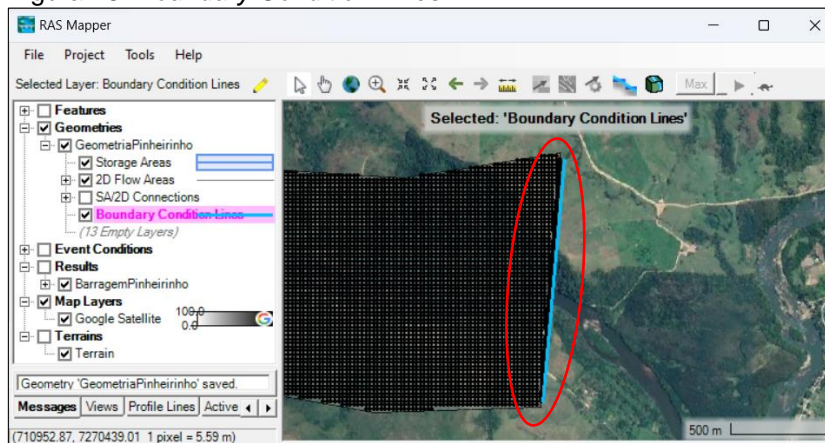
Recomenda-se iniciar a feição *SA/2D Connection* da esquerda para a direita no sentido de montante para jusante, pois assim o programa definirá o sentido de deslocamento do fluxo.

Figura 17: *SA/2D Connection*.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 18: *Boundary Condition Lines*.



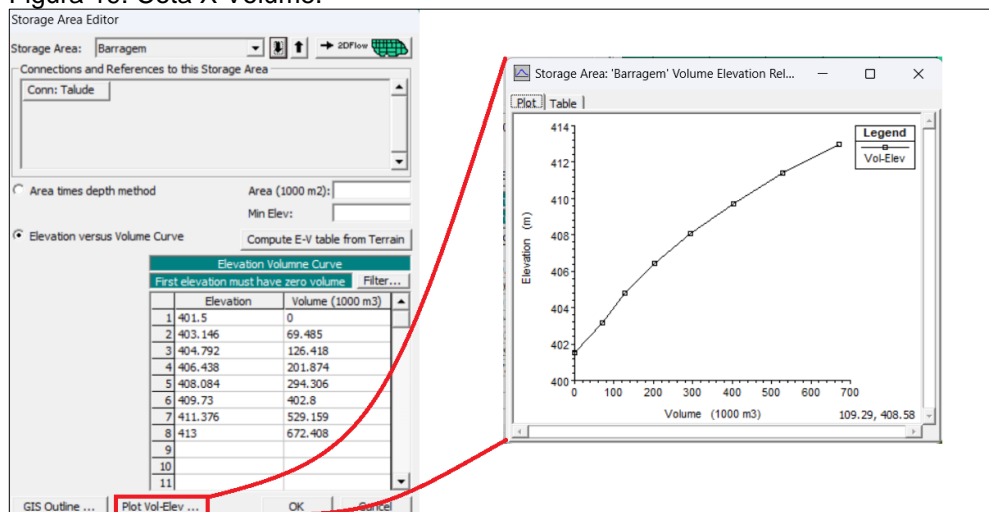
Fonte: Do autor (2023).

3.2.2 Parâmetros de rompimento

Após finalizar as geometrias e informações espaciais de referência, abre-se a ferramenta de edição de geometria (*View/Edit Geometry*) para definir os parâmetros de ruptura da barragem.

Para delimitar os parâmetros de volume do reservatório, deve-se inserir os dados de elevação e volume no menu *Storage Area Editor*, que irá gerar um gráfico de elevação por volume, como representado na Figura 19. Os dados utilizados nesta etapa foram disponibilizados pela empresa Mineração Nossa Senhora de Carmo.

Figura 19: Cota X Volume.

