

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC  
DEPARTAMENTO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Maria Cristina D'Amoreira de Amorim Wilpert

Análise comparativa da modelagem hidráulica do vale a jusante de uma barragem de terra  
utilizando os hidrogramas defluentes induzidos pelo rompimento hipotético

Florianópolis

2021

Maria Cristina D'Amoreira de Amorim Wilpert

**Análise comparativa da modelagem hidráulica do vale a jusante de uma barragem de terra utilizando os hidrogramas defluentes induzidos pelo rompimento hipotético**

Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador: Prof. João Henrique Macedo Sá, Dr

Coorientador: Eng. Edgar Alberti Andrzejewski, Msc.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Wilpert, Maria Cristina D'Amoreira de

Análise comparativa da modelagem hidráulica do vale a jusante de uma barragem de terra utilizando os hidrogramas defluentes induzidos pelo rompimento hipotético / Maria Cristina D'Amoreira de Wilpert ; orientador, João Henrique Macedo Sá, coorientador, Edgar Alberti Andrzejewski, 2021.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,  
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Modelagem de ruptura de barragens. 3. HEC-RAS. 4. HEC-HMS. 5. Mapas de inundação. I. Sá, João Henrique Macedo . II. Andrzejewski, Edgar Alberti . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Maria Cristina D'Amoreira de Amorim Wilpert

**Análise comparativa da modelagem hidráulica do vale a jusante de uma barragem de terra utilizando os hidrogramas defluentes induzidos pelo rompimento hipotético**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Local, 18 de junho de 2021.

---

Profa. Maria Elisa Magri, Dra.  
Coordenador do Curso

---

Prof. João Henrique Macedo Sá, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Eng. Edgar Alberti Andrzejewski, Msc  
Co-Orientador  
Tractebel Engenharia

---

Eng. Giorgia Cleto Moeck, Msc.(a)  
Avaliadora  
Fractal Engenharia

---

Eng. Karine Cristine Teixeira Xavier  
Avaliadora  
Tractebel Engenharia

Este trabalho é dedicado à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu marido Nildo Wilpert Júnior, por estar sempre ao meu lado e ser meu apoio emocional durante todos esses anos.

À todos os meus familiares, em especial à minha mãe Rosângela D'Amoreira de Amorim e meu pai Edson de Amorim por me proporcionar um estudo de qualidade e por serem meus exemplos de determinação. Agradeço por sempre me incentivarem a ir atrás dos meus sonhos.

À minha nova família, os Wilpert, obrigada por sempre estarem disponíveis para me auxiliar. O apoio de vocês foi indispensável nesta caminhada.

Aos meus amigos, por torcerem pelo meu sucesso, pelo companheirismo, amizade e ajuda nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, professor João Henrique Macedo Sá, pela disponibilidade de tempo e suporte durante a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Edgar Alberti Andrzejewski, por todos os ensinamentos.

Aos membros da banca examinadora, Giorgia Cleto Moeck e Karine Cristine Teixeira Xavier, por aceitarem o convite e pelas contribuições realizadas.

Enfim, a todos que contribuíram para a minha formação e realização deste trabalho, o meu muito obrigada!

“Não importa o que aconteça, continue a nadar.”  
(WALTERS, GRAHAM ; DORI ,PROCURANDO NEMO. 2003)

## RESUMO

A modelagem de ruptura hipotética de uma barragem tem um papel de grande importância na garantia da segurança de áreas afetadas. Por este motivo, este estudo é uma das componentes do Plano de Segurança de Barragens que, por sua vez, é uma ferramenta da Política Nacional de Segurança de Barragens, definida originalmente pela Lei 12.334 de 2010 e sua atual redação, Lei nº 14.066 de 2020. Por estes fatores, a análise de ferramentas e abordagens utilizadas para produzir esses estudos se faz necessária. Portanto, esse trabalho tem por objetivo realizar a modelagem de ruptura hipotética de uma barragem de terra utilizando os *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS, visando comparar os resultados obtidos e identificar os impactos nos hidrogramas hipotéticos e suas consequências no vale de jusante. Foram simulados cenários de galgamento e *piping*, devido a sua relevância, e através dos resultados das simulações não foram observadas diferenças significativas entre os modelos de ruptura produzidos por ambos os *softwares*. As vazões de pico obtidas nos hidrogramas apresentaram uma variação de 4,31% para o cenário de galgamento e 4,73% para o cenário de *piping*, sendo os maiores valores observados no HEC-RAS em ambos os cenários. Já a área alagada apresentou uma diferença de menos de 2% no cenário de *piping*, sendo esta a maior variação entre os cenários simulados. Por fim, observa-se que a escolha do *software* teve pouco impacto na mancha de inundação do vale a jusante para este estudo de caso.

**Palavras-chave:** Modelagem de ruptura de barragens, HEC-RAS, HEC-HMS, Mapas de inundação.

## ABSTRACT

The hypothetical failure modeling of a dam plays an important role in ensuring the safety of affected areas. For this reason, this study is one of the components of the Dam Safety Plan which is a tool of National Dam Safety Policy and is originally defined by Law 12.334 of 2010 and its current revision, Law n° 14,066 of 2020. For these factors, the analysis of tools and approaches used to produce these studies is necessary. Therefore, this work aims to perform the hypothetical failure modeling of an earthen dam using the HEC-RAS and HEC-HMS software, in order to compare the results obtained and identify the impacts on the hypothetical hydrographs and their consequences in the downstream valley. Due to their relevance overtopping and piping scenarios were simulated, and through the simulation results, no significant difference was observed between the models produced by both softwares. The peak flows obtained in the hydrographs presented a variation of 4.31% for the overtopping scenario and 4.73% for the piping scenario, being the highest values observed in HEC-RAS in both scenarios. The flooded area showed a difference of less than 2% in the piping scenario, which is the largest variation between the simulated scenarios. Finally, it is observed that the choice of software had little impact on the modeling of the study area.

**Keywords:** dam failure modeling, HEC-RAS, HEC-HMS, floodplain maps.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de barragens por finalidade.....	19
Figura 2 – Tipos de barragens brasileiras por tipo de material de construção.....	20
Figura 3 – UHE Jirau - Rio Madeira.....	21
Figura 4 – UHE Sobradinho - Rio São Francisco.....	22
Figura 5 – UHE Irapé - Rio Jequitinhonha.....	22
Figura 6 – Relação do tipo de rompimento com o tipo de barragem.....	23
Figura 7 – Principais anomalias encontradas em barragens.....	24
Figura 8 – Problemas mais comuns encontrados nas barragens de aterro.....	25
Figura 9 – Formação da brecha por galgamento.....	27
Figura 10 – Formação da brecha por <i>piping</i> .....	28
Figura 11 – Barragem de Banqiao, China.(a e b).....	29
Figura 12 – Rompimento da barragem de Algodões I, Piauí.....	30
Figura 13 – Barragem após o rompimento.....	31
Figura 14 – Normativas sobre barragens a partir da Política Nacional de Segurança de Barragens.....	33
Figura 15 – Parâmetros de brecha.....	34
Figura 16 – Algumas equações empíricas de brechas de ruptura e vazão de pico.....	35
Figura 17 – Fluxograma básico do trabalho.....	43
Figura 18 – Histórico de vazões no rio estudado.....	44
Figura 19 – Geometria para o modelo truncado de rompimento HEC-RAS.....	47
Figura 20 – Curva cota volume do reservatório.....	47
Figura 21 – Estrutura do barramento no HEC-RAS.....	48
Figura 22 – Hidrograma de entrada do modelo de galgamento.....	49
Figura 23 – Parâmetros de brecha utilizados no modelo HEC-RAS para o caso de galgamento.....	50
Figura 24 – Parâmetros de brecha utilizados no modelo HEC-RAS para o caso de <i>piping</i> .....	50
Figura 25 – Curva Cota x Volume do reservatório.....	51
Figura 26 – Curva de descarga do vertedouro.....	52
Figura 27 – Parâmetros de brecha utilizados no modelo HEC-HMS para o caso de galgamento (a) e <i>piping</i> (b).....	53
Figura 28 – Modelo digital de terreno (MDT) levantado.....	54

Figura 29 – Seção exemplo de topobatimetria levantada.....	54
Figura 30 – Resultado da utilização da batimetria para detalhamento do MDT.....	55
Figura 31 – Exemplo de seção inserida no modelo HEC-RAS.....	56
Figura 32 – Geometria utilizada para a modelagem no HEC-RAS. ....	57
Figura 33 – Curva de descarga controlada por operação de comportas da Barragem Y. .....	59
Figura 34 – Hidrograma defluente da barragem para o caso de <i>Piping</i> .....	60
Figura 35 – Hidrograma defluente da barragem para o caso de galgamento. ....	61
Figura 36 – Níveis d’água máximos atingidos na modelagem ao longo do trecho de rio estudado para o cenário de galgamento. ....	63
Figura 37 - Níveis d’água máximos atingidos na modelagem ao longo do trecho de rio estudado para o cenário de <i>piping</i> . ....	64
Figura 38 – Mapa de inundação referente as rupturas hipotéticas por Galgamento. .	65
Figura 39 – Mapa de inundação referente as rupturas hipotéticas por <i>Piping</i> . ....	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Causas de rupturas de barragens. ....	26
Quadro 2 – Dados da brecha. ....	36
Quadro 3 – Descrição do barramento da Barragem X. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de descarga para galgamento e <i>piping</i> .....	39
Tabela 2 – Descrição do Vertedouro.....	45
Tabela 3 – Parâmetros da brecha de ruptura. ....	46
Tabela 4 – Valores de referência do coeficiente de rugosidade da Fórmula de Manning. .....	58
Tabela 5 – Vazão de pico atingida nos modelos simulados considerando a ruptura por galgamento. ....	62
Tabela 6 – Níveis atingidos nos modelos simulados considerando a ruptura por galgamento. ....	62
Tabela 7 – Níveis atingidos nos modelos simulados considerando a ruptura por <i>piping</i> . .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANM - Agência Nacional de Mineração

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

HEC - *Hydrologic Engineering Center*

HMS - *Hydrologic Modeling System*

MDT - Modelo Digital de Terreno

N.A - Nível de Água

PAE - Plano de Ação de Emergência

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PSB - Plano de Segurança de Barragens

RAS - *River Analysis System*

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

UHE – Usina Hidrelétrica

USACE - *United States Army Corps of Engineers*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	HISTÓRICO DO USO DE BARRAGENS.....	18
2.2	TIPOS DE BARRAGEM E PROBABILIDADES DE RUPTURA .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Galgamento .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Erosão interna (<i>Piping</i>) .....</b>	<b>27</b>
2.3	BREVE HISTÓRICO DO ROMPIMENTO DE BARRAGENS.....	29
2.4	LEGISLAÇÕES PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	31
2.5	RUPTURA EM BARRAGEM DE TERRA.....	33
<b>2.5.1</b>	<b>Formação da brecha de ruptura .....</b>	<b>33</b>
2.6	TRABALHOS RELACIONADOS .....	36
2.7	MODELOS COMPUTACIONAIS PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO	37
<b>2.7.1</b>	<b><i>River Analysis System</i> - HEC-RAS .....</b>	<b>38</b>
<b>2.7.2</b>	<b><i>Hydrologic Modeling System</i> - HEC-HMS .....</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	43
3.2	HIPOTESES DE ROMPIMENTO .....	45
3.3	ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMA DE ROMPIMENTO .....	46
<b>3.3.1</b>	<b>Rompimento da barragem no HEC-RAS.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Rompimento da barragem no HEC-HMS.....</b>	<b>51</b>
3.4	ELABORAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO NO HEC-RAS .....	53
<b>3.4.1</b>	<b>Representação da área a jusante do barramento .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Geometria do modelo numérico .....</b>	<b>55</b>

<b>Figura 32 – Geometria utilizada para a modelagem no HEC-RAS.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.3      Condição de jusante do modelo.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.4      Propagação dos hidrogramas de rompimento .....</b>	<b>59</b>
<b>4            RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>60</b>
4.1        HIDROGRAMAS DE RUPTURA .....	60
4.2        DIFERENÇA DE COTAS E VAZÕES .....	62
4.3        MANCHAS DE INUNDAÇÃO.....	64
<b>5            CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma grande rede hidrográfica que é explorada de diversas formas, sendo que a construção de barragens tem importância tanto no setor energético quanto no abastecimento de água, rejeitos de minério entre outros usos, inclusive usos múltiplos. Por se tratar de barreiras artificiais, todos os aspectos técnicos relacionados ao projeto e construção destes empreendimentos merecem uma atenção especial, haja vista que existem riscos de falhas que podem ocasionar danos, que vão desde estruturais, passando por sociais e ambientais.

Diante da complexidade e relevância do assunto, a legislação brasileira prevê ferramentas para garantir a segurança dessas estruturas, possibilitando a mitigação dos riscos envolvidos e objetivando a redução de acidentes e desastres ocasionados por possíveis falhas. A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 e sua alteração na Lei nº 14.066 de setembro de 2020 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e determina como um dos seus instrumentos o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de classificação para as barragens por categoria de risco e dano potencial associado. À vista disso, barragens classificadas com dano potencial médio e alto, ou que possuam alto risco a critério do fiscalizador, tem a obrigatoriedade de elaborarem o Plano de Ação de Emergência (PAE) junto ao Plano de Segurança de Barragens (PSB).

O PAE é um documento que visa à garantia da segurança da população a jusante em uma eventual situação de emergência. Para isso, o plano é baseado na modelagem hipotética da ruptura do barramento em seus pontos de maior fragilidade. Este estudo é de relevância, pois com ele é possível prever os locais que seriam possivelmente afetados e, dessa forma, buscar medidas mitigadoras. Essas medidas incluem, mas não se limitam ao: plano de comunicação da população; instalação de sirenes em localizações específicas; sinalização de rotas de fuga; e demais ações que auxiliem a população a saber como agir em uma situação de emergência.

Os estudos de ruptura de barragens são mecanismos importantes para a definição das áreas de jusante que podem ser afetadas em um efeito de rompimento. A correta identificação da mancha de inundação possibilita insumo de informações para que as entidades competentes estejam preparadas e tenham mecanismos que auxiliem nas tomadas de decisão e na rápida aplicação de medidas mitigatórias. Nestes estudos, são utilizados *softwares* desenvolvidos para essa análise, e a avaliação destes *softwares* deve ser feita de forma contínua, objetivando a garantia da qualidade e da segurança dos resultados.

Haja vista este contexto e, principalmente a importância na garantia da segurança de áreas afetadas por barragens, a análise de ferramentas e abordagens utilizadas para produzir esses estudos se faz necessária. Alguns estudos feitos com comparações de modelos exemplificam esta necessidade. Laureano (2009), Lopes Junior (2020) e Ferla (2018) realizaram a comparação de alguns *softwares* de simulação hidráulica e validaram pontos positivos em utilizar o HEC-RAS - *River Analysis System*, nestas simulações. Já Mendes (2008) utilizou a modelagem no HEC-HMS - *Hydrologic Modeling System* para simular o rompimento de barragens a montante e sua influência no reservatório de uma barragem de grande porte e propôs um índice de vulnerabilidade associado a esse rompimento.

Cabe destacar que os últimos acidentes ocorridos com barragens no Brasil trouxeram à tona a importância dos estudos das rupturas destas estruturas, para possibilitar a prevenção e remediação em situações de crise. Dessa forma, a relevância entre estudos que utilizem metodologias e *softwares* diferentes para as previsões destas situações se tornam cada vez mais necessários. Tendo em vista esta necessidade, buscou-se nesse trabalho comparar metodologias que possibilitem o cálculo dos hidrogramas de ruptura para uma barragem de grande porte, com volume considerável no contexto das barragens brasileiras, localizada em uma região de planície. Acredita-se que, por se tratar de um grande volume hídrico, o impacto gerado por um eventual rompimento desta estrutura, irá ocasionar danos ambientais, sociais e econômicos relevantes, o que corrobora para que este estudo tenha relevância no âmbito de segurança de barragens.

Neste trabalho será apresentada a comparação de duas abordagens alternativas de rompimento de barragens de terra, visando o aprimoramento dos estudos de modelagem de barragens. Para isso foi realizado a modelagem do hidrograma de ruptura de uma barragem real com uso do *software* “HEC-RAS” e “HEC-HMS”, desenvolvidos pelo “*US Army Corps of Enginners*” - USACE. O HEC-RAS é amplamente utilizado em análises de rompimento de barragens, já o HEC-HMS é uma ferramenta mais utilizada para análise de estudos hidrológicos, mas que possui o módulo de ruptura de barragem. Por fim, a avaliação dos impactos decorrentes dos hidrogramas obtidos será feita no modelo HEC-RAS.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar as manchas de inundação de ruptura geradas através do rompimento hipotético de barragem de terra, por meio da utilização e comparação dos hidrogramas defluentes gerados nos *softwares* de simulação HEC-RAS e HEC-HMS.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, são estabelecidos os seguintes:

- Definir o hidrograma defluente da barragem dos cenários propostos para a ruptura de uma barragem de terra, por meio da modelagem nos *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS, incluindo o estudo de alagamento;
- Avaliar as manchas de inundação geradas através do rompimento de barragem simulados no modelo hidrodinâmico HEC-RAS;
- Avaliar os resultados dos modelos de cálculo de hidrograma defluente dos rompimentos proposto para um estudo de caso de uma barragem real.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO DO USO DE BARRAGENS

A água é um recurso natural e de extrema importância para a vida dos seres vivos. Por isso, desde o início do desenvolvimento da humanidade, nossos antepassados buscavam estar próximos a locais com acesso a fontes naturais de água, conseguindo assim obter esses recursos de forma facilitada. Com o desenvolvimento das civilizações surgiu a necessidade de criar mecanismos para a contenção deste recurso a fim de garantir o abastecimento da população.

Apesar de ser difícil datar o surgimento das primeiras barragens criadas pelo homem, registros da fundação da cidade de Memphis, indicam a construção de uma barragem de alvenaria para barrar as águas do rio Nilo localizado a 20 km a montante do local planejado para a capital. Estima-se que a construção ocorreu entre 5.700 e 2.700 a.C. a mando de Menés, o primeiro faraó do início da dinastia egípcia. (Pereira, 2015)

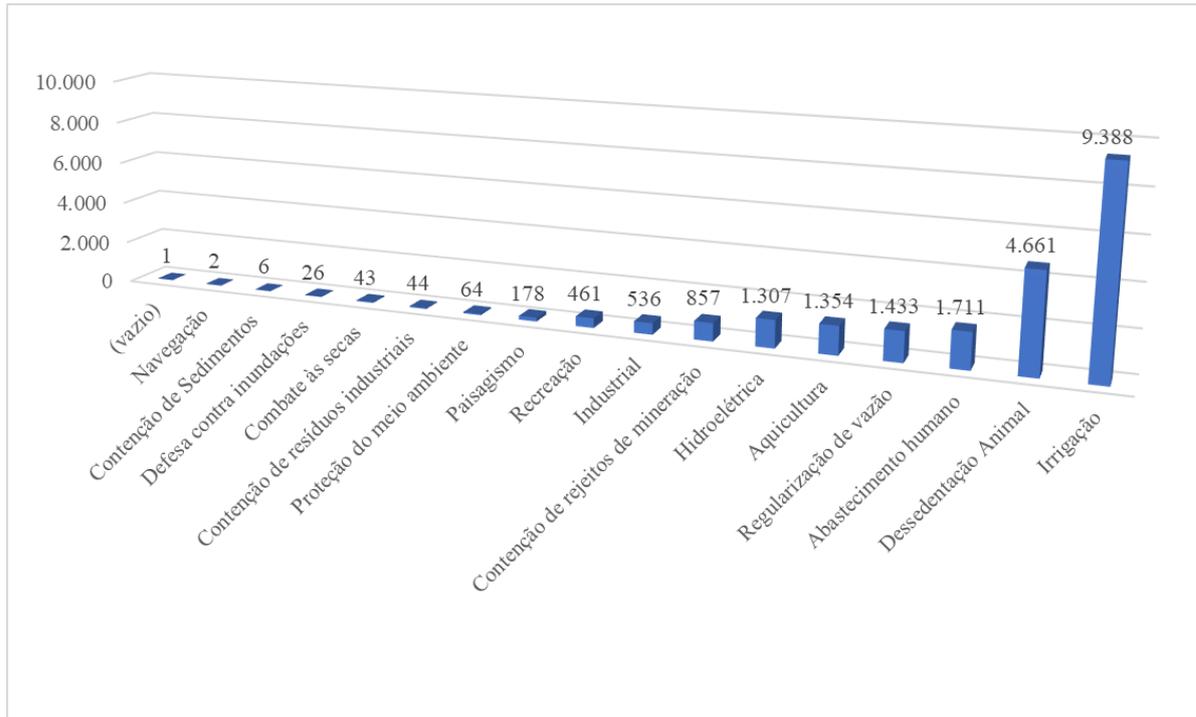
No Brasil, segundo a Lei nº 14.066 de 2020 são consideradas barragens

“qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

No território brasileiro, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB estavam cadastradas em junho de 2021 o total de 22.072 barragens, destas 2.622, que representam aproximadamente 12%, possuem o PAE. Observou-se que para 14.632 das construções não havia informações quanto ao tipo de material utilizado, restando, portanto, 7.440 barragens que possuíam esta informação disponível no cadastro.

Estas barragens são construídas para diversas finalidades, dentre as quais, podemos citar abastecimento humano, irrigação, regularização de vazões e hidrelétricas. A Figura 1 apresenta a relação do número de barragens cadastradas no SNISB por finalidade de utilização, levando em consideração seu principal uso.

Figura 1 – Número de barragens por finalidade.



Fonte: Elaborado a partir da base de dados SNISB (2021).

A partir dos dados apresentados, percebe-se que a maior representatividade quantitativa é das barragens construídas com o objetivo de promover irrigação. As barragens para finalidade hidrelétrica aparecem na sexta posição com um total de 1.307. No entanto, ao analisar a capacidade dos volumes dos reservatórios, estes barramentos representam 99% do volume hídrico total represado.

No Brasil as barragens hidrelétricas ganham destaque pois são a fonte de geração de energia elétrica mais utilizada no país. A primeira usina hidrelétrica no Brasil, de acordo com Pereira (2015) entrou em operação em 1883 na cidade de Diamantina no estado de Minas Gerais, e gerava energia para movimentar bombas d'água para desmonte de formações rochosas das minas de diamante, sendo mais tarde utilizada para abastecimento da cidade. A instalação de novas usinas segue acontecendo ao longo dos anos até que em 1961 é impulsionada com a criação da Eletrobras.

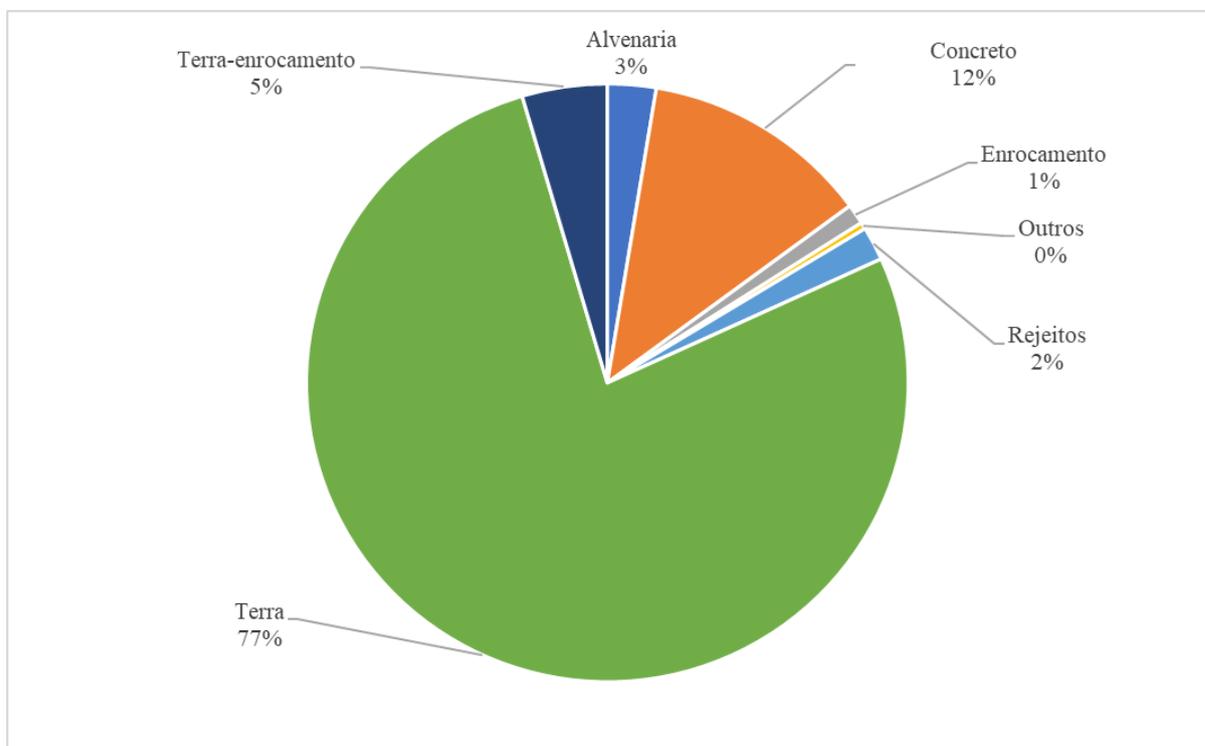
Pelo levantamento apresentado por Pereira (2015) a usina de Itaipu, construída em 2004, ocupa a segunda posição no ranking das maiores usinas do mundo, quando classificadas pela potência instalada, o que corrobora com a relevância das barragens hidrelétricas brasileiras.

## 2.2 TIPOS DE BARRAGEM E PROBABILIDADES DE RUPTURA

Diversos fatores influenciam na determinação do tipo de material utilizado na construção de uma barragem, desde o seu tipo de uso, capacidade de armazenamento e localização geográfica, por exemplo. Segundo Pereira (2015) as barragens mais comumente construídas são: barragens de terra com seção homogênea; barragem de enrocamento com núcleo permeável, face de concreto, face de concreto asfáltico e núcleo asfáltico; barragem de concreto tipo gravidade; e barragem em arco.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens -- SNISB, ao analisarmos o tipo de material de construção, observamos que dentre as 7.440 barragens para as quais encontra-se esta informação no cadastro, é possível perceber a relevância das barragens de terra no cenário brasileiro, tendo em vista que 6.086 barragens foram construídas utilizando este material, o que representa 82%, como pode ser observado na Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Tipos de barragens brasileiras por tipo de material de construção.



Fonte: Elaborado a partir da base de dados SNISB (2021).

A seguir são demonstrados alguns exemplos de barragens dos diversos tipos de materiais de construção existentes no Brasil.

A Figura 3 apresenta o barramento da Usina Hidrelétrica (UHE) de Jirau, localizada no rio Madeira. Este barramento é composto por uma barragem de terra, barragem de enrocamento com núcleo asfáltico e barragem de enrocamento com núcleo de argila. A barragem possui 1.150 metros de comprimento e altura máxima de 62 metros. A área alagada é da ordem de 361 km<sup>2</sup>, com volume total do reservatório de 2.746,7 hm<sup>3</sup>.

Figura 3 – UHE Jirau - Rio Madeira.



Fonte: G1 (2021).

O reservatório da UHE Sobradinho, na qual a barragem principal foi construída em terra e enrocamento com núcleo de argila é apresentada na Figura 4. Este barramento entrou em operação no ano de 1979 e está localizado no rio São Francisco, no estado da Bahia. A bacia hidrográfica que contribui para a geração de energia nesta usina possui extensão da ordem de 630.000 km<sup>2</sup>. De acordo com o empreendedor, conforme dados divulgados no sítio eletrônico, seu reservatório possui um volume total de 34.116 hm<sup>3</sup> ocupando uma área de 4.214 km<sup>2</sup>.

Figura 4 – UHE Sobradinho - Rio São Francisco.



Fonte: CHESF.

A barragem da UHE Irapé é uma usina hidrelétrica que iniciou sua operação no ano de 2006. Está localizada na região nordeste do estado de Minas Gerais, no rio Jequitinhonha. O arranjo desta usina compreende uma barragem de enrocamento com núcleo de argila que fecha o vale do rio. Trata-se de uma barragem alta com 205 metros de altura, 540 metros de comprimento com um reservatório com volume de 5.954,88 hm<sup>3</sup>. A área alagada para a construção do reservatório é de 137,16 km<sup>2</sup>. A Figura 5 apresenta uma imagem do arranjo desta usina.

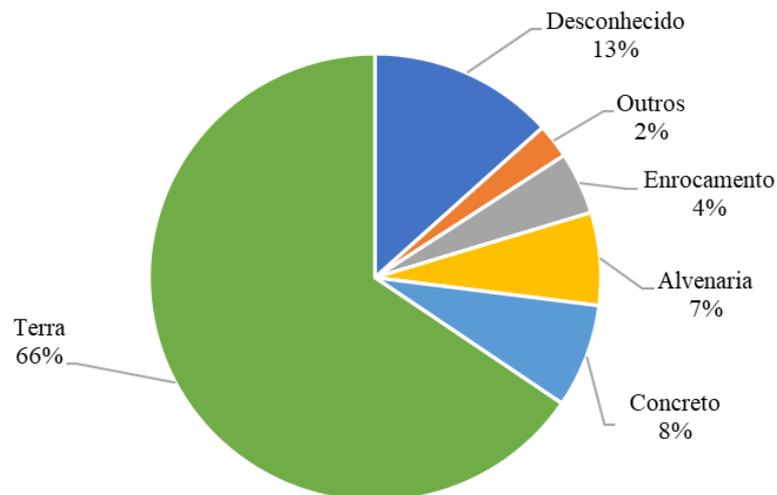
Figura 5 – UHE Irapé - Rio Jequitinhonha.



Fonte: CEMIG.

É possível perceber uma conexão entre o material de construção da barragem e a ocorrência de rompimento na mesma, a partir da análise de mais de 900 casos de rompimentos de barragens no mundo, realizada por L. M. Zhang Y. Xu (2007). Segundo os dados analisados, a quantidade de rompimentos associados a barragens de terra é aproximadamente 9 vezes maior do que o de barragens de concreto, segundo colocado. A relação entre o tipo de material de construção e o percentual de rompimento pode ser vista no gráfico da Figura 6.

Figura 6 – Relação do tipo de rompimento com o tipo de barragem.



Fonte: Adaptado L. M. Zhang, Y. Xu (2007).

Apesar de serem construções com vida útil elevada, as barragens estão susceptíveis a eventos que podem ocasionar o seu rompimento. Em casos de rompimento, além dos custos monetários para o empreendedor, também existem problemas associados à área de jusante. Dependendo da magnitude do evento, a mancha de inundação pode ser grande o suficiente para ocasionar impactos a fauna e flora além da população humana, bem como ocasionar vazões e níveis não previstos para os reservatórios de barragens localizados na cascata do rio, podendo gerar um efeito em cascata de rompimentos (Collischonn, Tucci, 1997).

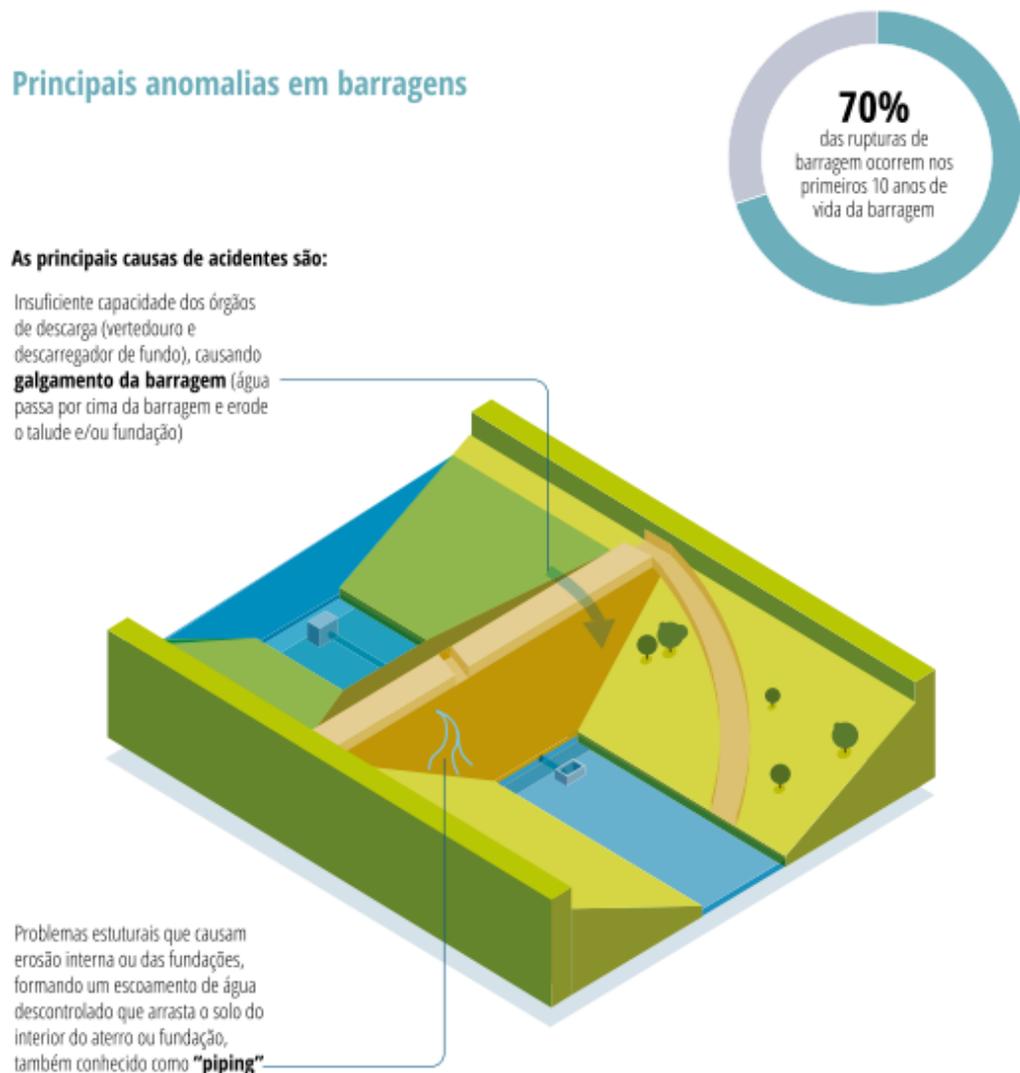
O rompimento de barragens pode estar associado a diversas causas, de acordo com a Eletrobras (2003) estas causas podem ser:

- Rompimento de um dos taludes da barragem (montante ou jusante);
- Ruptura da fundação (fratura de rocha, deslizamento de camadas, etc.);
- Galgamento, normalmente por evento hidrológico extremo;

- Ruptura por entubamento (*piping*), em função de falhas no corpo da barragem;
- Liquefação, em função de excesso de chuvas e carga no barramento; e
- Ações de guerra ou terroristas.

Entre estas, as principais causas de rompimento de barragens de terra são: galgamento, *piping*, ruptura do talude e liquefação. A Figura 7, extraída do Relatório de Segurança de Barragens de 2019, elaborado pela Agência Nacional das Águas (ANA), exemplifica os eventos de galgamento e *piping*, que representam, respectivamente, a passagem de água sobre o barramento ocasionando erosão do talude e/ou da fundação e a erosão interna ou das fundações causadas por problemas estruturais ocasionando o carreamento do solo interno do aterro devido a formação de um escoamento de água descontrolado.

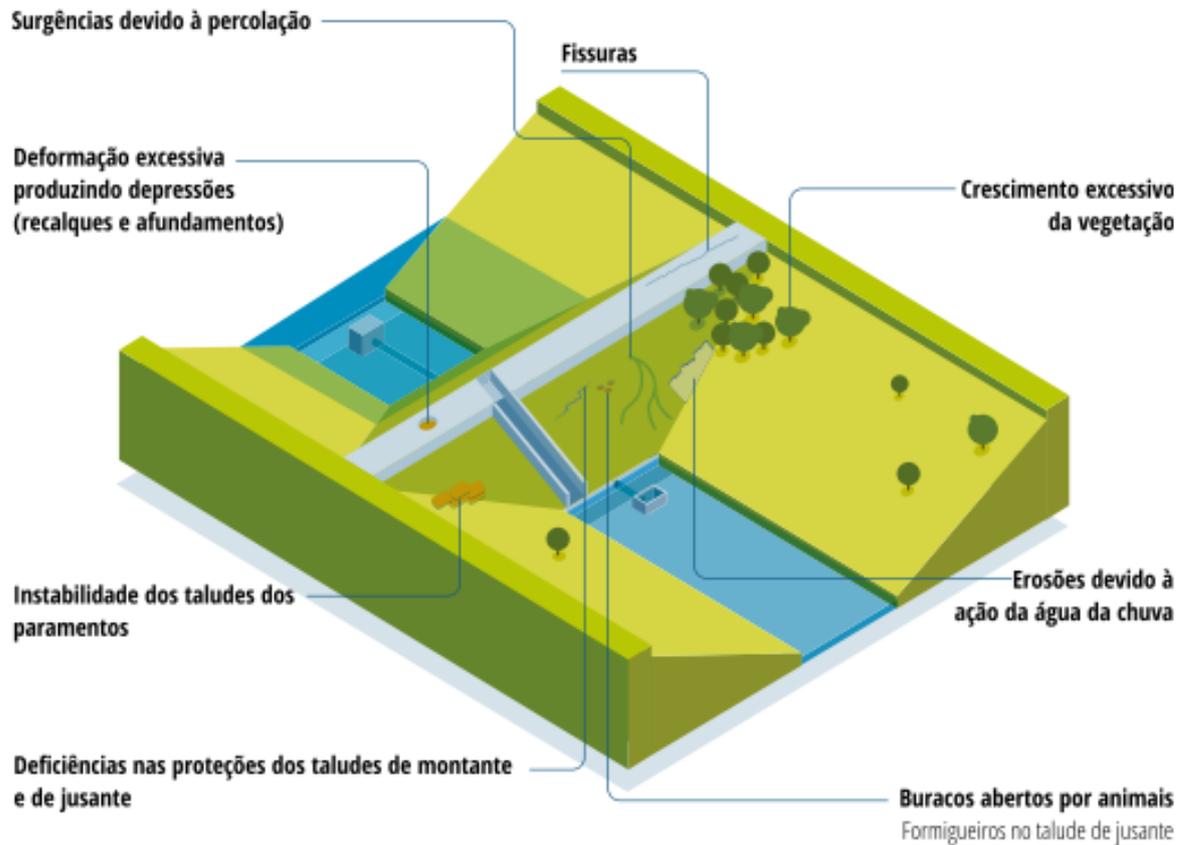
Figura 7 – Principais anomalias encontradas em barragens.



Fonte: Modificado ANA (2020).

Complementarmente, a Figura 8 apresenta os problemas mais comuns encontrados em barragens de aterro.

Figura 8 – Problemas mais comuns encontrados nas barragens de aterro.



Fonte: Modificado ANA (2020).