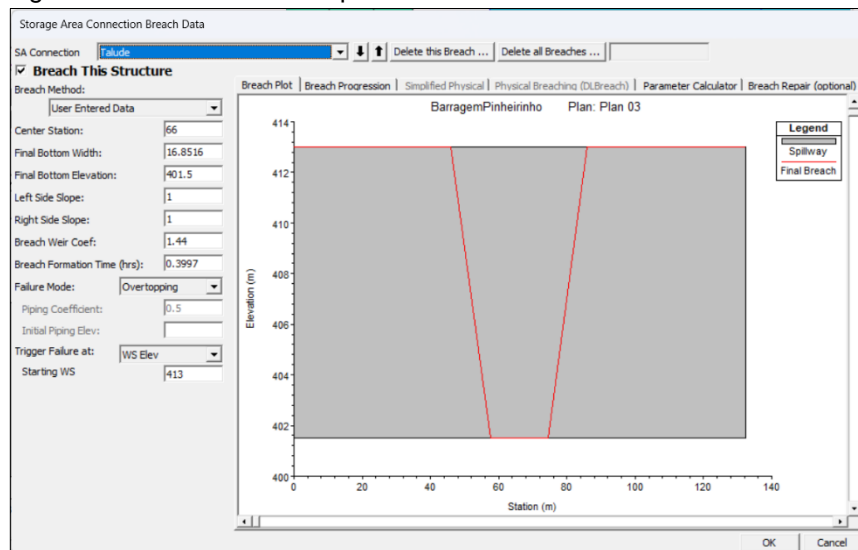


Fonte: Do autor (2023).

No editor de dados entre as conexões (*Connection Data Editor*), deve-se inicialmente definir a largura e comprimento da crista no menu *Storage Area Connection Weir Data*, sendo respectivamente 128,5 e 5 metros. Em seguida deve-se inserir os parâmetros de ruptura do talude no menu *Storage Area Connection Breach Data* (Figura 20).

Segundo Froehlich (2008), em casos de ruptura por galgamento a relação de declividade da fissura deve ser 1.0H, a brecha média (B_m) é definida pela equação 2 e o tempo de formação (t_f) pela equação 3. A profundidade da brecha foi considerada igual a altura total do volume de água no reservatório, com 11,5 metros.

Figura 20: Parâmetros de ruptura.



Fonte: Do autor (2023).

$$B_m = 0,27 \times k_0 \times V_w^{0,32} \times H_b^{0,04} \quad (2)$$

$$t_f = 63,2 \times \sqrt{\frac{V_w}{g \times H_w^2}} \quad (3)$$

Onde:

B_m = largura média da brecha (m);

K_0 = 1,3 para galgamento e 1,0 para entubamento (---);

V_w = volume de água durante a ruptura (m^3);

H_b = altura final da brecha (m);

t_f = tempo de formação da brecha (s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

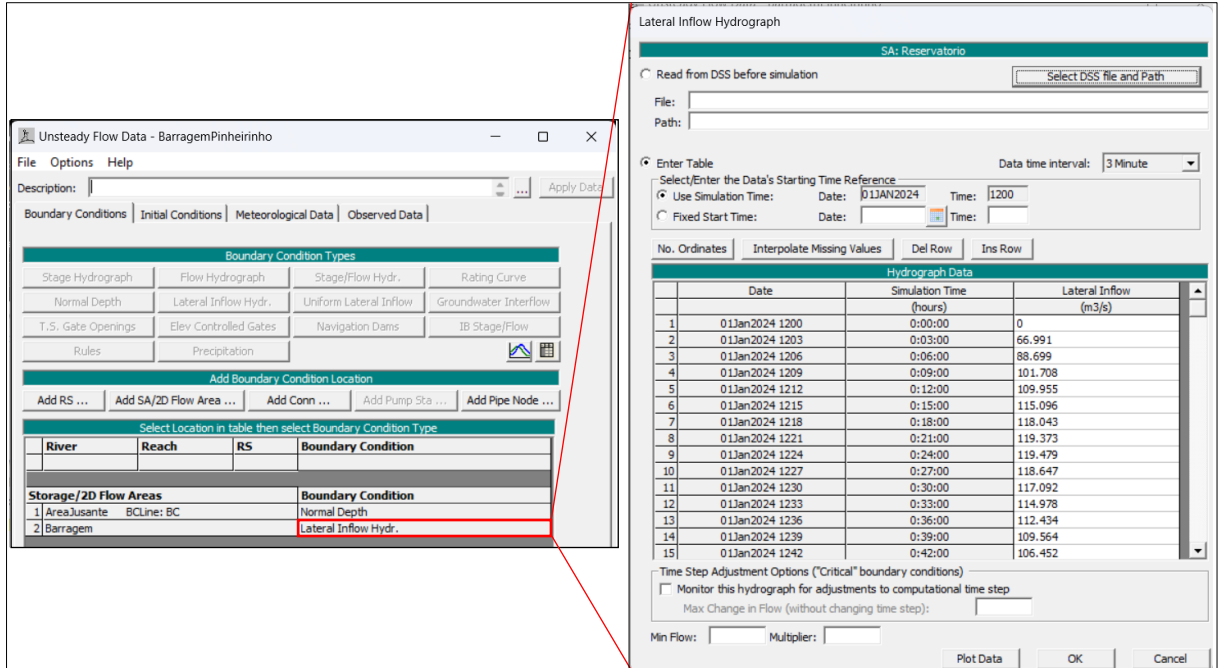
H_w = altura do volume armazenado no reservatório no início da ruptura (m).