Mota (2017) salienta a relevância dos estudos referentes ao desenvolvimento de conhecimento em mecânica dos solos e recursos hídricos, pois estes estudos colaboram com ferramentas que possibilitam quantificar os danos ocasionados por falhas. Com isso é importante observar o tipo de material de construção da barragem, pois este tem grande relevância na forma de ruptura que pode ocorrer na estrutura. O Quadro 1 apresenta uma relação entre os tipos de barragem e suas possíveis formas de ruptura.

Quadro 1 – Causas de rupturas de barragens.

Tipo de Barragem	Forma de Ruptura
Terra	Galgamento
	Erosão interna
	Escorregamento da Fundação
	Ação de ondas no reservatório
	Erosão da fundação a jusante da barragem
Concreto gravidade	Deterioração dos materiais
	Falha da fundação da barragem
	Falha da estabilidade do corpo da barragem
	Erosão da fundação a jusante da barragem
	Atos de guerra
Concreto em arco	Falha dos encontros laterais do vale de fundação
	Saturação das fundações rochosas
	Carga excessiva resultante de um excessivo enchimento do reservatório
	Deslizamento dos corpos da barragem
	Erosão da fundação a jusante da barragem

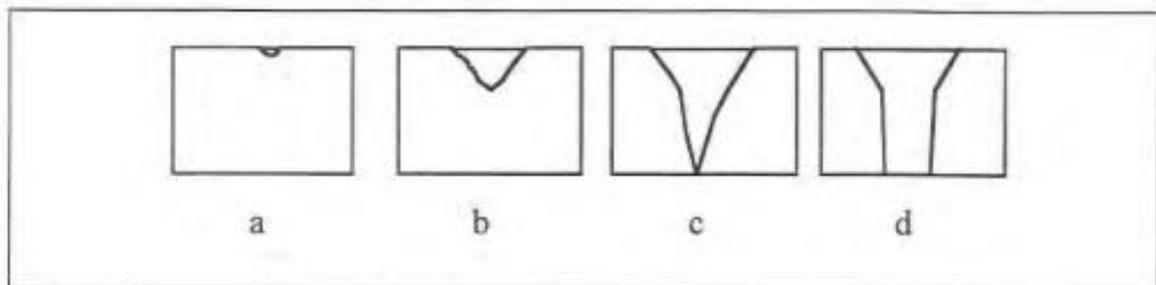
Fonte: Adaptado MOTA aput SANTOS, FRANÇA E ALMEIDA (2007).

USACE aput Costa (2016) aponta que a partir de análises de dados no ano de 1985 indicam que 34% de todas as falhas em barragens foram causadas por galgamento, 30% por defeitos na fundação, 28% por *piping* e 8% por outras causas. Quando feita a análise levando em consideração apenas barragens de terra e enrocamento estes percentuais mudam para 35% devido a galgamento, 38% para *piping*, 21% devido a defeitos de fundação e 6% por outras causas. Percebe-se então que quando se trata de barragem de terra cenários de galgamento e *piping* possuem relevância considerável.

### 2.2.1 Galgamento

A passagem de água sobre a barragem, em locais que não foram projetados para receber estes esforços, é conhecido por galgamento. Esta situação pode ocorrer devido a um, ou mais, dos seguintes fatores: falha humana, relacionadas a má operação do reservatório durante um período de cheia; erros de projeto nas estruturas extravasouras, que não suportam a passagem de uma cheia extraordinária pelo vertedouro; e eventos sísmicos e deslocamentos de encostas no reservatório, que podem ocasionar a formações de ondas. A ruptura ocorre no ponto mais fraco da crista da barragem caso o evento de galgamento possua tempo e intensidade suficiente para tal. Esse evento evolui ao longo do tempo sendo influenciado pelas características do material de construção utilizado. A Figura 9 exemplifica os efeitos do galgamento na estrutura do barramento. Nesta figura esta apresentado o início do desenvolvimento da brecha no ponto mais fraco (a), seguido da formação da brecha em formato de “V” (b), aprofundamento da brecha (c) e aumento lateral por erosão (d) (COLLISCHONN, 1997)

Figura 9 – Formação da brecha por galgamento.



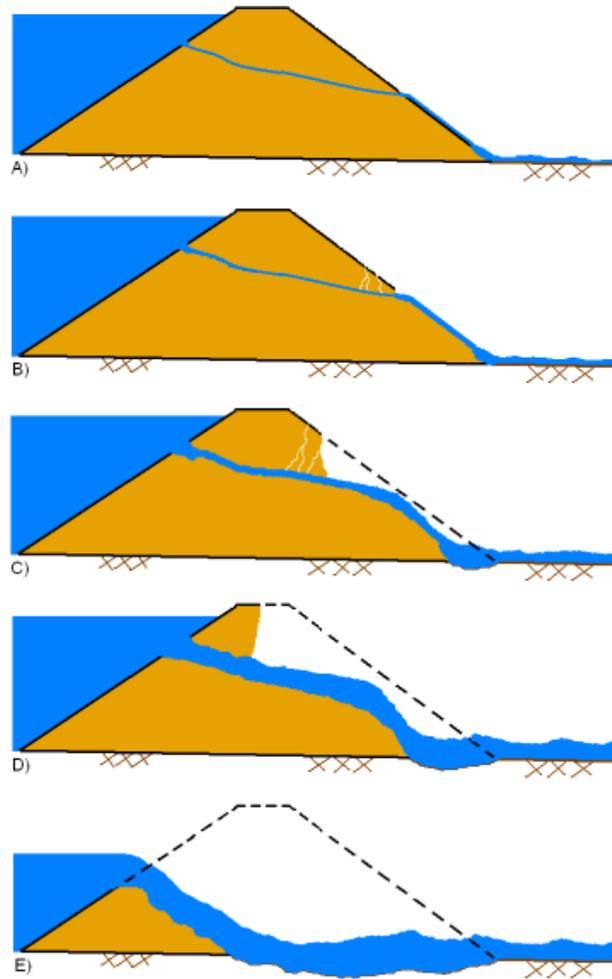
Fonte: Adaptado Collischonn (1997).

### 2.2.2 Erosão interna (*Piping*)

Um evento de erosão interna, também conhecido como entubamento ou infiltração (*piping*) é ocasionado quando a água passa pela barragem através do maciço. Caso o gradiente hidráulico seja alto o suficiente para que haja o carreamento, se inicia o processo de erosão regressiva, esta brecha evolui por erosão até ocorrer o colapso estrutural. (COLLISCHONN, 1997)

A Figura 10 apresenta a formação e evolução de uma brecha de ruptura típica em barragens de terra.

Figura 10 – Formação da brecha por *piping*.



Fonte: USACE (2016).

### 2.3 BREVE HISTÓRICO DO ROMPIMENTO DE BARRAGENS

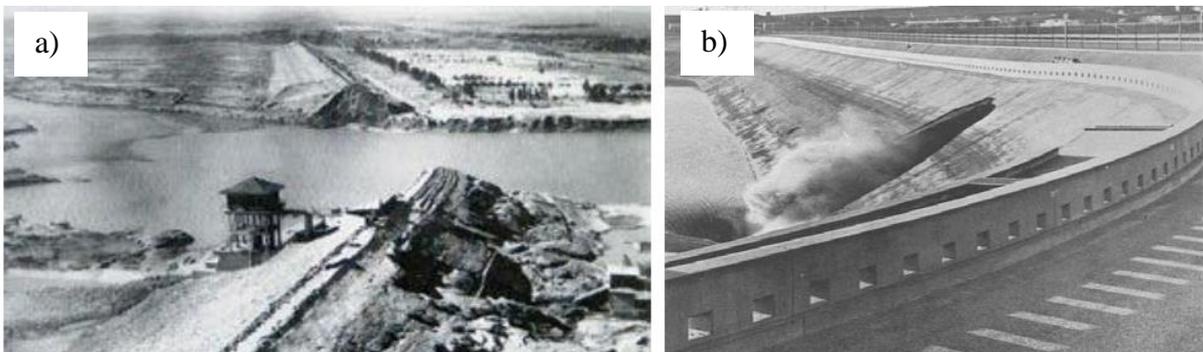
Com o objetivo de exemplificar o que será estudado neste trabalho, o levantamento de rompimentos de barragens reais auxilia na compreensão da importância dos estudos de rompimento de barragens como meio da mitigação de danos ocasionados por possíveis acidentes.

Um caso de rompimento de barragem por colapso estrutural ocorreu na barragem de Gleno no centro norte da Itália em 1 de dezembro de 1923. O rompimento súbito aconteceu 30 dias após o enchimento do reservatório, durante fortes chuvas. Estudos realizados após o rompimento elucidaram o fato de que as estruturas foram submetidas a altas tensões de cisalhamento as quais não eram capazes de suportar. O potencial de danos causados poderia ser ainda mais severo, caso a cheia não fosse amortecida em alguns pontos ao longo do rio Dezzo. Este amortecimento possibilitou a redução do número de vítimas. (Pereira, 2020)

Outro rompimento de grande impacto que se tem registro ocorreu 1975 na barragem de Terra de Banqiao, localizada no rio Ru, na China. Este barramento teve sua construção concluída em 1952. O projeto tinha por objetivo gerar energia e conter cheias com tempo de recorrência de até 1.000 anos, possuía uma altura de 24,5 metros e o vertedouro possuía capacidade de projeto de 1.742 m<sup>3</sup>/s. Quando a região foi atingida pelo furacão Nina, no dia 8 de agosto de 1975, a vazão atingida na barragem chegou a 13.000 m<sup>3</sup>/s ocasionando seu rompimento por galgamento. Decorrente deste evento, outras barragens localizadas na bacia hidrográfica também romperam em um efeito dominó. (Pereira, 2020)

A Figura 11a apresenta a barragem de Banqiao depois do rompimento e a Figura 11b apresenta a barragem construída em seu período de operação.

Figura 11 – Barragem de Banqiao, China.(a e b).



Fonte: L. M. Zhang Y. Xu (2007).

No Brasil, a barragem de Algodões 1, construída na bacia do rio Parnaíba com objetivo de abastecer a cidade de Cocal, rompeu-se em 27 de maio de 2009. Esta barragem foi construída com talude de terra e seção homogênea, comprimento de 378 metros e altura máxima de 47 metros, o vertedouro era lateral com 120 metros de comprimento. A operação do vertedouro ocasionou uma erosão no talude a jusante do muro e o desenvolvimento desta patologia em conjunto com o aumento das cheias ocasionou o rompimento por processo erosivo (Pereira, 2020).

A Figura 12 apresenta uma imagem aérea do rompimento da barragem de Algodões no ano de 2009.

Figura 12 – Rompimento da barragem de Algodões I, Piauí.

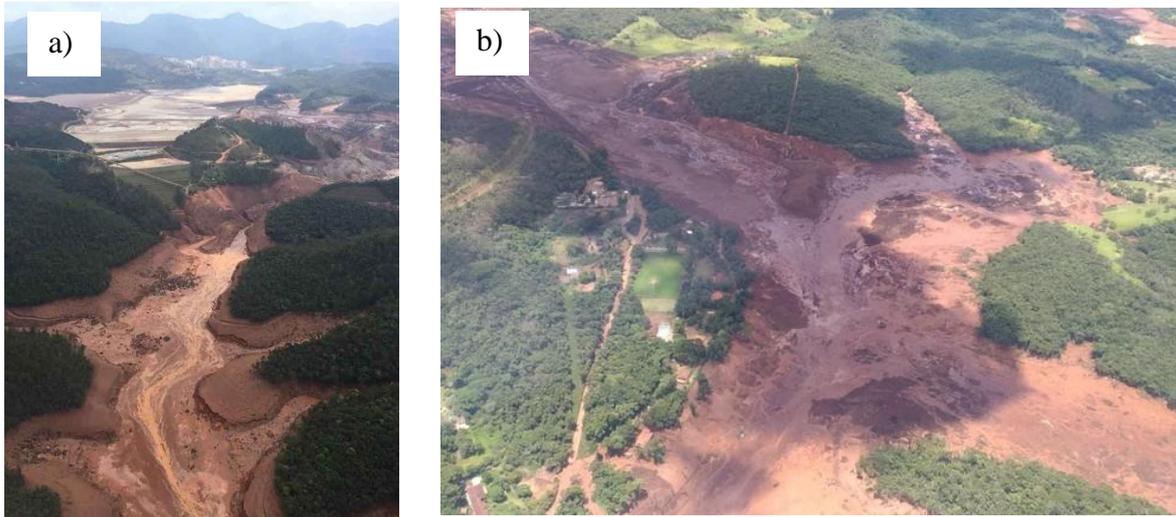


Fonte: Cidade Verde (2019).

Casos mais recentes de rompimento de barragens que causaram grande comoção no país e no mundo, foram os acidentes ocorridos no estado de Minas Gerais, nas cidades de Mariana e Brumadinho, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente. Estes casos reacenderam as discussões acerca da relevância da segurança de barragens tendo em vista os danos irreparáveis

causados por estes eventos. Na Figura 13 pode-se ter uma noção da extensão dos impactos que estes acidentes provocaram. Na Figura 13 a apresenta os danos em Mariana e a Na Figura 13 b apresenta os danos em Brumadinho.

Figura 13 – Barragem após o rompimento.



Fonte: Estado de Minas (2015) e Época Negócios (2019)

Vários são os motivos que podem ocasionar o rompimento de barragens. Em alguns casos os estudos possibilitam a minimização dos impactos causados por estes eventos, através da prevenção e identificação das possíveis áreas atingidas, garantindo assim a segurança da população a jusante dos barramentos.

#### 2.4 LEGISLAÇÕES PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS

Com o objetivo de regulamentar as barragens para trazer mais segurança para as estruturas de barramento, em 2010 a Lei nº 12.334 estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens. Atualmente a legislação vigente é a Lei nº14.066 de 2020 que alterou e acrescentou a redação de alguns artigos existentes na legislação de 2010 além de definir novas responsabilidades, e indicar a necessidade de seguros e multas. A legislação de segurança de barragens se aplica a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros; (Redação dada pela Lei nº 14.066, de 2020)
- capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas (Redação dada pela Lei nº14.066, de 2020);
- categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador (Incluído pela Lei nº14.066, de 2020).

Um dos instrumentos da política a elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB). Este deve conter informações que auxiliem o empreendedor para a garantia da segurança do empreendimento. Dentre essas informações estão a identificação do empreendedor, o levantamento de dados técnicos do empreendimento, seus manuais de procedimentos, regras operacionais dos dispositivos de descarga e, em algumas situações, o Plano de Ação de Emergência (PAE) (BRASIL, 2020).

De acordo com a Lei nº 14.066 de 2020 os Planos de Segurança de Barragens de acumulação de água classificadas com dano potencial médio e alto devem conter o Plano de Ação de Emergência (PAE). Este documento tem por objetivo auxiliar o empreendedor na tomada de decisão, quanto à segurança, em casos que podem colocar em risco a segurança do vale a jusante do barramento. Para isso, é necessário realizar estudos para simular os impactos de possíveis problemas que podem ocorrer na barragem e afetar aqueles que estejam a jusante.

A partir da publicação de uma legislação visando a segurança das barragens, diversos órgãos fiscalizadores passaram a ter obrigações relacionadas ao cumprimento de alguns artigos citados na Lei Federal. Entre essas obrigações estão a criação de Resoluções e Portarias. Com isso, a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Mineração (ANM) elaboraram suas normativas.

A Figura 14 apresenta uma linha do tempo com alguns marcos na evolução das normatizações desses órgãos fiscalizadores, desde o surgimento da Lei nº 12.334 até os dias atuais.

Figura 14 – Normativas sobre barragens a partir da Política Nacional de Segurança de Barragens.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

## 2.5 RUPTURA EM BARRAGEM DE TERRA

O estudo de ruptura de barragens é utilizado para construir uma série de planos que tem por objetivo auxiliar a população e o empreendedor em situações de rompimento. Para que isto seja possível é necessário realizar o levantamento de informações do vale a jusante. Segundo Collischonn (1997) as informações que devem ser coletadas incluem as áreas de inundação, para auxiliar na definição de zonas atingidas e não atingidas, cota máxima da água em cada ponto inundado, velocidade da água, tempo de chegada da onda de inundação, além do volume total do hidrograma.

De acordo com o livro Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas a importância do estudo de ruptura independe da existência de habitantes no vale a jusante pois existe a necessidade da determinação dos riscos associados a esta ruptura. Dessa forma este estudo deve determinar a planície extrema de inundação a jusante de uma barragem. (Eletrobras,2003)

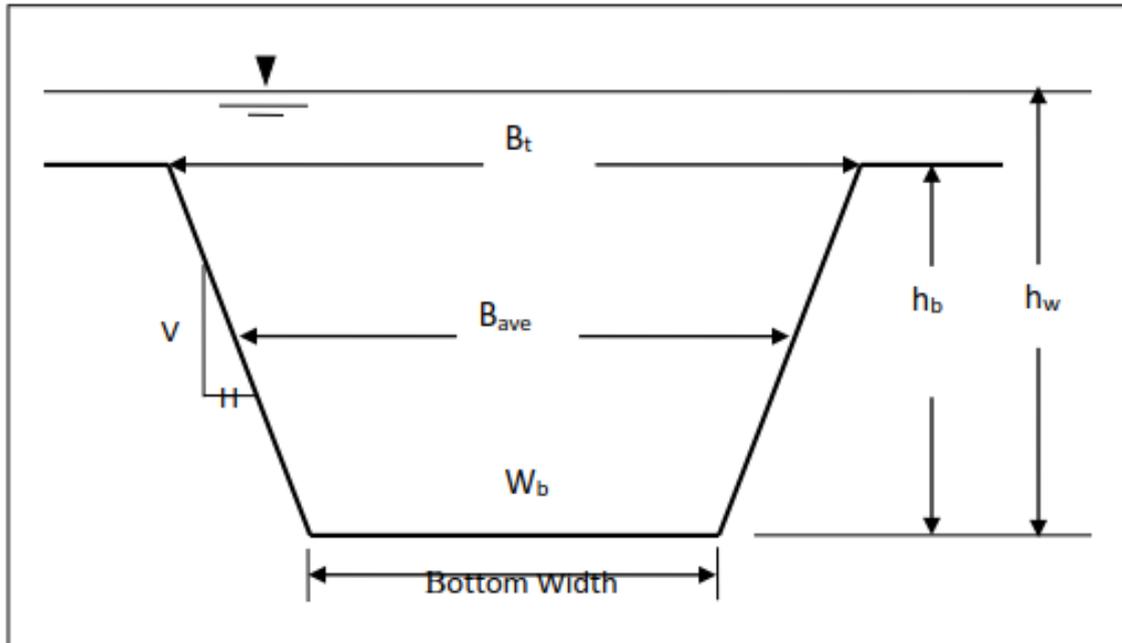
### 2.5.1 Formação da brecha de ruptura

A brecha de ruptura representa o local pelo qual um volume de água represada flui pela barragem de forma não planejada e é caracterizada por três parâmetros principais, sendo eles a configuração geométrica da brecha, suas dimensões e o tempo de abertura.

Para o cálculo das dimensões da brecha de ruptura são estipulados valores de largura, altura e inclinação dos taludes laterais da brecha. A representação destes parâmetros está apresentada na Figura 15. Sendo eles  $B_{ave}$  a largura média da brecha;  $W_b$  a largura de fundo;  $h_b$

a altura do topo da barragem até o fundo da brecha;  $h_w$  altura de água até o fundo da brecha e a  $(H:1V)$  representa a inclinação lateral da brecha;

Figura 15 – Parâmetros de brecha.



Fonte: USACE (2016).

Vários são os estudos que representam equações para o dimensionamento de brechas e tempo de formação das mesmas. De acordo com Ferreira e Andrzejewski (2015) existe um grande número de métodos que estabelecem parâmetros de brecha de ruptura, dentre eles a análise comparativa com casos de rompimento similares, modelagem física que considere princípios de hidráulica e transporte de sedimentos e também o uso de equações empíricas. A Figura 16 apresenta um levantamento das equações empíricas estruturadas através de observações de ocorrências reais e estudos em laboratórios de diversos autores.

Figura 16 – Algumas equações empíricas de brechas de ruptura e vazão de pico.

Autores	Largura Média (m)	Tempo de formação (h)	Vazão de Pico (m <sup>3</sup> /s)	Observações
Froehlich (1995)	$B=0,1803K_o V_w^{0,32} h_b^{0,19}$	$t_f = 0,00254 V_w^{0,53} h_b^{-0,9}$	$Q_p=0,607 K_o V_w^{0,295} h_b^{1,24}$	$K_o = 1,4$ para galgamento e 1,0 para outros casos
Von Thun e Gillette (1990)	$B = 2,5 h_w + C_b$	(1) $t_f = B / (4 h_w)$ (2) $t_f = B / (4 h_w + 61)$	-	$C_b = 54,9$ p/ o caso ( $V_w > 1,23 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ ) (1) <i>Erosion resistant</i> (2) <i>highly erodible</i>
Hagen (1982)	-	-	$Q_p = 325 (V_w h_w 10^{-6})^{0,42}$	-
McDonald e Langridge-Monopolis (1984)	-	$t_f = 0,0179 V_{er}^{0,364}$	$Q_p = 1,154 (V_w h_w)^{0,412}$	-
Bureau of Reclamation (1988)	$B = 3 h_w$	$t_f = 0,011 B$	$Q_p = 19,1 h_b^{1,85}$	-
Critério da Eletrobrás	$B = 2,1576 K_o (V_w h_w)^{0,25}$	$t_f = 0,00714 V_w^{0,47} h_w^{-0,9}$	-	$K_o = 1,0$ p/galgamento e 0,7 p/ <i>piping</i> . Baseada em Fread e Harbaugh (1973)
Kirkpatrick (1977)	-	-	$Q_p = 1,268 (h_w+0,3)^{2,5}$	-
Soil Conservation Service (1981)	-	-	$Q_p = 16,6 (h_w)^{1,85}$	-

Onde:

- B = largura média da brecha (m)
- $C_b$  = coeficiente empírico característico do material
- $h_b$  = altura da brecha (m)
- $h_d$  = altura da barragem (m)
- $h_w$  = altura de água acima do fundo da brecha (m)
- $K_o$  = coeficiente empírico dependente do tipo de rompimento
- $Q_p$  = vazão de pico
- $t_f$  = tempo de formação da brecha (h)
- $V_w$  = volume de água acima do fundo da brecha (m<sup>3</sup>)
- $V_{er}$  = volume de material erodido (m<sup>3</sup>) =  $0,0261 (V_{out} \cdot h_w)^{0,769}$  (McDonald e Langridge-Monopolis, 1984)
- $V_{out}$  = volume de água descarregado através da brecha (m<sup>3</sup>)

Fonte: Ferreira e Andrezejewski (2015).

Complementarmente, o Quadro 2 apresenta valores de referência para as características de brecha de ruptura em barragens de terra e enrocamento.

Quadro 2 – Dados da brecha.

<b>Tipo de barragem</b>	Terra e Enrocamento
<b>Brecha média</b>	Entre 1 a 5 vezes a altura da barragem (normalmente entre 2 e 4 vezes)
<b>Declividade da lateral da brecha ( 1 Horiz : Z Vert)</b>	Entre 0,25 e 1
<b>Tempo para a formação total da brecha (T) em horas</b>	Entre 0,1h e 1,9h (compactada e entre 0,1 e 0,5 (não compactada)

Fonte: adaptado Eletrobras (2003).

## 2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

No estudo de Laureano (2009), é apresentado uma análise comparativa da utilização dos *softwares* FLDWAV e HEC-RAS para a modelagem hidrodinâmica do rompimento de uma barragem. Para isso foi calculado a vazão de pico representada pelo rompimento da barragem e analisado a diferença entre a utilização de um hidrograma parabólico e triangular simplificado para essa simulação. Além disso, concluiu-se que o *software* HEC-RAS utiliza uma caracterização melhor das áreas a serem alagadas através das seções transversais, sendo esse um ponto positivo para a utilização deste *software* quando comparado com a utilização do FLDWAV que possui seções mais simplificadas, no entanto este modelo converge mais rápido a instabilidades numéricas durante a simulação por utilizar passo de tempo de processamento menor. Este trabalho apoia a hipótese de que o HEC-RAS pode ser utilizado como uma ferramenta de simulação hidrodinâmica para ser utilizado com o objetivo de simular a propagação dos hidrogramas de ruptura gerando áreas de alagamento mais precisas.

Lopes Junior (2020) apresenta uma comparação entre a modelagem hidráulica estática e dinâmica utilizando, respectivamente, um modelo simplificado desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal, e adotado pela ANA para auxiliar os agentes fiscalizadores a realizar a classificação das barragens brasileiras, e o *software* HEC-RAS. O trabalho utiliza duas abordagens distintas para o processo de propagação da onda de rompimento, enquanto o aqui proposto adota a mesma abordagem de propagação utilizando os hidrogramas de rompimento provenientes das simulações de ruptura nos *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS como entrada do modelo. A partir da análise dos seus resultados Lopes Junior salienta que a utilização do *software* HEC-RAS exige um maior nível de conhecimento do modelador devido a sua complexidade, mas gera resultados mais precisos.

Ferla (2018) apresenta em seu trabalho uma metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimentos de barragens. Neste estudo, é feita a comparação da metodologia simplificada com os resultados obtidos na modelagem através do HEC-RAS. Dentre as opções de escolha para a modelagem hidrodinâmica ela cita a possibilidade de utilização do HEC-HMS para a simulação de rompimento de barragem, no entanto este *software* não é utilizado, mas os motivos não são apresentados.

Mendes (2008) realizou um estudo para propor um índice de vulnerabilidade de grandes barragens associado ao rompimento de pequenas barragens a montante. Para isso foi necessário o levantamento das barragens localizadas a montante e dos parâmetros para a modelagem, o cálculo da chuva média na bacia de contribuição do reservatório e por fim a simulação do rompimento dos reservatórios utilizando a modelagem no HEC-HMS. Neste estudo, a utilização do HEC-HMS foi motivada pela possibilidade de adoção de diferentes combinações de métodos para representar os processos hidrológicos na bacia hidrográfica como um todo.

Com base no levantamento realizado percebeu-se que os trabalhos apresentados carecem de informações comparativas no âmbito de qualidade de *softwares* para a simulação do hidrograma de ruptura de uma barragem. Além disso, poucos materiais conhecidos por esta autora, abordam a utilização do HEC-HMS como metodologia para este tipo de simulação. Adicionalmente, o manual do próprio *software* não destaca a sua utilização para este fim, isto motivou o estudo apresentado neste trabalho afim de comparar a similaridade entre o HEC-RAS e HEC-HMS.

## 2.7 MODELOS COMPUTACIONAIS PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO

Os modelos numéricos computacionais são ferramentas largamente utilizadas para estudos hidráulicos. A *U.S Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center* (USACE, 2021) dos Estados Unidos da América, desenvolveu *softwares* livres para auxiliar nesses processos. Dentre os quais pode-se listar o HEC-RAS e o HEC-HMS que estão entre as ferramentas mais difundidas no mercado.

### 2.7.1 River Analysis System - HEC-RAS

O *River Analysis System* (HEC-RAS) é uma ferramenta que auxilia no cálculo dos processos hidráulicos. Nesta ferramenta é possível efetuar cálculos dos perfis d'água em canais com superfície livre. Os cálculos podem ser realizados em regime de escoamento permanente e não permanente. Além disso os perfis de linha d'água podem ser cálculos em regime subcrítico, supercrítico e em fluxo misto (USACE, 2016).

O procedimento computacional é baseado na solução da equação unidimensional da energia especificada na equação 1. As perdas de energia são estimadas, basicamente, através do coeficiente de Manning, fornecido ao modelo para cada seção. A equação da quantidade de movimento é usada onde a superfície livre varia rapidamente, como em ressaltos hidráulicos, escoamento junto a pilares de ponte e confluências.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_c \rightarrow \text{Equação da Energia (1)}$$

Onde,

$Y_1, Y_2$  = Tirante hidráulico nas seções transversais (m);

$Z_1, Z_2$  = Cota do fundo do canal principal (m);

$v_1, v_2$  = Velocidade média de escoamento (m/s);

$a_1$  e  $a_2$  = Coeficiente de Coriolis;

$g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>), e

$h_c$  = perda de carga (m)

Para escoamentos não permanentes, o programa resolve, por um esquema implícito de diferenças finitas, as equações completas de Saint-Venant (equações diferenciais da conservação da massa e da conservação da quantidade de movimento). Os métodos e as equações usados permitem a simulação da propagação da onda resultante de um rompimento de barragem.

Para a realização dos cálculos propostos pelas equações é necessário a inserção das informações detalhadas da área de estudo, incluindo a direção e perfil transversal do rio, os dados da barragem de estudo e também a curva cota-volume do reservatório. No caso de rompimento da barragem, o cálculo do hidrograma defluente, ou seja, da relação das vazões de

saída ao longo do tempo, é feito com base nas equações de orifício e descarga livre. Sendo indicado pelo USACE (2016) os coeficientes de descarga para as situações de galgamento e *piping* conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de descarga para galgamento e *piping*.

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Coeficiente para galgamento</b>	<b>Coeficiente para <i>piping</i></b>
<b>Barragem de aterro ou núcleo de argila</b>	2,6 – 3,3	0.5 – 0.6
<b>Barragem de aterro com enrocamento</b>	2,6 – 3,0	0,5 – 0,6
<b>Concreto em Arco</b>	3,1 – 3,3	0,5 – 0,6
<b>Concreto Gravidade</b>	2,6 – 3,0	0,5 – 0,6

Fonte: adaptado USACE (2016).

### **2.7.2 Hydrologic Modeling System - HEC-HMS**

O *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) é uma ferramenta que auxilia no cálculo dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. Com ele é possível simular processos hidrológicos completos o que o torna um *software* bastante utilizado internacionalmente com este objetivo. (USACE, 2021)

No HEC-HMS é possível modelar o cenário de ruptura de barragem utilizando dois modos de falha, sendo eles Galgamento e *Piping*. Contudo estes cenários não podem ser utilizados de forma simultânea durante a execução de simulação da ruptura. De acordo com o Manual de Referências Técnicas do HEC-HMS a modelagem de ruptura de barragem neste *software* é indicada para avaliações periódicas dos empreendimentos.

Um dos métodos para fazer a simulação hidrológica no HEC-HMS é a simulação através de reservatório. Neste tipo de simulação é possível inserir as informações da barragem de duas maneiras. A primeira delas é a utilização das relações de entrada e saída do reservatório representando as características da barragem. A segunda forma é com a inserção individual de cada componente existente na barragem. O método de inserção individual dos componentes da barragem permite a utilização e dimensionamento dos vertedouros, incluindo cota, comprimento e coeficiente de descarga ou a utilização de uma relação pré-definida entre cota e descarga. Com os dados do reservatório incluídos na modelagem é possível a utilização da função de rompimento de barragens, também chamada de *dam break*. (Mendes,2008)

Para realizar a função *dam break* o *software* permite que o modelador configure o momento inicial do modo de falha baseado em uma das seguintes situações: atingimento de uma elevação específica (*elevation*); após um período de tempo em uma elevação específica ou acima dela (*duration at elevation*); ou ainda, em um momento específico ao longo do período simulado, independente da cota atingida no modelo (*specific time*). (USACE, 2021)

Além disso, o modelador deve inserir informações de curva cota-volume do reservatório e, para o caso de vertedouros operáveis, a relação de cota e vazão de saída do vertedor, também chamada de vazão defluente da barragem.

O método de galgamento inicia a brecha de ruptura no topo da barragem e o desenvolvimento desta se expande em forma trapezoidal até atingir o tamanho máximo. Este valor é definido através dos valores de elevação superior e inferior, largura inferior e declividades laterais da brecha. (USACE, 2021)

O fluxo através da brecha é calculado considerando a equação de descarga livre apresentada abaixo.

$$Q = C.L.H^{\frac{3}{2}} \rightarrow \text{Equação de descarga livre (2)}$$

- Q = Descarga sobre o rompimento da barragem (m<sup>3</sup>/s);
- C = Coeficiente de descarga = 1,7 ou 1,35 (1/m);
- L = Largura do fundo da brecha (m), e
- H = Carga hidráulica (m).

O cálculo para definir a vazão defluente em virtude do rompimento da barragem por *piping* considera que a brecha de rompimento se desenvolve em formato circular até atingir o topo da barragem. Esta descarga é calculada através da equação de orifício afogado apresentado abaixo. (USACE, 2021)

$$Q = K.A.\sqrt{2.g.H} \rightarrow \text{Equação de orifício (3)}$$

- Q = Descarga sobre o rompimento da barragem (m<sup>3</sup>/s);
- K = Coeficiente de perda por orifício;
- A = Área da seção transversal da brecha (m<sup>2</sup>);

- $H$  = Perda de energia total na saída (m), e
- $g$  = Constante gravitacional ( $m/s^2$ ).

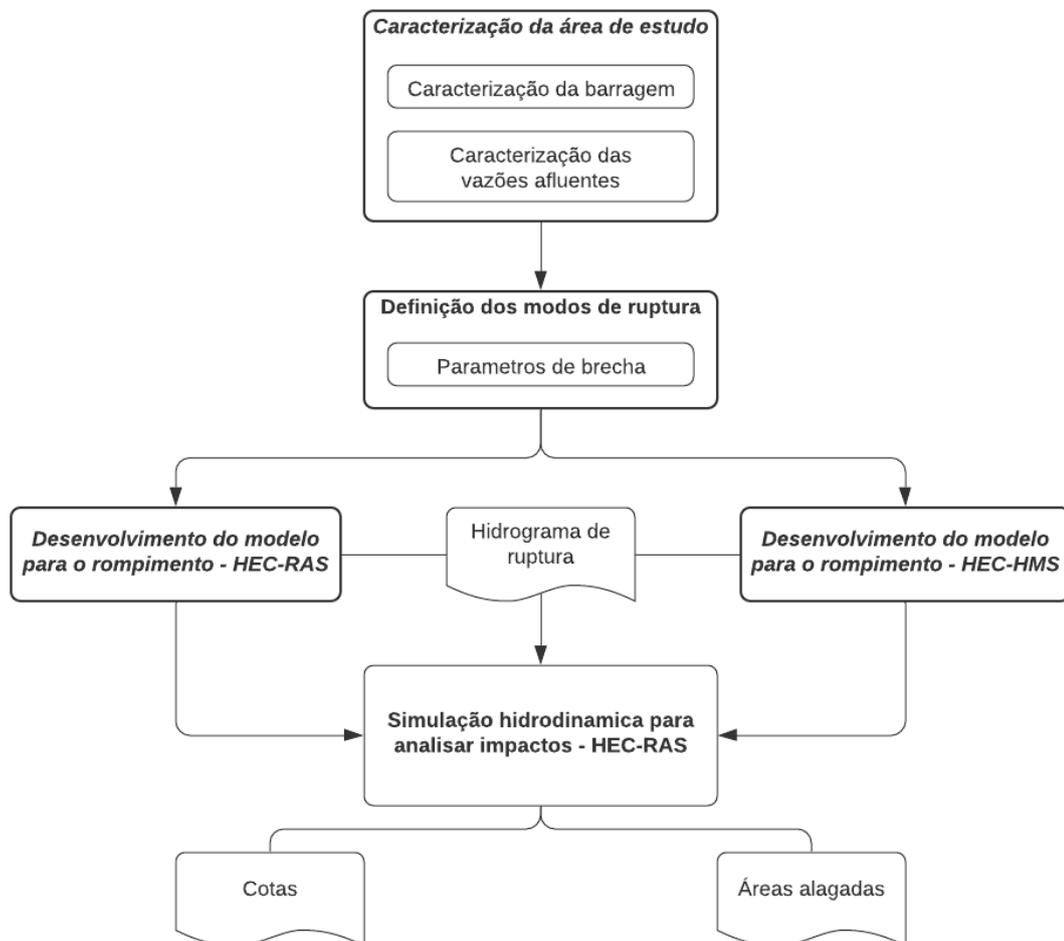
Ao atingir o topo da barragem o cálculo passa a ser desenvolvido conforme acontece no galgamento pela equação de descarga livre. (USACE, 2021)

### 3 METODOLOGIA

O estudo apresentado neste trabalho foi embasado na modelagem de ruptura hipotética de uma barragem de terra considerando os cenários de galgamento e *piping*, devido ao fato destes serem dois dos principais modos de ruptura para este tipo de estrutura. O empreendimento foi escolhido devido à disponibilidade de dados para a elaboração dos modelos e por possuir as características de volume e localização desejadas. Devido a termo de confidencialidade, o nome e localização real do empreendimento não serão apresentados neste estudo. Sendo assim, a barragem objeto da análise será ficticiamente denominada Barragem X, de forma a preservar e assegurar as informações envolvidas.

Para realizar o processo de simulação de ruptura hipotética de uma barragem é necessário a realização de uma série de etapas, a Figura 17 apresenta um fluxograma do processo básico adotado para a realização das simulações neste trabalho. Na primeira etapa, detalhada no item 3.1, é realizado a caracterização da área de estudo incluindo o levantamento das informações referente a barragem e suas vazões afluentes. Em seguida, é feito a análise dos possíveis modos de ruptura baseado nas características levantadas e, também, através da análise de pontos de fragilidade na estrutura, bem como em conhecimento de dados históricos de rompimento de barragens com características semelhantes. Com os modos de ruptura definidos, foi realizado o cálculo empírico dos parâmetros de brecha e adequado a realidade. Essas informações são apresentadas no item 3.2. O estudo se segue no item 3.3 com a elaboração dos modelos de rompimento de barragem. Para este trabalho optou-se por utilizar dois *softwares* para realizar esse processo e obter o hidrograma que represente as vazões defluentes ocasionadas pelo rompimento hipotético da barragem. Por fim, é realizada a simulação hidrodinâmica, apresentada no item 3.4, que utiliza como dado de entrada os hidrogramas de ruptura de ambos os *softwares* para possibilitar a análise comparativa dos impactos ocasionados pelo rompimento hipotético.