3.2.3 Parâmetros hidrográficos

A última etapa antes de realizar a simulação consiste em definir as vazões de determinados intervalos de tempo, gerando um hidrograma de ruptura, cujas informações devem ser inseridas na condição de contorno *Lateral Inflow Hydrograph*, definida para a área de armazenamento na ferramenta *Unsteady Flow Data* (Figura

21). Nesta mesma etapa deve ser definida a condição de contorno *Normal Depth*, que será 0,1.

Figura 21: Parâmetros de fluxo instável.



Fonte: Do autor (2023).

U.S. Department of Interior (1988) define a equação 4 para a determinação do tempo de pico, que é 22 minutos e 46 segundos após o rompimento da barragem.

De acordo com Faria *et al.* (2019), o volume do reservatório deve ser igual a área sob a curva do hidrograma, podendo ser representado pela integral definida da função $Q(t)$ no intervalo de zero até o tempo de base (equação 5), além de recomendar o uso do valor máximo de k , pois obtém-se as maiores vazões de pico com menores tempos de base. O valor da vazão atingirá seu pico (Q_p) no instante em que " t " é igual a " t_p ", este valor deve ser alterado até o resultado da integral se igualar ao volume do reservatório.

$$t_p = 0,033 \times H_w \quad (4)$$

$$V = \int_0^{t_b} Q(t) \quad (5)$$

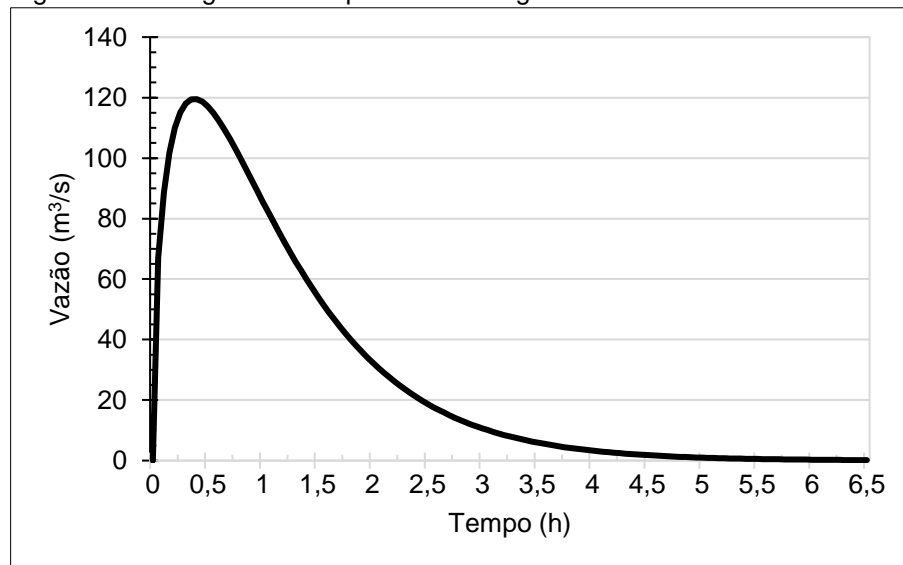
Onde:

t_b = tempo de base (s);

V = volume do reservatório (m^3);

O hidrograma de ruptura da barragem Pinheirinho está representado na Figura 24.

Figura 24: Hidrograma de ruptura da Barragem Pinheirinho.