Figura 17 – Fluxograma básico do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

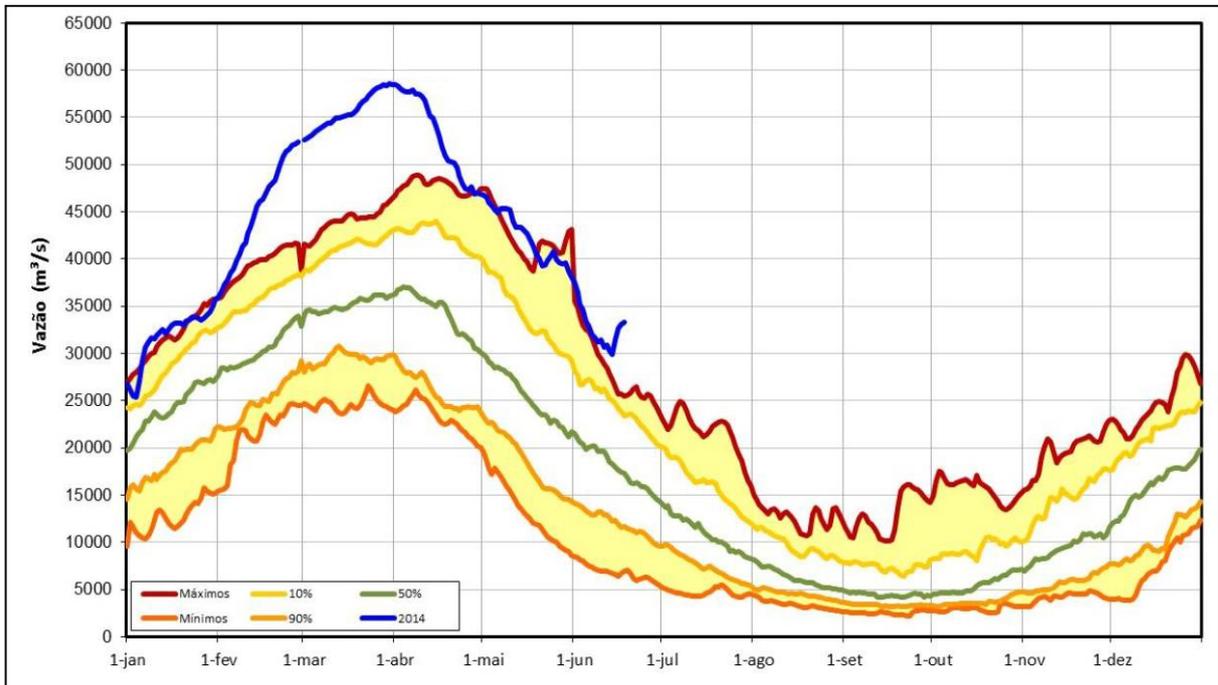
As características da área de estudo em uma simulação possuem grande impacto nos resultados observados. Por se tratar de uma comparação entre modelos de rompimento, este estudo irá apresentar resultados que podem ser pertinentes para barragens que possuem as características de tamanho, material de construção do barramento e relevo do vale a jusante semelhantes as aqui apresentadas.

A Barragem X, objeto deste estudo, possui características compatíveis com os projetos de barragens construídas em áreas de planície, em rios de grade largura e elevadas vazões.

Dentre as características construtivas da estrutura, está a utilização de terra e enrocamento como principais materiais.

O regime de vazões históricas no rio estudado apresenta grande variação ao longo do ano, com períodos de estiagem e cheia definidos. É possível observar na Figura 18 este comportamento através do histórico de vazões médias mensais permanência das vazões durante o ano.

Figura 18 – Histórico de vazões no rio estudado.



Fonte: Confidencial.

A Barragem X é composta por uma barragem de terra na margem direita e esquerda, barragem de enrocamento com núcleo de argila e barragem de enrocamento com núcleo asfáltico. Com altura máxima de aproximadamente 50 metros e comprimento maior que 5 km. A descrição geral do barramento pode ser observada no Quadro 3.

Quadro 3 – Descrição do barramento da Barragem X.

<b>Tipo de material</b>	Terra, enrocamento com núcleo asfáltico e enrocamento com núcleo de argila
<b>Comprimento total</b>	Acima de 5 km
<b>Altura máxima</b>	Aproximadamente 50 m

Fonte: Confidencial.

O vertedouro possui 18 vãos cada um com 20 metros. A capacidade total de descarga do vertedouro é de 81.899 m<sup>3</sup>/s. A descrição detalhada do vertedouro pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição do Vertedouro.

<b>Número de vãos</b>	18
<b>Largura do vão</b>	20 m
<b>Altura do vão</b>	24 m
<b>Capacidade de descarga</b>	81.899 m <sup>3</sup> /s

Fonte: Confidencial.

Com relação a caracterização do vale a jusante do barramento, grande parte é composta por vegetação e áreas alagadas. Além disso existem alguns pontos de atenção com concentração de pessoas residentes. Por fim, a aproximadamente 112 km a jusante da Barragem X, existe um barramento chamado neste trabalho de Barragem Y.

### 3.2 HIPÓTESES DE ROMPIMENTO

A partir de uma análise das características da Barragem X, incluindo tamanho da construção e do reservatório, tipo de material utilizado na estrutura e de acordo com seu histórico, a hipótese de rompimento mais provável considerada foi de galgamento da barragem associado à passagem da cheia decamilar pelo vertedouro ( $Q_p = 81.899 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e *piping* considerando à afluência média das vazões máximas anuais ( $Q_p = 38.838 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Através da aplicação das equações empíricas para calcular os parâmetros da brecha de ruptura, obteve-se uma variação de 10 vezes para o tamanho da brecha média e 14 vezes para o tempo de ruptura no caso de rompimento por galgamento. No cenário de ruptura de *piping*, a variação obtida foi de quase 7 vezes para o tamanho de brecha média e 11 vezes para o tempo de ruptura. Esta variação é explicada pelo fato deste estudo tratar de uma barragem de grande porte, onde as características de altura da barragem e volume de água do reservatório impactam em algumas das equações empíricas.

Devido as variações apresentadas no estudo, optou-se por um cenário de segurança utilizando os maiores valores para os parâmetros de entrada de brecha, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da brecha de ruptura.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Cota de fundo da brecha</b>	50 metros
<b>Largura de fundo da brecha</b>	100 metros
<b>Inclinação das paredes da brecha (H:V)</b>	1,137
<b>Tempo de formação da brecha <i>piping</i></b>	7 horas
<b>Tempo de formação da brecha galgamento</b>	10 horas
<b>Coefficiente de formação de <i>piping</i></b>	0.6

Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

### 3.3 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMA DE ROMPIMENTO

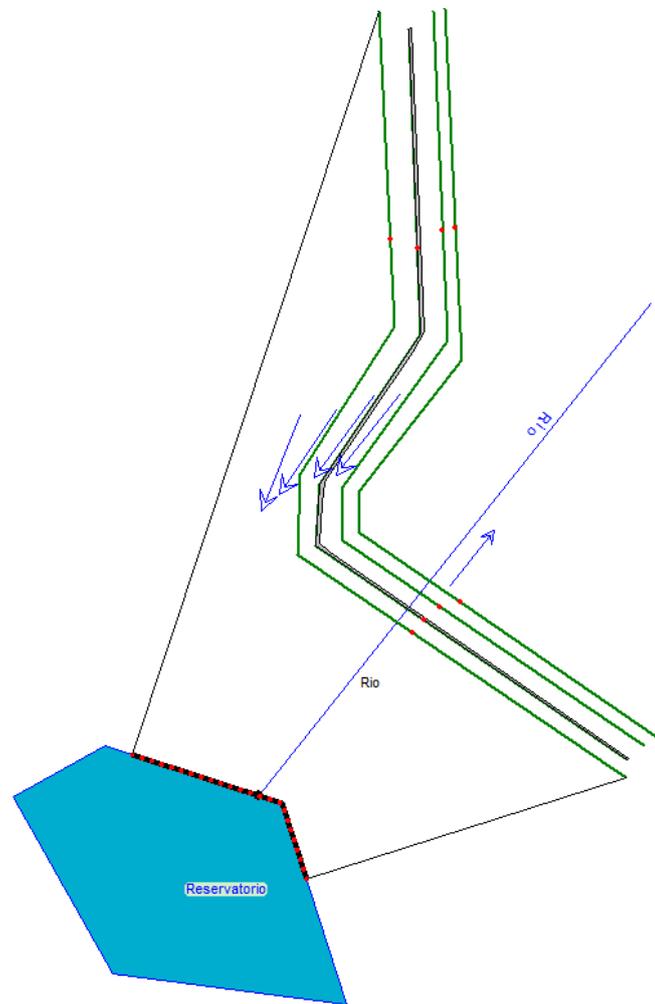
Com o objetivo de identificar as vazões atingidas ao longo do tempo em casos de rompimento, foram elaboradas simulações utilizando os *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS para os cenários de galgamento e *piping*. Os tópicos 3.3.1 e 3.3.2 apresentam os passos executados nas ferramentas e as decisões de projeto adotadas.

#### 3.3.1 Rompimento da barragem no HEC-RAS

Para realizar a modelagem no HEC-RAS é necessário a criação de uma geometria específica, com o objetivo de simular as condições naturais do rio analisado. Em simulações de rompimento uma alternativa para a estabilização do modelo final é a utilização de um modelo reduzido com uma geometria específica contendo informações relevante para a geração do hidrograma de rompimento da barragem.

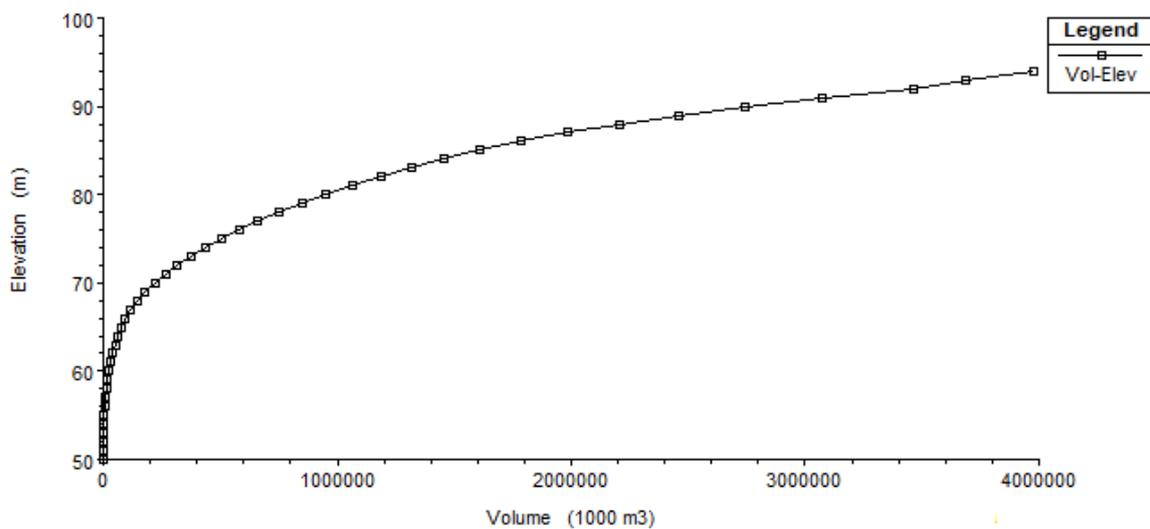
Para esta simulação do rompimento foi utilizado a versão do 5.0.7 do *software* HEC-RAS. Na Figura 19 é apresentado a geometria criada, extraída do *software*, com o reservatório e as seções utilizadas na execução. No modelo reduzido criado, a geometria contou com a especificação de um reservatório com curva cota volume, duas seções a montante do barramento e duas seções a jusante do barramento (linhas verdes), a fim de permitir a computação do modelo. O valor do coeficiente de Manning atribuído para toda a extensão da seção transversal foi de 0,025. Na Figura 20 é apresentada a curva cota volume do reservatório analisado que foi inserida no HEC-RAS.

Figura 19 – Geometria para o modelo troncado de rompimento HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

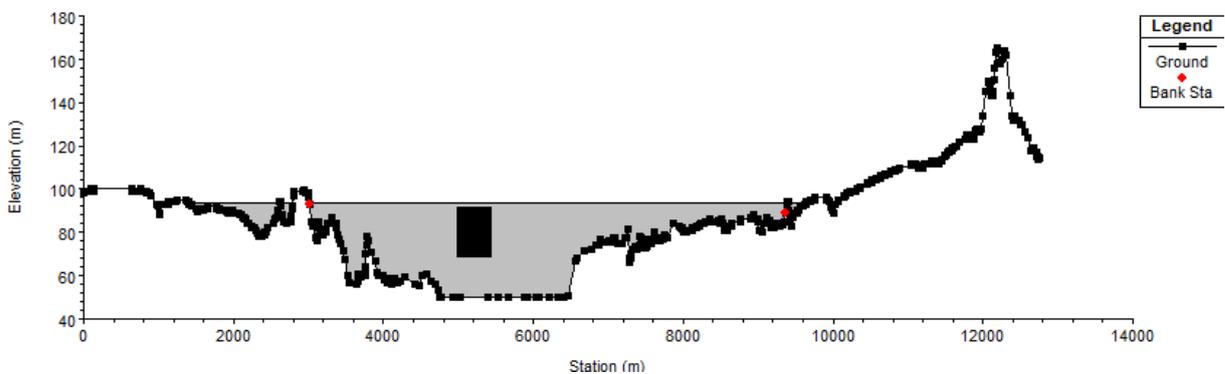
Figura 20 – Curva cota volume do reservatório.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Além da modelagem da calha natural do rio, uma seção foi imposta de modo a representar a estruturas de barramento do reservatório, junto com a modelagem das comportas (bloco em preto), conforme apresentado na Figura 21. Para a simulação de falha mecânica considerou-se o cenário em que duas destas comportas estariam inoperantes, induzindo a sobrelevação do reservatório no caso do galgamento. Para o cenário de *piping* considerou-se a operação normal das comportas no barramento pois esse cenário pode ocorrer em um dia normal de operação da barragem.

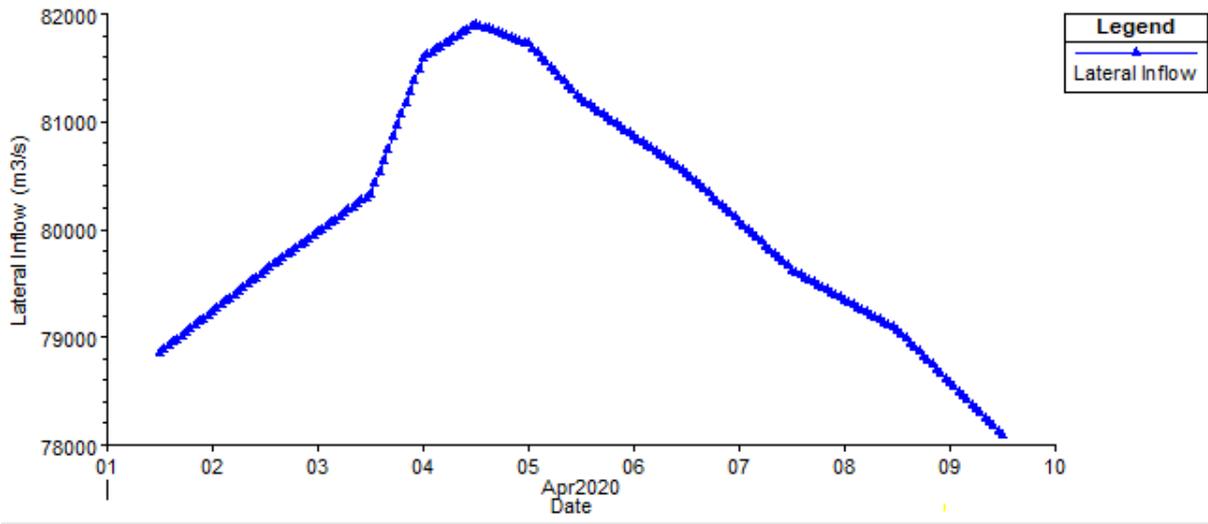
Figura 21 – Estrutura do barramento no HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Para a simulação do cenário de galgamento utilizou-se o hidrograma referente a cheia de projeto, apresentado na Figura 22, como parâmetro de entrada nas condições do contorno. Para o cenário de *piping* considerou-se uma vazão constante a partir da média das máximas anuais ( $Qp = 38.838 \text{ m}^3/\text{s}$ ), tendo em vista que esta situação pode ocorrer independente da variação de vazão no rio.

Figura 22 – Hidrograma de entrada do modelo de galgamento.



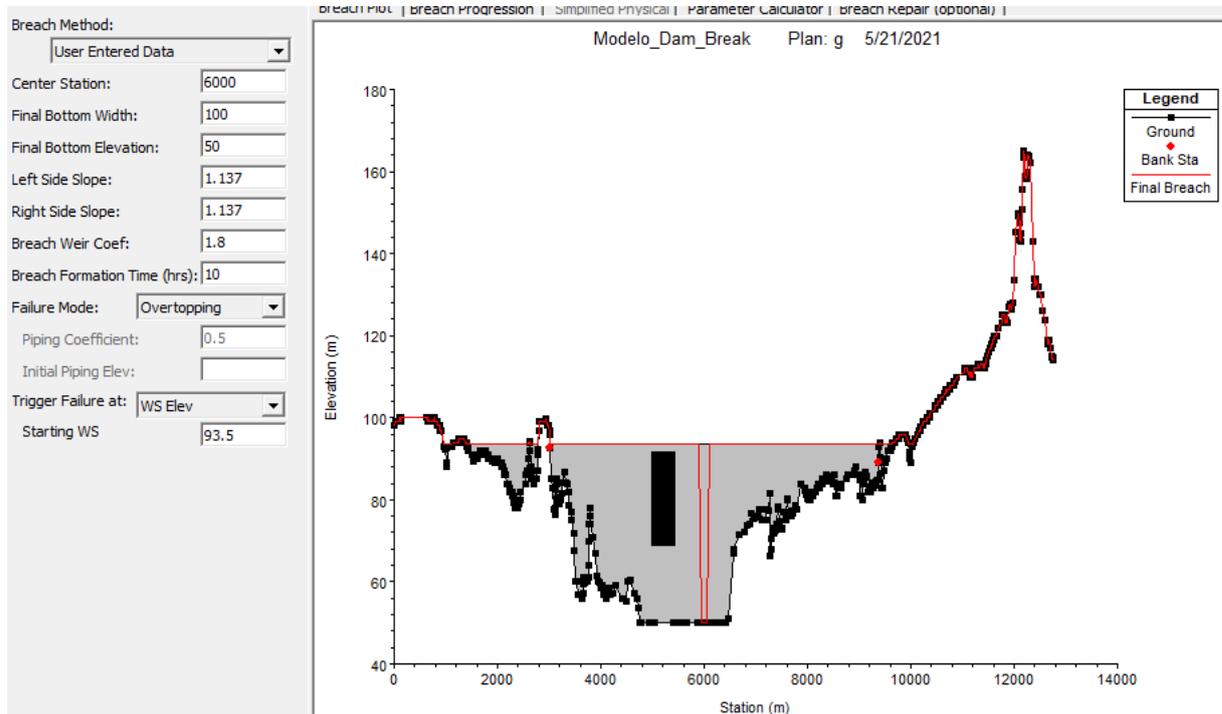
Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Os parâmetros de brecha de ruptura necessários para a execução, que devem ser inseridos pelo usuário no HEC-RAS, são:

- Largura da geratriz inferior da brecha;
- Altura da brecha;
- Declividades laterais da brecha;
- Coeficiente de descarga da brecha;
- Tempo de formação da brecha;
- Modo de ruptura;
- Coeficiente de descarga do *piping*;
- Mecanismo de ruptura;
- Nível d'água de ruptura ou tempo.

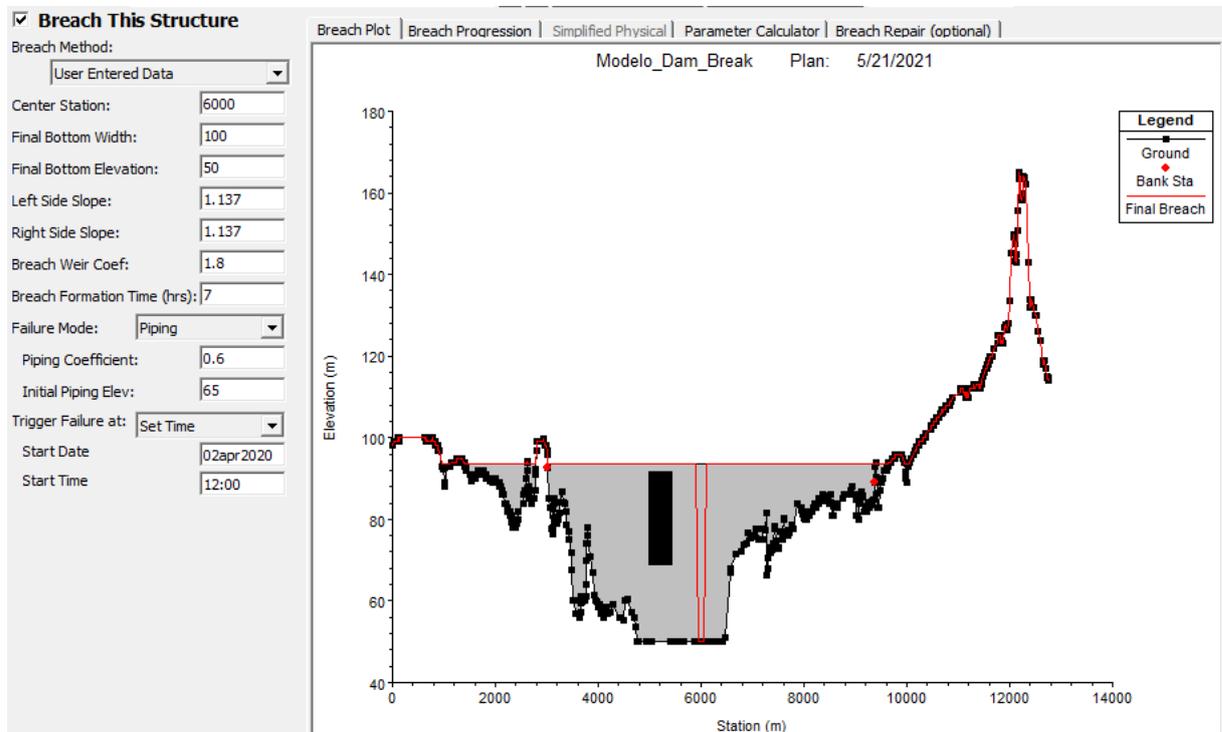
A escolha dos parâmetros de brecha foi de grande importância, tendo em vista que estes influenciam diretamente no resultado final do hidrograma de ruptura. As Figura 23 e Figura 24 apresentam, respectivamente, os valores dos parâmetros de brecha adotados para os cenários de galgamento e *piping*. Foi possível observar que no cenário de galgamento foi indicado o momento do rompimento a partir do parâmetro “*Starting WS*”, que representa o atingimento de uma cota que possibilita o galgamento do barramento. Para o cenário de *piping* foi indicando o momento do início do rompimento a partir dos parâmetros “*Start date*” e “*Start time*”, uma vez que se utilizou uma vazão constante no modelo. Em ambas as figuras é possível observar a brecha formada no barramento, representada pela área delimitada pelas linhas vermelhas.

Figura 23 – Parâmetros de brecha utilizados no modelo HEC-RAS para o caso de galgamento.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Figura 24 – Parâmetros de brecha utilizados no modelo HEC-RAS para o caso de *piping*.



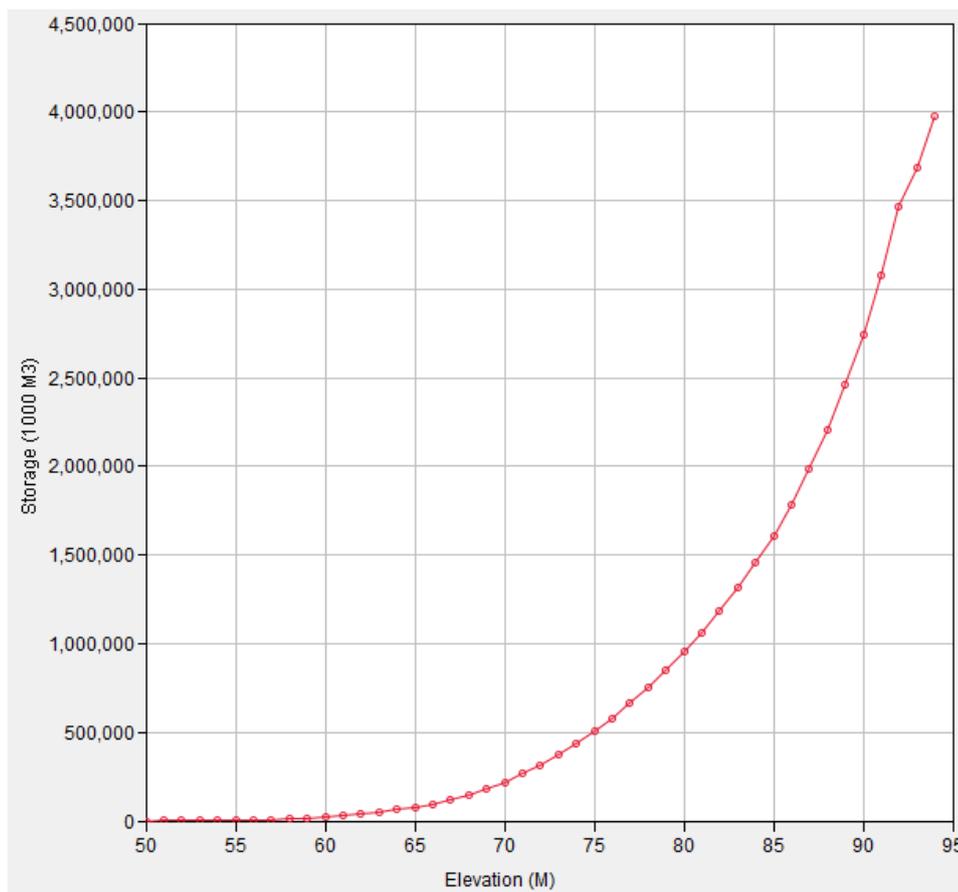
Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Com o preenchimento dos dados de entrada para ambos os cenários foi possível realizar a simulação no *software* e obter os hidrogramas de rompimento.

### 3.3.2 Rompimento da barragem no HEC-HMS

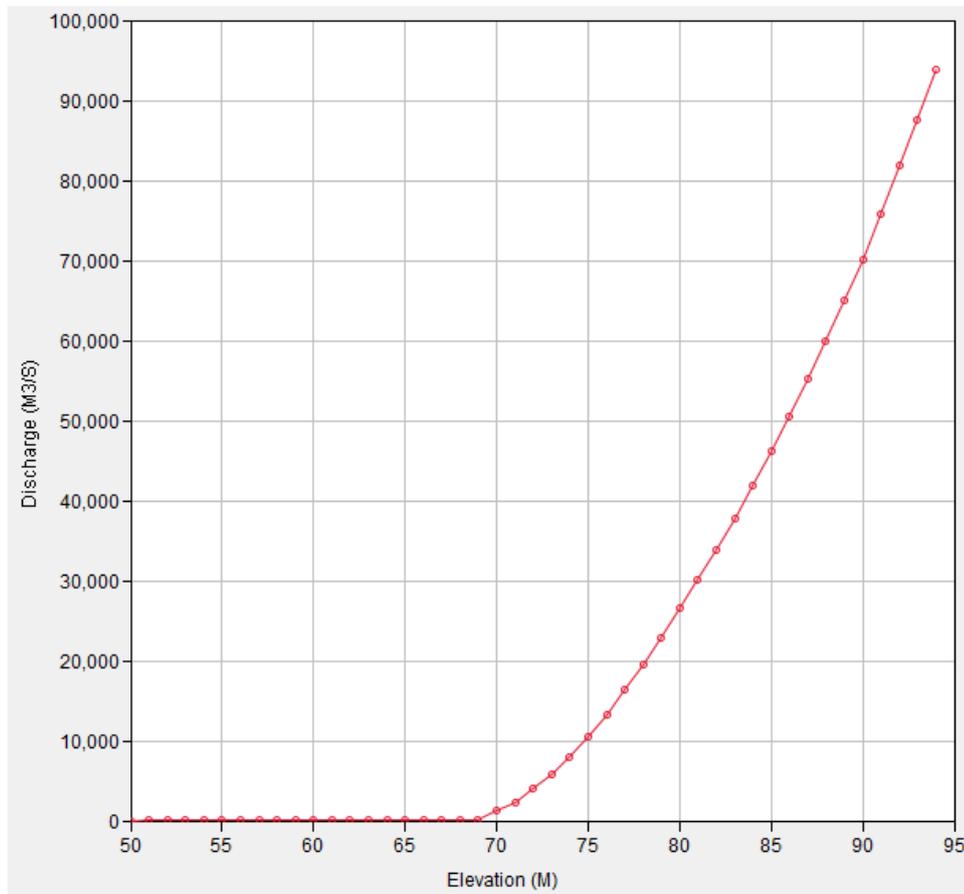
A simulação hidrológica de rompimento de barragem utilizou a versão 4.5 do *software* HEC-HMS. Neste *software*, o processo de simulação iniciou-se com a criação de um modelo da bacia a ser analisada. Posteriormente foi realizada a inserção das características de entrada na bacia, sendo possível optar por um carregamento constante ou por meio de um hidrograma. Para este estudo, optou-se pela utilização dos hidrogramas afluente ao reservatório para manter as características utilizadas na modelagem do HEC-RAS. Os dados de entrada do reservatório foram inseridos informando a elevação da crista da barragem de 93,5 metros, curva Cota x Volume, apresentado na Figura 25 e indicando a existência de um vertedouro. Além disso, foram inseridos os valores de curva de descarga do vertedouro para completar a modelagem Figura 26.

Figura 25 – Curva Cota x Volume do reservatório.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Figura 26 – Curva de descarga do vertedouro.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Para definir o modo de ruptura do reservatório foram indicados os parâmetros da brecha de ruptura. Os parâmetros utilizados buscam manter a semelhança aos aplicados na simulação do *software* HEC-RAS, com o intuito de simular a mesma situação. Os parâmetros inseridos no HEC-HMS para os cenários de ruptura de galgamento e *piping* estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Parâmetros de brecha utilizados no modelo HEC-HMS para o caso de galgamento (a) e *piping* (b).

The figure shows two screenshots of the HEC-HMS software interface, labeled 'a)' and 'b)', showing the 'Dam Break' options for a reservoir named 'Bacia'.

**Screenshot a) (Overtop Breach):**

- Basin Name: Bacia
- Element Name: Reservatorio
- Method: Overtop Breach
- Direction: Main
- \*Top Elevation (M): 93,5
- \*Bottom Elevation (M): 50
- \*Bottom Width (M): 100
- \*Left Slope (xH:1V): 1,137
- \*Right Slope (xH:1V): 1,137
- \*Development Time (HR): 10
- Trigger Method: Elevation
- \*Trigger Elevation (M): 93,5
- Progression Method: User Curve
- \*Progression Curve: CurvaS1Galg

**Screenshot b) (Piping Breach):**

- Basin Name: Bacia
- Element Name: Reservatorio
- Method: Piping Breach
- Direction: Main
- \*Top Elevation (M): 93,5
- \*Bottom Elevation (M): 50
- \*Bottom Width (M): 100
- \*Left Slope (xH:1V): 1,137
- \*Right Slope (xH:1V): 1,137
- \*Piping Elevation (M): 65
- \*Piping Coefficient: 0,6
- \*Development Time (HR): 7
- Trigger Method: Specific Time
- \*Trigger Date (ddMMYYYY): 02abr2020
- \*Trigger Time (HH:mm): 12:00
- Progression Method: User Curve
- \*Progression Curve: CurvaS1Piping

Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Com o preenchimento dos dados de entrada para ambos os cenários foi possível realizar a simulação no *software* e obter os hidrogramas de rompimento.

### 3.4 ELABORAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO NO HEC-RAS

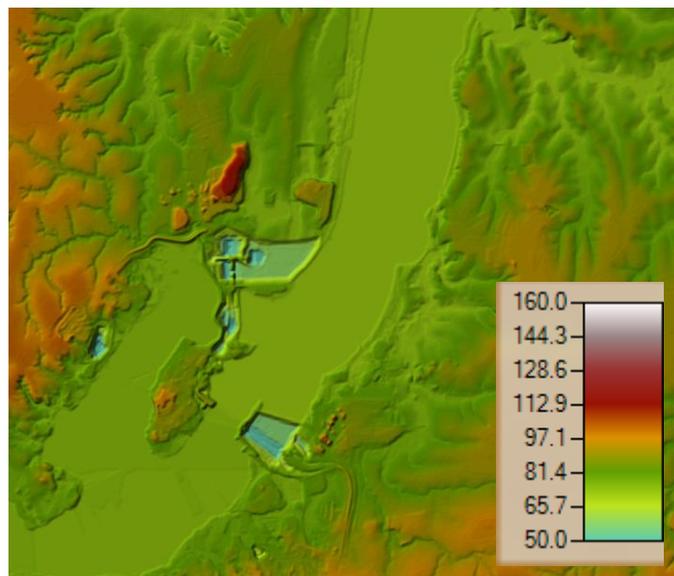
Para propagar os hidrogramas de rompimento gerados em ambos os *softwares*, criou-se um modelo hidrodinâmico no HEC-RAS com o objetivo de representar a propagação dos cenários de ruptura no vale a jusante. Para isso, foram levantadas as informações da topografia da área a jusante do barramento, criado uma geometria ao longo do trecho de estudo e, também, informado as condições de controle para o final do modelo.

#### 3.4.1 Representação da área a jusante do barramento

O terreno elaborado para a modelagem utilizou informações de topografia e batimetria. A topografia foi gerada a partir do levantamento a *laser* obtido através de voos realizados na região do vale a jusante do reservatório. As seções topobatimétricas foram levantadas em campo

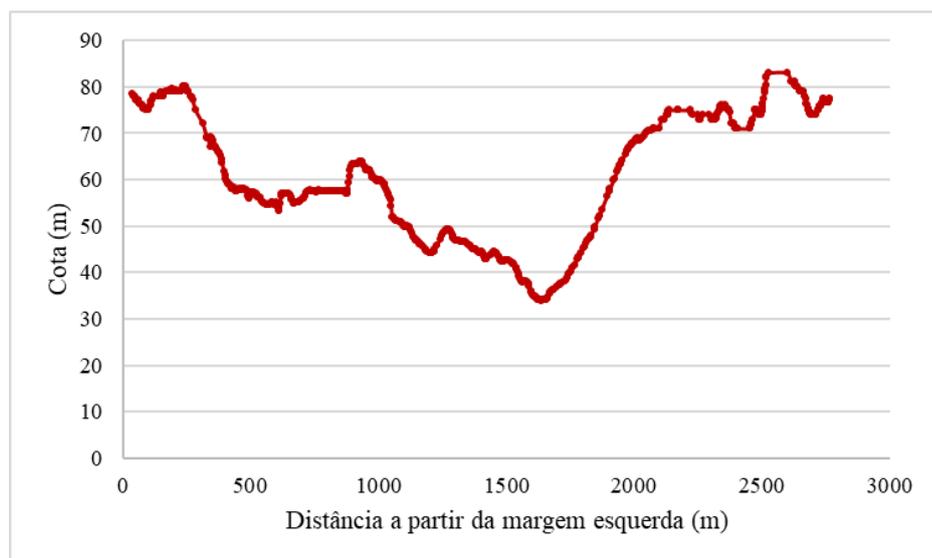
e objetivavam representar o fundo do rio. A Figura 28 apresenta o modelo digital de terreno obtido através do levantamento a laser e a Figura 29 apresenta uma das seções topobatimétrica levantada no rio estudado.

Figura 28 – Modelo digital de terreno (MDT) levantado.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Figura 29 – Seção exemplo de topobatimetria levantada.

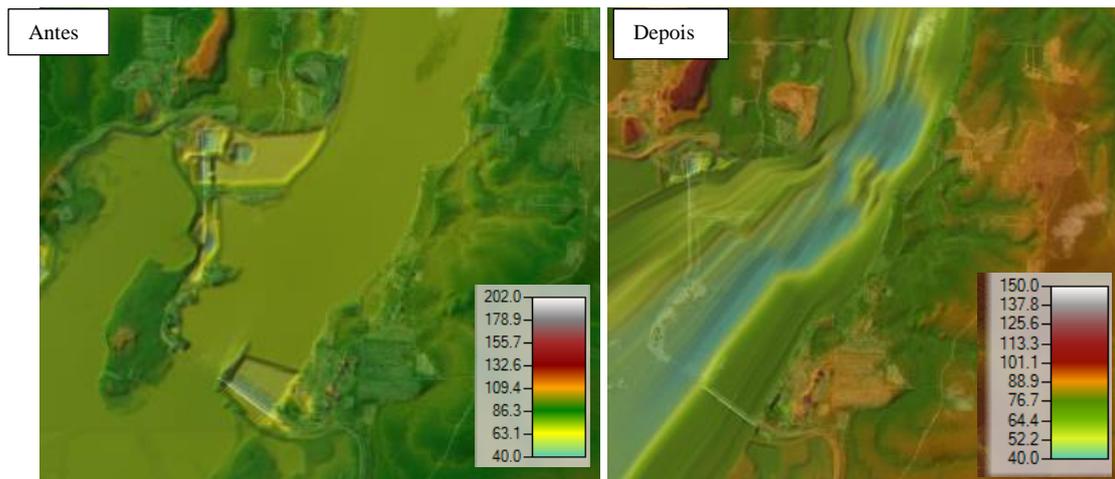


Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Com as informações de batimetria, o *software* HEC-RAS foi utilizado para gerar a interpolação das seções levantadas e criar um modelo de terreno representando o fundo do rio

estudado. Em seguida, para a criação do terreno utilizado no estudo, foi realizada a união deste modelo de terreno com a topografia obtida a *laser*. Dessa forma foi possível gerar um arquivo representativo do terreno contendo informações mais detalhadas na região da calha do rio e menos detalhadas no restante do relevo. A Figura 30 apresenta a diferença de detalhamento após a utilização das informações de batimetria.

Figura 30 – Resultado da utilização da batimetria para detalhamento do MDT.

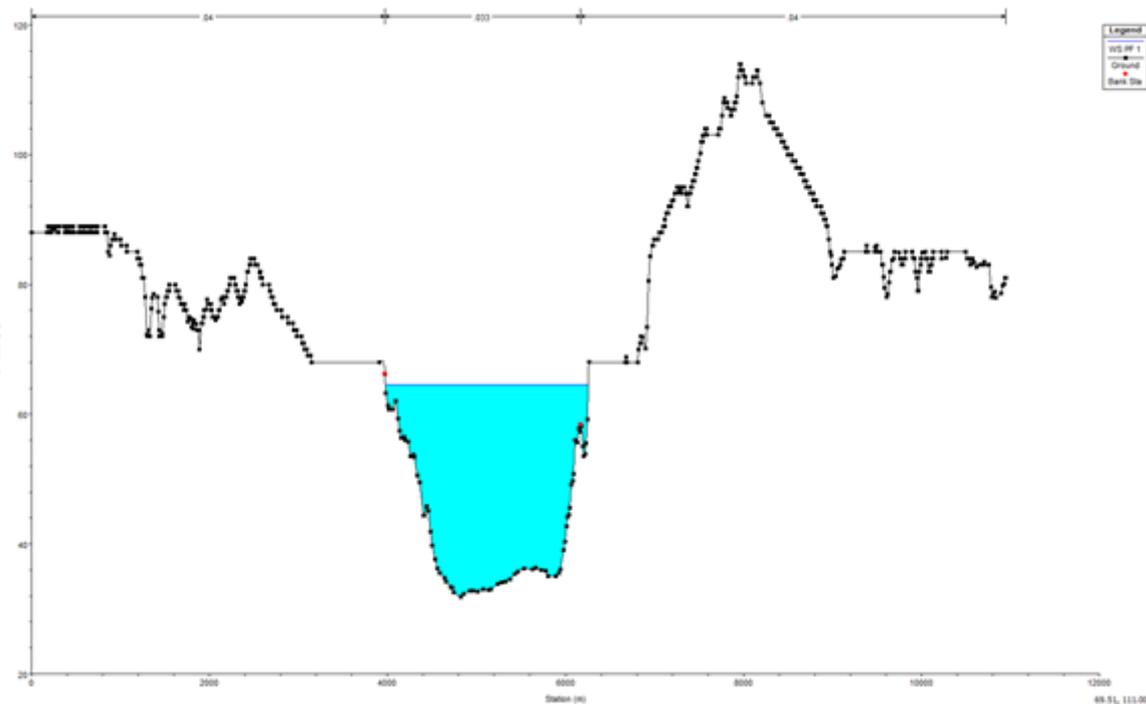


Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

### 3.4.2 Geometria do modelo numérico

A inserção da geometria no modelo visa representar variações que ocorrem no trecho do rio estudado. Para isso foi utilizado a ferramenta *RAS Mapper* no HEC-RAS que permitiu definir o traçado do rio e o local das seções transversais a partir do terreno, além de permitir determinar a localização da estrutura do barramento. A Figura 31 apresenta uma das seções transversais que foi criada no *software* HEC-RAS para ser utilizada na modelagem.