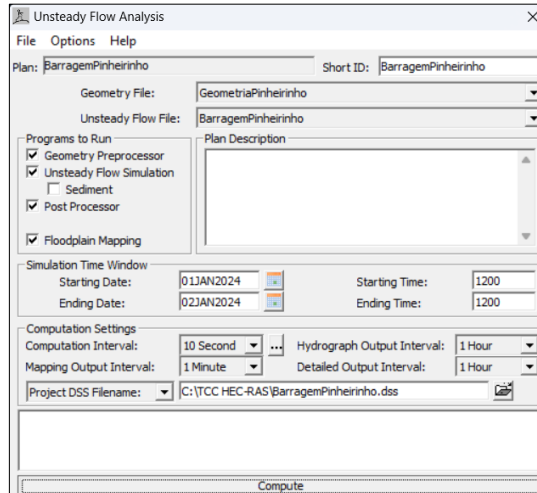
Fonte: Do autor (2023).

3.2.4 Simulação

Com todos os parâmetros já inseridos no *software*, a etapa final consiste em definir o tempo de simulação no menu *Unsteady Flow Analysis* (Figura 25), que no presente estudo foi considerada 24 horas, sendo do dia 1 de janeiro de 2024 às 12h00 até o dia 2 de janeiro às 12h00. Para evitar mudanças abruptas no modelo, deve-se definir o intervalo de amostragem para cada 10 segundos.

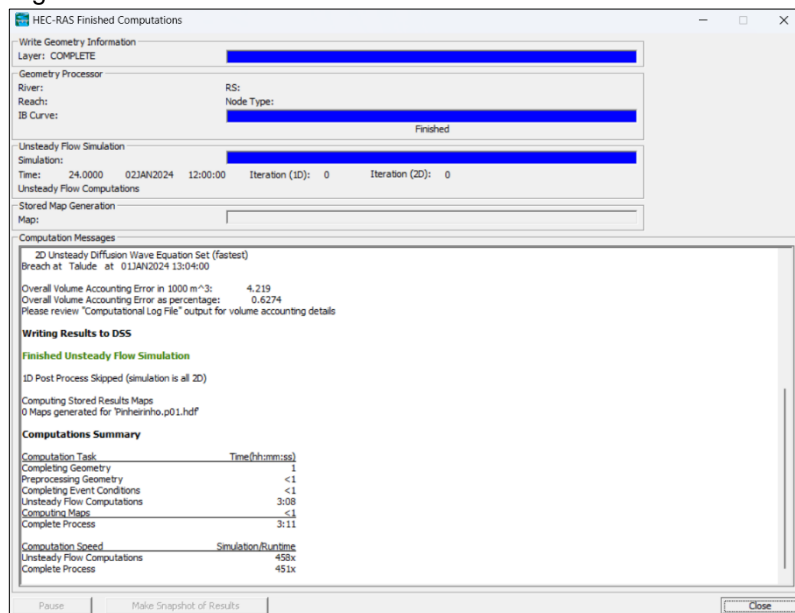
Ao clicar em *Compute* será iniciada a simulação de fluxo instável (Figura 26), podendo demorar alguns minutos para gerar o resultado, que poderá ser observado no menu *RAS Mapper*.

Figura 25: Parâmetros de simulação.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 26: Processamento.



Fonte: Do autor (2023).

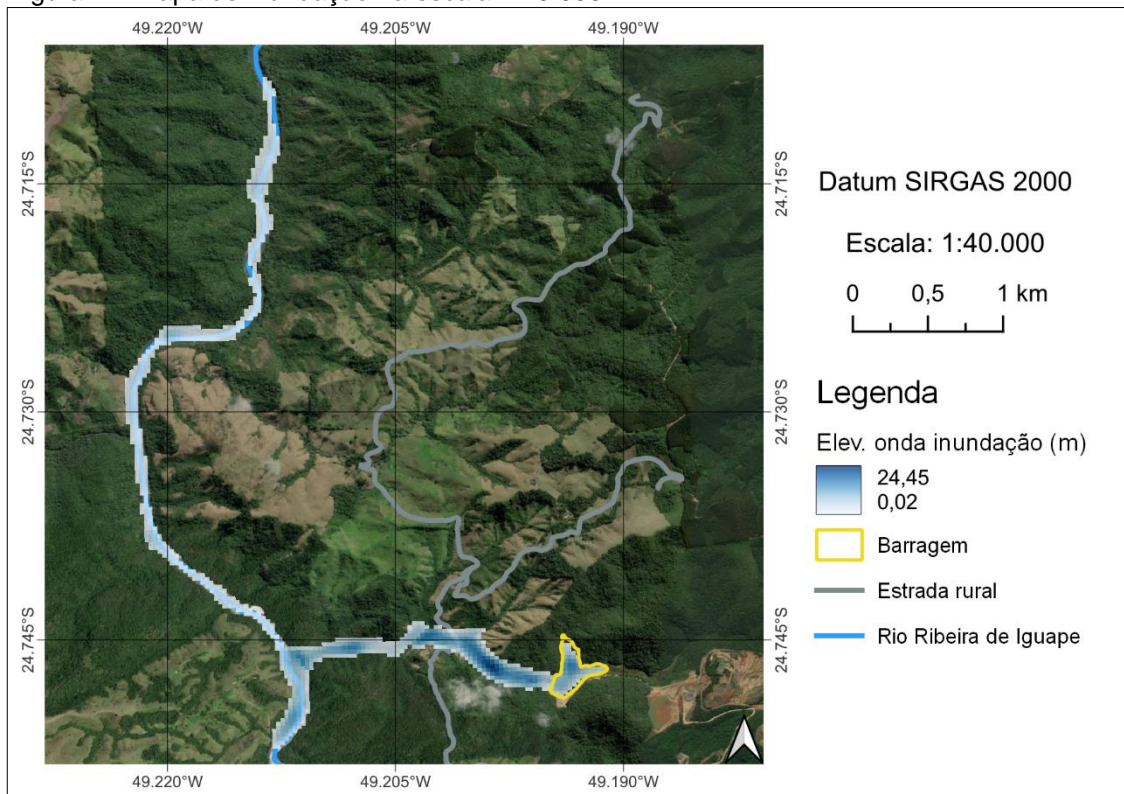
3.3 PÓS-PROCESSAMENTO

A etapa final do estudo consiste em analisar os resultados obtidos e gerar mapas utilizando o programa QGIS, com o intuito de ilustrar a propagação da onda de cheia resultante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *software* utiliza a elevação como parâmetro para seu modelo de inundação, identificando os locais em que foi atingido maior profundidade. A Figura 27 apresenta o resultado obtido com a simulação, que atingiu uma área de aproximadamente 78 hectares, chegando até 24,45 metros em seu ponto mais profundo. Também é possível identificar que a onda de inundação passa por uma estrada rural com uma altura máxima de 14 metros e em seguida atinge o rio Ribeira de Iguape.

Figura 27: Mapa de inundação na escala 1:40.000.