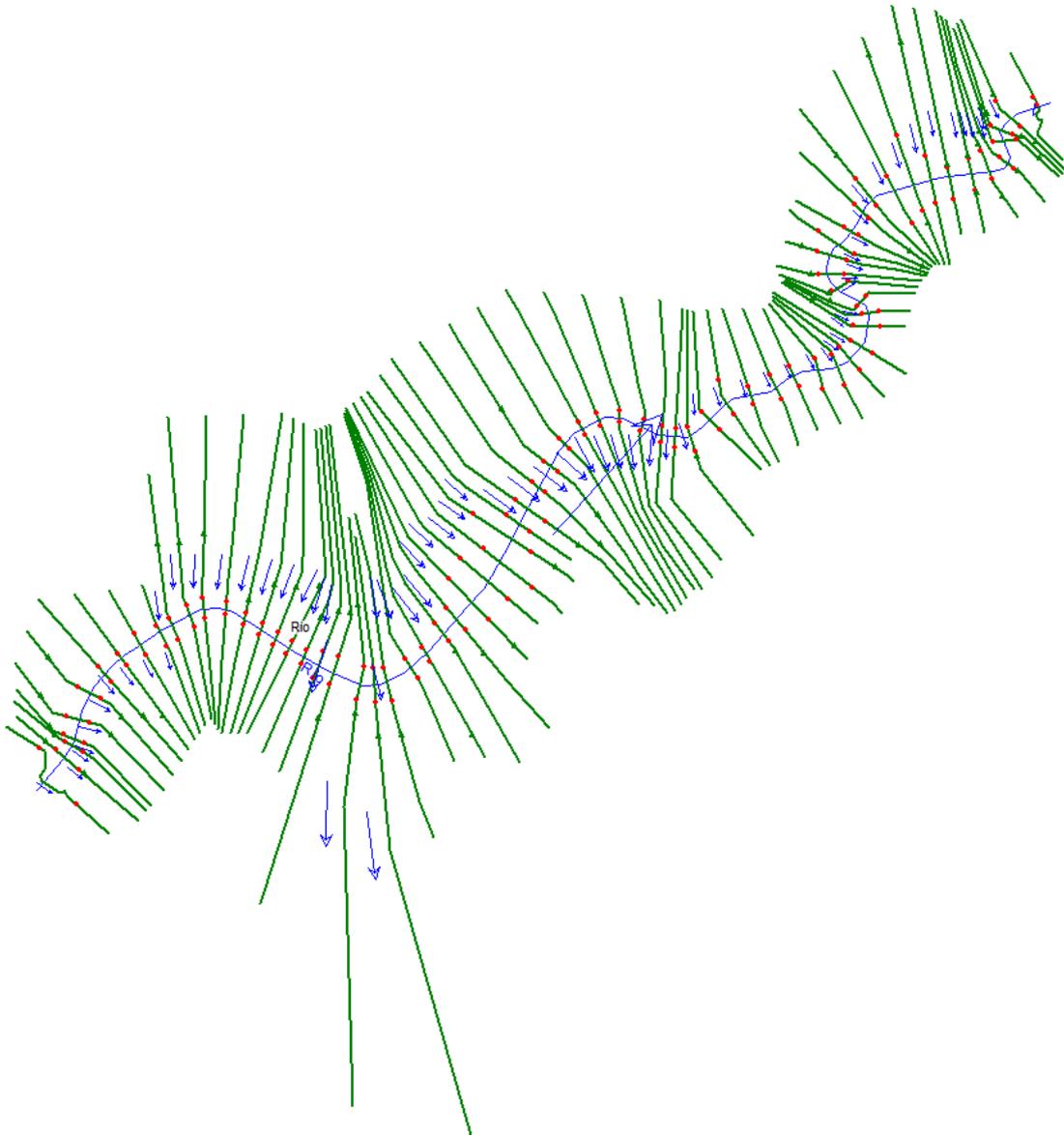
Figura 31 – Exemplo de seção inserida no modelo HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

A geometria final escolhida para rodar o modelo pode ser observada na Figura 32. Nela o rio está apresentado através de um traçado na cor azul, cada seção transversal está apresentada através de uma linha verde com uma seta indicando a orientação do rio, de sua margem esquerda para a margem direita, a partir da observação da barragem. Também é possível observar as margens através de pontos apresentados em vermelho em cada seção transversal.

Figura 32 – Geometria utilizada para a modelagem no HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Outro parâmetro importante, que influencia na modelagem, é o coeficiente de rugosidade também chamado de coeficiente de Manning. Este valor representa as condições associadas a natureza do terreno estudado e é atribuído a cada região da seção (margens e leito). Como uma seção pode não ser homogênea, é possível atribuir mais de um coeficiente em sua extensão. Para definir o valor utilizado deve ser avaliado as características físicas da seção em conjunto com referências da literatura. Utilizou-se a Tabela 4, que apresenta valores de referência para o coeficiente de Manning associado a natureza do terreno.

Tabela 4 – Valores de referência do coeficiente de rugosidade da Fórmula de Manning.

Item	Natureza das paredes	Condições			
		Muito Boas	Boas	Regulares	Ruins
1	Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
2	Como em 1, porém com vegetações e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
3	Com meandros, bancos e poços pouco profundos e limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
4	Como em 3, águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,055
5	Como em 3, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
6	Como em 4, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
7	Com margens espreiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
8	Com margens espreiadas, com muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Adaptado Porto (2006).

Dessa forma, os valores de coeficiente de rugosidade para o modelo proposto variaram no leito do rio de 0,025 (limpo, retilíneo e uniforme com condições muito boas) à 0,075 (com margens espreiadas, com muita vegetação e com condições muito boas).

### 3.4.3 Condição de jusante do modelo

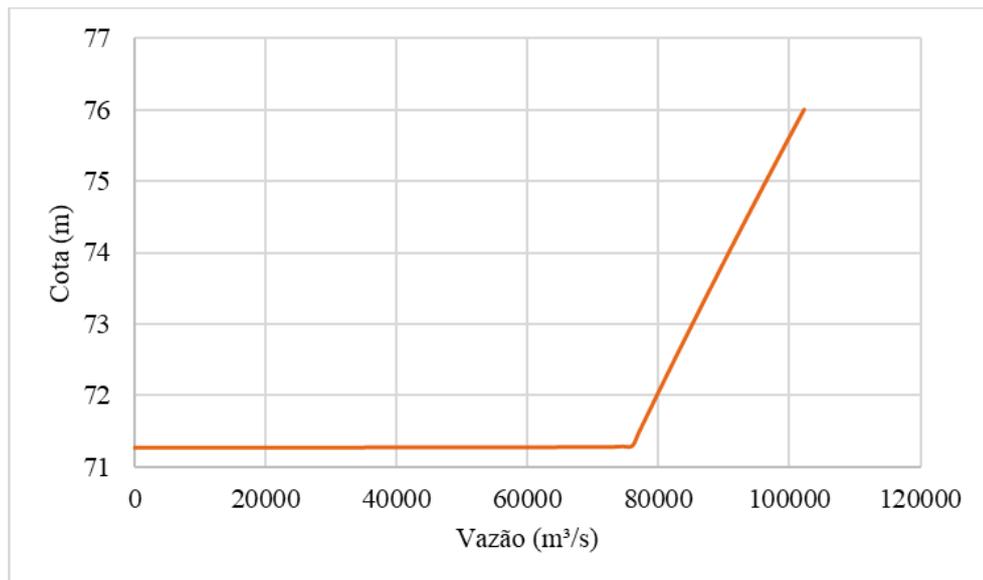
Para a simulação hidrodinâmica no *software* HEC-RAS é necessário indicar a condição de jusante, isso pode ser feito através da inserção de hidrogramas, curvas de descarga entre outros.

No caso do modelo simulado existe uma barragem localizada a jusante, neste estudo indicada pelo nome de Barragem Y. Este empreendimento possui um reservatório que proporciona um controle hidráulico no rio, conhecido por remanso. O remanso tem grande influência no trecho de rio estudado devido as proporções do reservatório da Barragem Y. Esta barragem possui um vertedor operado por um sistema de comportas. Desse modo, o volume de

água que flui pelas comportas da barragem (defluente) impactam no nível do seu reservatório que, por sua vez, influencia no remanso percebido pelos trechos a jusante da Barragem X.

Dessa forma optou-se por utilizar a curva de descarga do vertedor da Barragem Y apresentada na Figura 33, tendo em vista que este barramento está localizado a jusante da Barragem X e influenciará na área de estudo.

Figura 33 – Curva de descarga controlada por operação de comportas da Barragem Y.



Fonte: confidencial.

#### 3.4.4 Propagação dos hidrogramas de rompimento

Após a configuração e inserção dos valores anteriormente descritos, foi feita a simulação hidrodinâmica no HEC-RAS para os cenários propostos. Foram considerados como condição de entrada do modelo os hidrogramas de rompimento gerados a partir das modelagens feitas anteriormente conforme apresentado no item 3.3. Com a modelagem feita foi possível obter os valores de níveis d'água ao longo do trecho de rio estudado e também a mancha de inundação gerada para cada cenário simulado.

Cabe ressaltar que as mesmas condições de simulação foram utilizadas para a propagação do hidrograma defluente. Sendo elas, a geometria, Coeficientes de Manning, condições de jusante e tempos computacionais de cálculo.

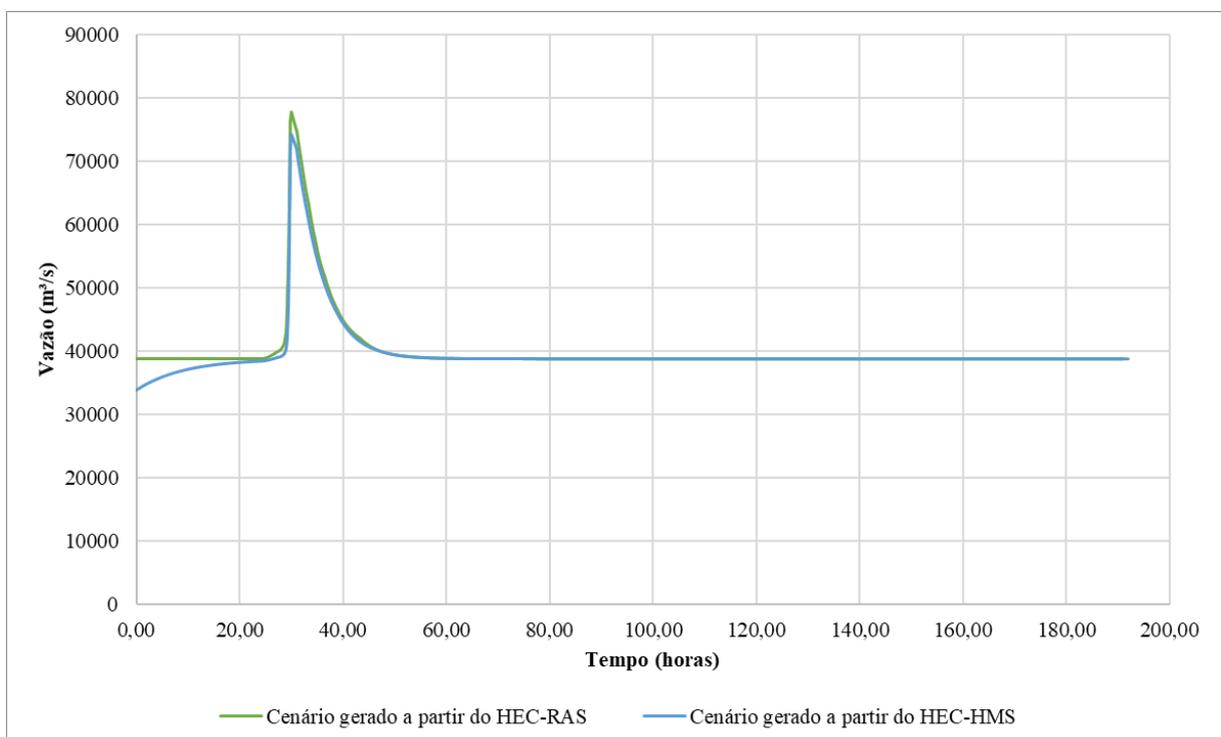
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos através da simulação de rompimento de barragem nos *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS com o objetivo de compreender os impactos da modelagem em cada ferramenta.

### 4.1 HIDROGRAMAS DE RUPTURA

O hidrograma de rompimento por *Piping*, gerado através das modelagens nos *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS está apresentado na Figura 34. É possível observar que neste cenário o comportamento do hidrograma teve uma leve variação para o momento inicial da simulação e no momento do rompimento a vazão de pico foi inferior no HEC-HMS quando comparado ao HEC-RAS.

Figura 34 – Hidrograma defluente da barragem para o caso de *Piping*.

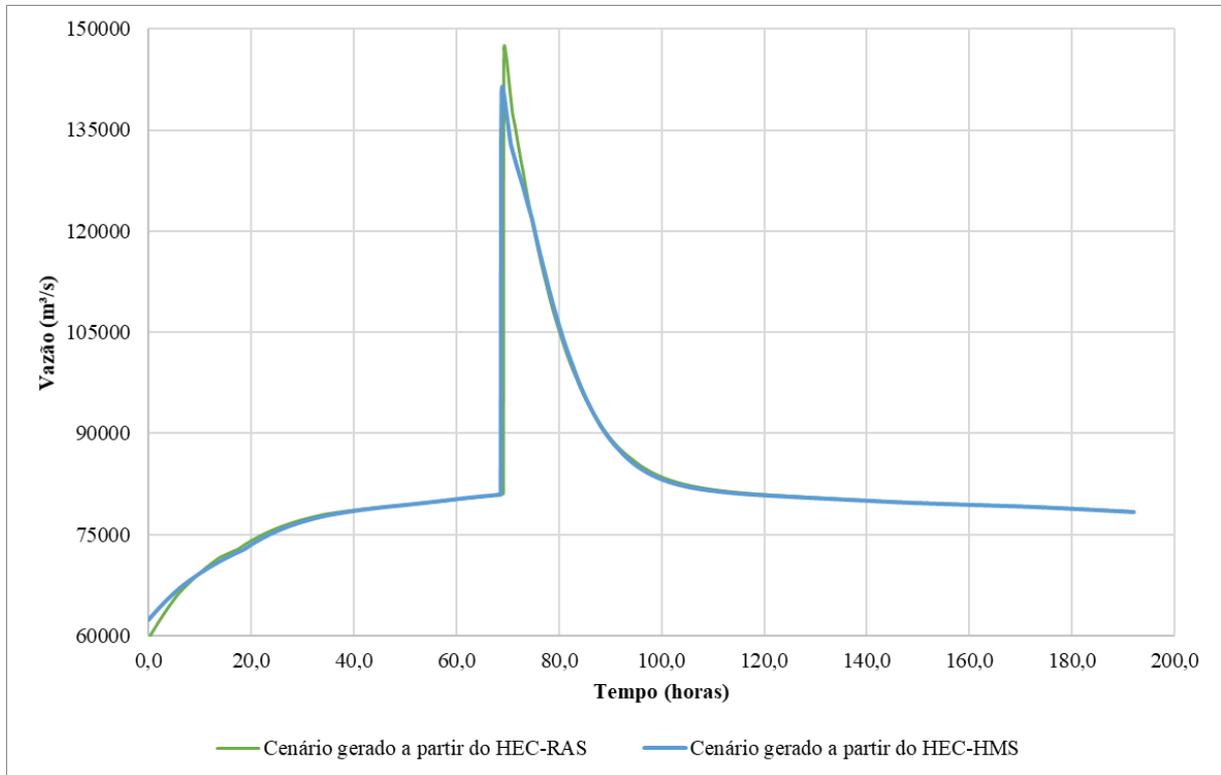


Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

O hidrograma de rompimento por galgamento, gerado através das modelagens nos *softwares* HEC-RAS e HEC-HMS está apresentado na Figura 35. É possível observar que o comportamento do hidrograma segue a mesma tendência, independente do *software*, tendo uma

alteração mais significativa na vazão de pico do hidrograma, onde o HEC-RAS apresentou um valor superior ao HEC-HMS.

Figura 35 – Hidrograma defluente da barragem para o caso de galgamento.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Através da comparação entre os hidrogramas, foi possível perceber que o *software* influencia principalmente na vazão de pico. Sem apresentar grandes discrepâncias. Percebe-se que no caso de galgamento a diferença entre as vazões de pico calculadas é de aproximadamente 6.000 m<sup>3</sup>/s o que representa uma variação de 4,31%. Para o cenário de *piping*, a diferença percentual observada foi um pouco maior, sendo de 4,73%, ou seja, aproximadamente, 3.500 m<sup>3</sup>/s. Os valores de vazão de pico obtidos nos cenários de galgamento e *piping*, podem ser observados nas Tabela 5.

Tabela 5 – Vazão de pico atingida nos modelos simulados considerando a ruptura por galgamento.

Cenário	Modelo	Qpico (m <sup>3</sup> /s)	Diferença
Galgamento	HEC-RAS	147.531,9	4,31%
	HEC-HMS	141.436,2	
Piping	HEC-RAS	77.837,7	4,73%
	HEC-HMS	74.323,5	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

#### 4.2 DIFERENÇA DE COTAS E VAZÕES

A Tabela 6 apresenta os níveis d'água máximos atingidos e vazões alcançadas pela onda de cheia induzida pela simulação do rompimento por galgamento no HEC-RAS e no HEC-HMS ao longo do trecho do rio estudado. Apesar das vazões apresentarem uma diferença entre os valores obtidos nos modelos, estas são pouco representativas quando considerada a magnitude das vazões simuladas. As cotas obtidas apresentam uma diferença de até 2 centímetros.

Tabela 6 – Níveis atingidos nos modelos simulados considerando a ruptura por galgamento.

Cenário de rompimento por galgamento						
Distância (km)	HEC-RAS		HEC-HMS		Diferença de vazões (m <sup>3</sup> /s)	Diferença de Cotas (m)
	Q (m <sup>3</sup> /s)	Cota (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Cota (m)		
0	115.121	82,65	113.824	82,66	1.298	-0,01
55	95.019	79,64	95.221	79,65	-202	-0,01
107	93.574	75,28	93.684	75,30	-110	-0,02

Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Os níveis d'água máximos atingidos e vazões alcançadas do modelo HEC-RAS e HEC-HMS, através do modo de falha de *piping*, estão apresentados na Tabela 7. É possível observar que as diferenças obtidas neste cenário são superiores ao cenário de galgamento. No entanto o comportamento geral destes parâmetros se mantém. Observa-se que a variação da seção imediatamente a montante da barragem, representada pela seção de distanciamento 0 km, obteve uma diferença entre as cotas do modelo HEC-RAS e HEC-HMS de 26 centímetros e esta diferença é atenuada a medida que a distância da barragem aumenta.