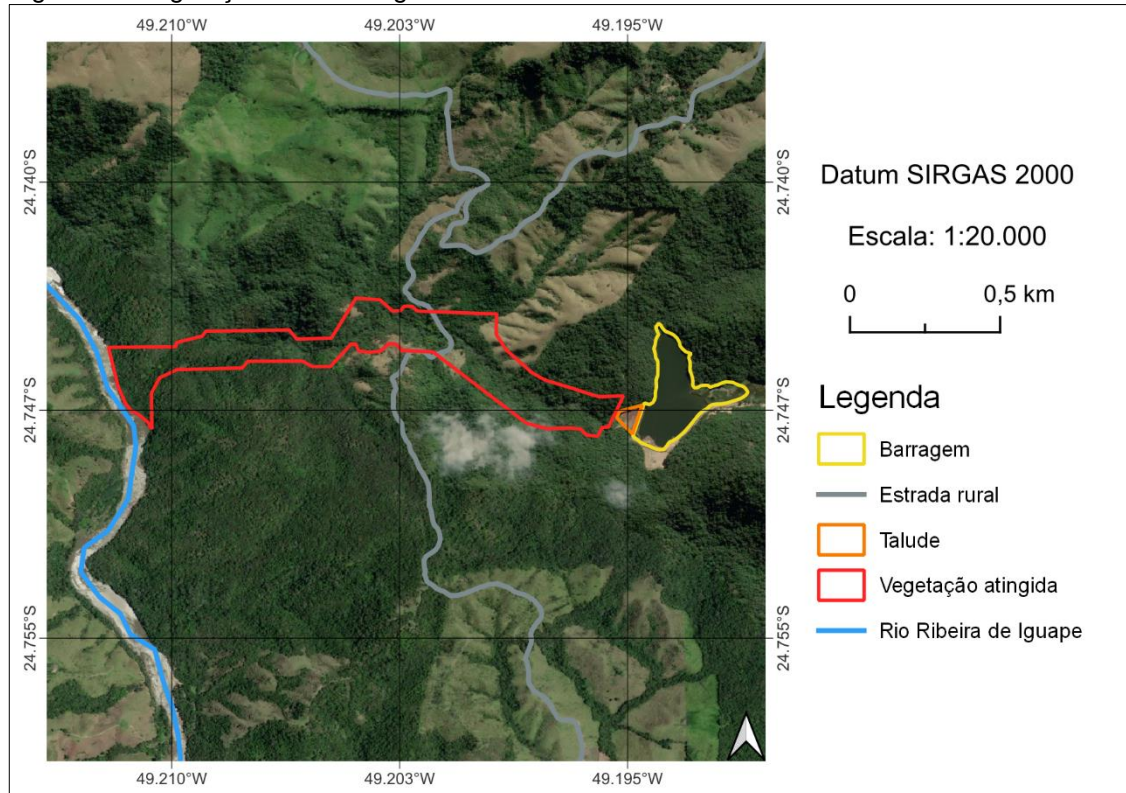
Fonte: Do autor (2023).

A Figura 28 mostra a área de aproximadamente 26 hectares de vegetação nativa que foi atingida pelo rejeito.

Analisando os resultados na ferramenta *RAS Mapper*, foi possível estimar que o rejeito levou 8 minutos para atingir a estrada rural, localizada a aproximadamente 700 metros da barragem, e 15 minutos para percorrer os 1100

metros restantes para chegar ao rio, apresentando uma velocidade média de 1,3 m/s ou 4,7 km/h.

Figura 28: Vegetação nativa atingida.



Fonte: Do autor (2023).

5 CONCLUSÃO

Através da realização da simulação de rompimento da barragem Pinheirinho foi possível estimar a área atingida pelo rejeito proveniente do reservatório, conforme proposto no objetivo do presente trabalho. Durante a execução do projeto foram identificadas inconsistências entre as cotas fornecidas pela empresa e as cotas obtidas através do modelo de elevação utilizado, isso se deu devido à baixa precisão do MDE fornecido pelo INPE no projeto Topodata.

Ao atingir o leito do rio Ribeira o rejeito seguirá seu fluxo em direção ao estado de São Paulo, entretanto esta situação não pôde ser observada no presente estudo devido à complexidade em gerar uma simulação em que o rompimento da barragem acontecesse concomitantemente ao fluxo do rio, sendo necessário um estudo mais aprofundado sobre as funcionalidades do *software*.



Para a realização de estudos mais condizentes com uma situação real, vê-se necessário o uso de dados topográficos realizados *in loco*, visando um Modelo Digital de Elevação mais preciso.

Com o auxílio dos mapas produzidos foi possível constatar a ausência de população a jusante da barragem, tornando desnecessário definir as zonas de autossalvamento e de segurança secundária (ZAS e ZSS, respectivamente).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **Barragens de Mineração**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens>. Acesso em: 15 nov. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **SIGBM**: Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 23 abr. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 fev. 2022.

AMANN, Kurt André Pereira. **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: 31 maio 2023.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS (Minas Gerais). **Roteiro básico para o dimensionamento de barragens de terra no estado de MG**. Disponível em: http://atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html. Acesso em: 05 jun. 2023.



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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010.

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), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 01 out. 2020.

BRASIL, Lucas Samuel Santos. **Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso:** barragem de Rio de Pedras - MG. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/REPA-6HXMEF/1/dissertacao_lucasbrasil__nro265___final.pdf. Acesso em: 29 maio 2023.

COLLISCHONN, Walter. **Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS.** 1997. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

FARIA, Fábio L. F. *et al.* Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, p. 31-37, 4 dez. 2019. Trimestral. Disponível em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/CT/article/view/3246/2614>. Acesso em: 12 out. 2023.



FERREIRA, Gabriel Bonfá; *et al.* **Barragem do Fundão (Mariana)**. 2017. Disponível em: <https://engenhareia.wordpress.com/2017/05/22/barragem-do-fundao-mariana/>
Acesso em: 31 maio 2023.

FROEHLICH, David C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [S.L.], v. 134, n. 12, p. 1708-1721, dez. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE).
[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:12(1708)).

G1 MINAS (Brasil). Barragem da Vale se rompe em Brumadinho, MG. **G1**. Belo Horizonte. 25 set. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/bombeiros-e-defesa-civil-sao-mobilizados-para-chamada-de-rompimento-de-barragem-em-brumadinho-na-grande-bh.ghtml>. Acesso em: 31 maio 2023.

IBAMA. **Rompimento da Barragem de Fundão**: documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. 2016. Disponível em:
<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2020/rompimento-da-barragem-de-fundao-documentos-relac>. Acesso em: 31 maio 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (Brasil). Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **TOPODATA**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 05 jun. 2023.

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE - São Simão**. 2007. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

LAURIANO, André Wilhiam. **Estudo de ruptura da barragem de funil**: comparação entre os modelos fldwav e hec-ras. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de



Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MANSUR, Rafaela. Quatro anos da tragédia em Brumadinho: 270 mortes, três desaparecidos e nenhuma punição. **G1 Minas**. Belo Horizonte. 25 jan. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2023/01/25/quatro-anos-da-tragedia-em-brumadinho-270-mortes-tres-desaparecidos-e-nenhuma-punicao.ghtml>. Acesso em: 05 jun. 2023.

MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba. **Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens**. 1990. 291 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MENDES, Fabrício Alves. **Modelo de inundação para o rompimento hipotético de barragens de rejeito utilizando HEC-RAS**. 2022. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

MINERAÇÃO NOSSA SENHORA DO CARMO. Classificação de resíduos sólidos

MORIYAMA, Victor. **Com a liberação de 12,7 toneladas de rejeitos de minério de ferro, o rompimento da barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, da Vale, destruiu os 9 km do ribeirão Ferro-Carvão e sua mata ciliar, invadiu o rio Paraopeba e sepultou a biodiversidade em ao menos 300 km desse importante afluente do rio São Francisco**. 2019. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/fotografo/victor-moriyama>. Acesso em: 31 maio 2023.



RAMAN, A.; LIU, F. **An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation**. [physics.comp-ph], Cornell, 13 nov. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1911.05219>. Acesso em: 27 jan. 2022.

SILVA, André Felipe Rocha da. **Preparação de base de dados para análise da propagação da onda de cheia proveniente de ruptura de barragem**: estudo de caso: barragem de chapéu d'uvas - mg. 2017. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

SILVA JÚNIOR, José Carlos Guedes da. **Estudo comparativo entre modelos unidimensional e pseudo-bidimensional para simulação da propagação de ondas provocadas pela ruptura de barragens**. 2013. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS (Brasil). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Consultar barragens**. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SOUZA, Felipe Henrique de. **Alteamento de Barragens**: entenda como funciona e suas diferenças! P13 abr. 2022. LinkedIn. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/alteamento-de-barragens-entenda-como-funciona-e-suas-felipe/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 31 maio 2023.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Downstream hazard classification guidelines. **Acer Technical Memorandum**, Denver, v. 11, dez. 1988.

VALE S.A. (Brasil). **Listagem de pessoas sem contato até o momento**. 2022. Disponível em: https://www.vale.com/documents/d/guest/2022-20_12-17h-02_relacao-pessoas_3. Acesso em: 31 maio 2023.



USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2023). HEC-RAS Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center (HEC), 497 p.

VICK, Steven G. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams**. 2. ed. Indian Hills: Bitech Publishers Ltd., 1990. 369 p.

WETERMAN, Daniel; GALVÃO, Daniel. Barragem de Brumadinho tem volume de 12,7 milhões de m³ de rejeito de mineração. **Uol Notícias**. Brasília e São Paulo. 25 jan. 2019. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-estado/2019/01/25/barragem-em-brumadinho-tem-volume-de-1-milhao-de-m-de-rejeito-de-mineracao.htm>. Acesso em: 31 maio 2023.