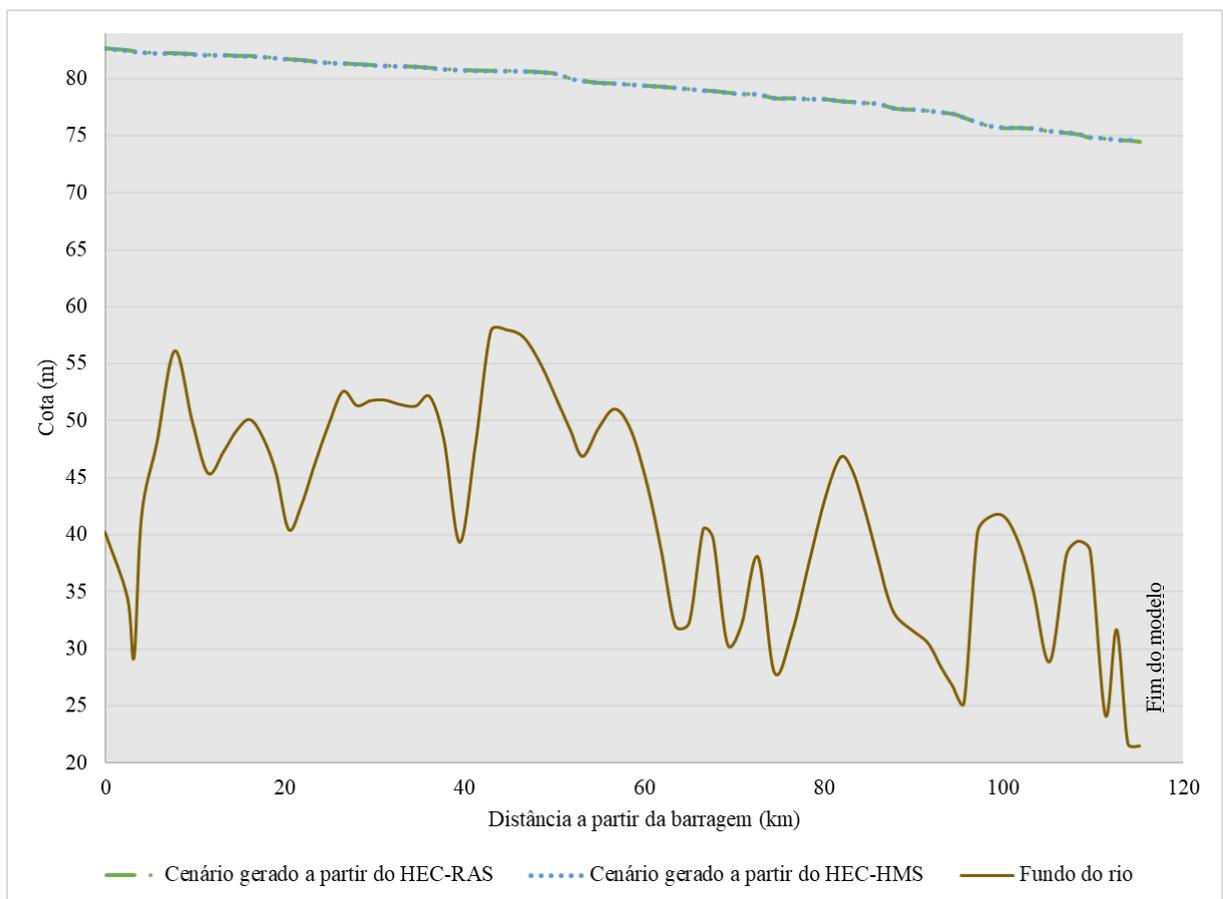
Tabela 7 – Níveis atingidos nos modelos simulados considerando a ruptura por *piping*.

Cenário de rompimento por <i>piping</i>						
Distância (km)	HEC-RAS		HEC-HMS		Diferença de vazões (m <sup>3</sup> /s)	Diferença de Cotas (m)
	Q (m <sup>3</sup> /s)	Cota (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Cota (m)		
0	66.335	77,30	63.252	77,04	3.083	0,26
55	49.532	74,59	47.723	74,42	1.809	0,17
107	49.321	71,68	47.563	71,65	1.758	0,03

Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

A Figura 36 apresenta os valores de nível d'água atingidos pelos modelos simulados para o cenário de rompimento por galgamento. É possível perceber que ao longo do trecho estudado não existem diferenças que se destaquem.

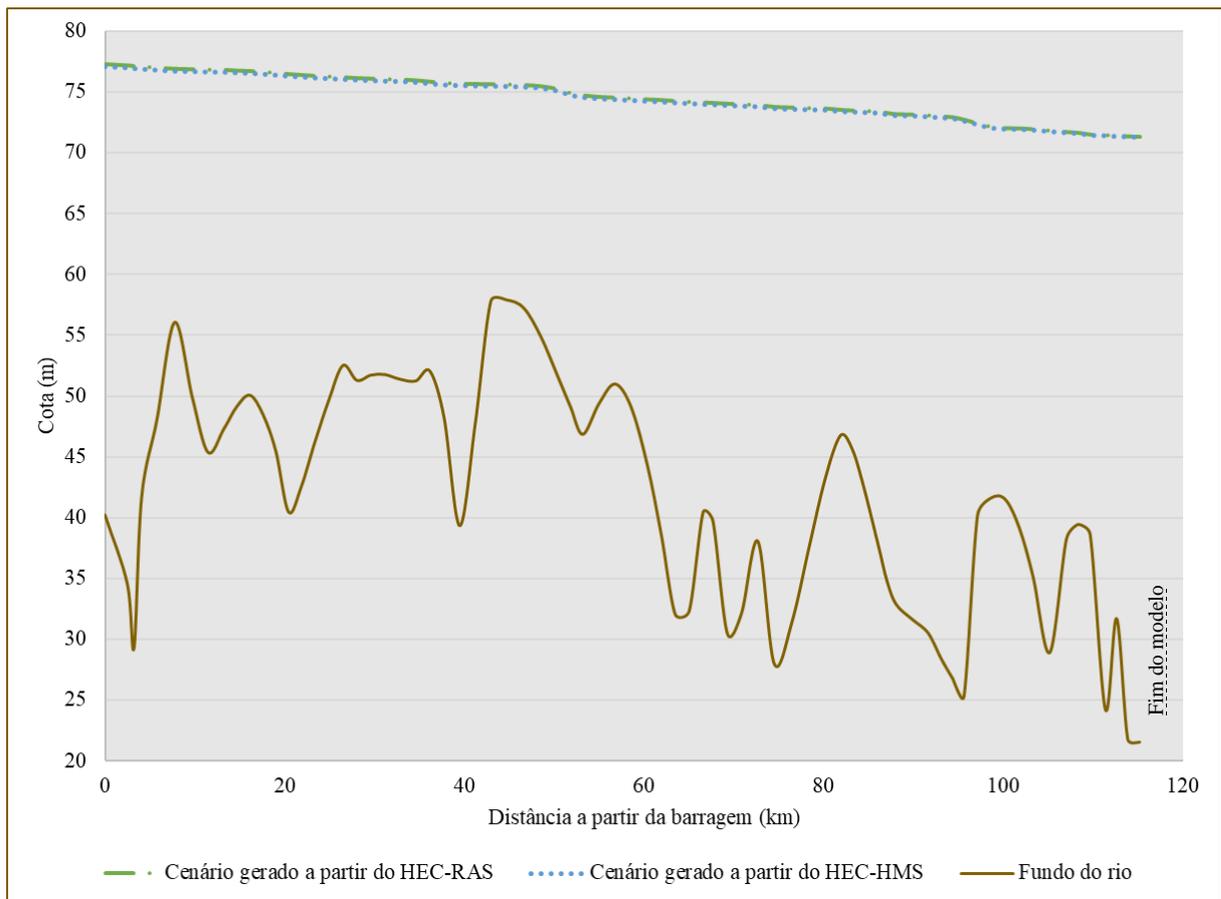
Figura 36 – Níveis d'água máximos atingidos na modelagem ao longo do trecho de rio estudado para o cenário de galgamento.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

A Figura 37 apresenta os valores de nível d'água atingidos pelos modelos simulados para o cenário de rompimento por *piping*. Neste caso, a linha d'água para o cenário do HEC-RAS foi superior ao HEC-HMS em toda a extensão do rio. Contudo, é possível observar uma pequena atenuação na diferença de cotas ao se distanciar do barramento.

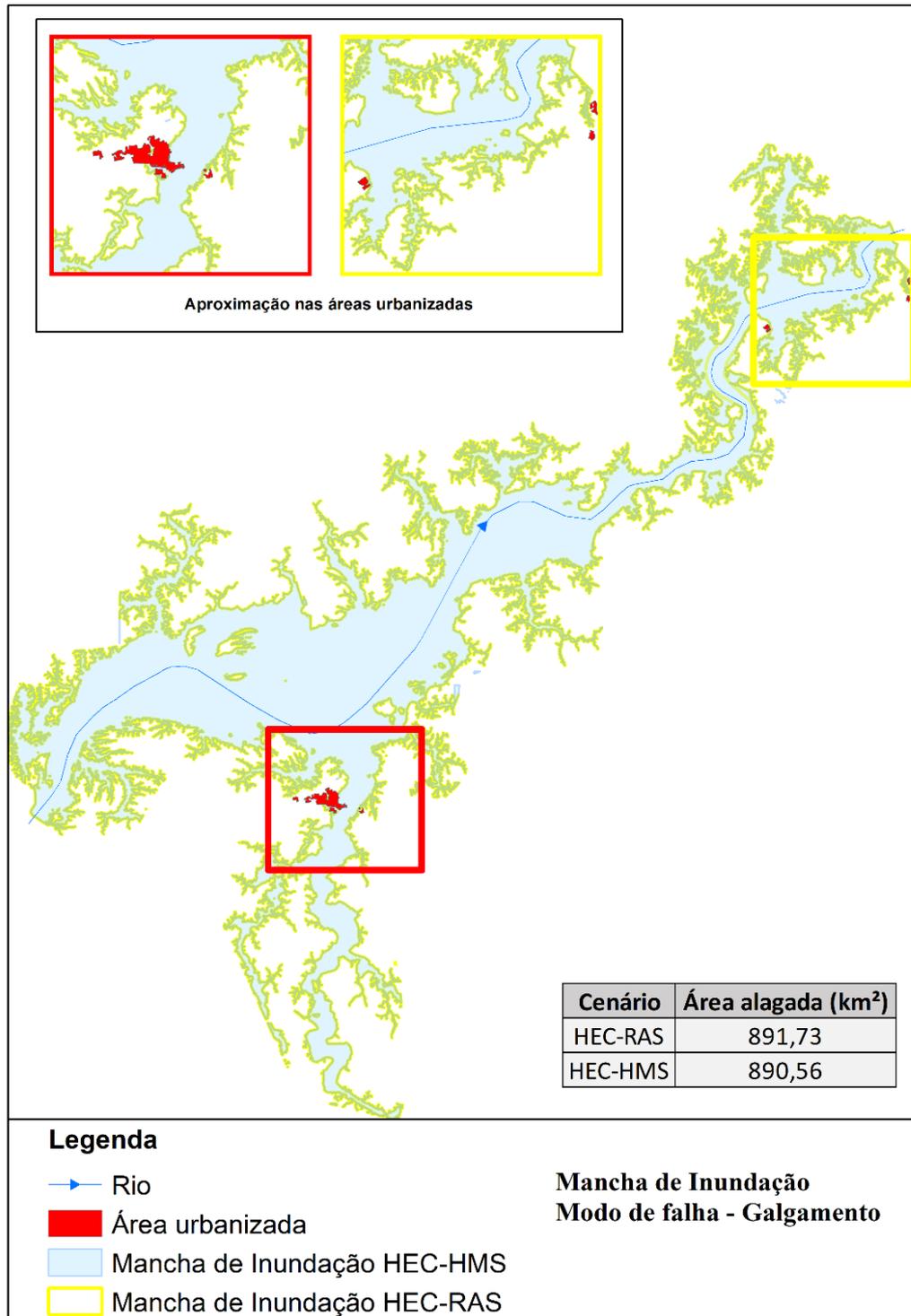
Figura 37 - Níveis d'água máximos atingidos na modelagem ao longo do trecho de rio estudado para o cenário de *piping*.



### 4.3 MANCHAS DE INUNDAÇÃO

A partir da onda de inundação obtida no *software* HEC-RAS, foram gerados mapas de inundação com base nas cotas máximas atingidas pelo modelo. O mapa de inundação do cenário de galgamento está apresentado na Figura 38. A diferença obtida entre as áreas alagadas do modelo foi de 1,17 km<sup>2</sup> esta informação está de acordo com que foi observado nas análises anteriores.

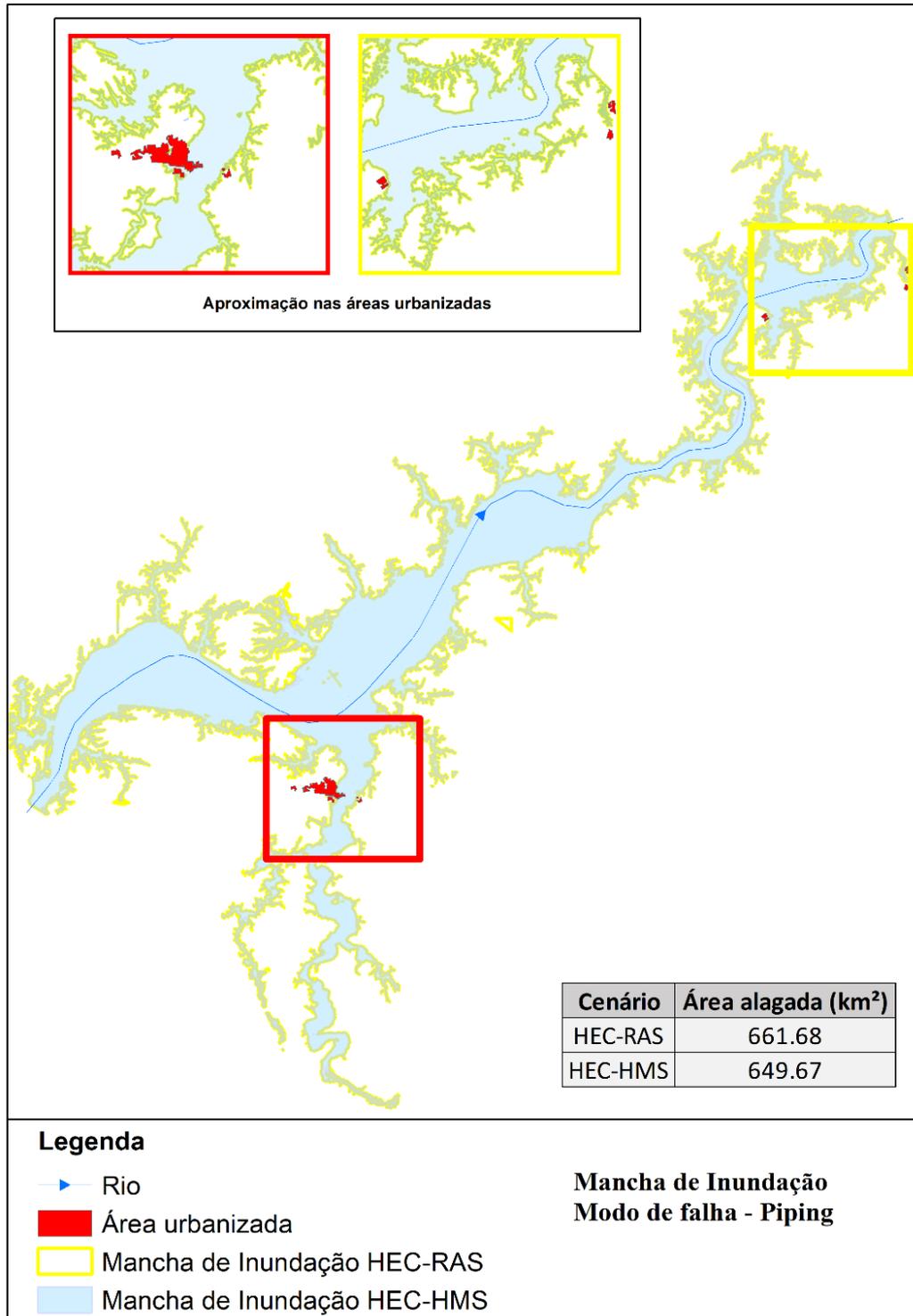
Figura 38 – Mapa de inundação referente as rupturas hipotéticas por Galgamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 39 apresenta o mapa de inundação do cenário de *piping*, a diferença de áreas destas simulações foi de 12,01 km<sup>2</sup>. O valor da diferença obtido neste cenário foi maior que no cenário de galgamento, no entanto, representa menos de 2% da área total alagada.

Figura 39 – Mapa de inundação referente as rupturas hipotéticas por *Piping*.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se também que as áreas urbanizadas no trecho de rio simulado em ambos os cenários de simulação não são impactadas substancialmente pela utilização do *software* HEC-RAS ou HEC-HMS.

## 5 CONCLUSÃO

A utilização dos *softwares* para auxiliar na simulação de rompimento de barragens é de suma importância para o desenvolvimento de trabalhos que auxiliem na elaboração de estudos que possibilitam a organização da população em situações de desastres. Como alternativas para estes estudos, a simulação através do HEC-RAS e HEC-HMS apresentam-se como possibilidades viáveis. Em ambos os *softwares* é possível realizar a inserção da curva de descarga do vertedouro do vertedouro, e simular a existência do reservatório através da curva cota-volume.

O HEC-HMS é uma ferramenta hidrológica de fácil configuração, numericamente estável, porém apresenta o resultado somente do hidrograma de rompimento da barragem, ou seja, as vazões alcançadas pelo rompimento ao longo do tempo. Ele não possui ferramentas para o mapeamento da área de inundação, sendo necessária a utilização de outro *software* para os cálculos hidrodinâmicos.

Por mais que ambos os *softwares* utilizem a equação de descarga do vertedor e orifício para o cálculo do hidrograma defluente, o HEC-HMS permite apenas a escolha do coeficiente de *piping*, enquanto o coeficiente para a situação de galgamento, é pré-definida pelo *software*, o que limita o modelador. Outro ponto observado, é a limitação nos modos de rompimento disponíveis, que se restringem aos abordados nesse trabalho. O HEC-RAS, por exemplo, permite modificar o modo de falha da barragem considerando de maneira simples problemas operacionais causados por falha humana. A abordagem de falha de duas comportas no vertedouro, foi simulada no estudo de galgamento apresentado, no entanto, para que isso ocorresse no HEC-HMS foi necessário utilizar de simplificações da curva de descarga dos vertedouros.

O HEC-RAS demanda mais atenção do modelador, e possibilita a utilização de mais dados para sua conclusão, como por exemplo, a inserção de seções transversais caracterizando o reservatório a montante da barragem. Contudo, esta característica agrega informações física diferentes da inserção de curva Cota x Volume, como foi utilizada neste estudo, e conseqüentemente modifica o resultado. Além do mais, a possibilidade de definir o regime de escoamento, torna o modelo mais próximo à realidade hidráulica, quando comparado ao HEC-HMS, que não permite esta escolha. O HEC-RAS não se limita a simulação de *dam break* e permite, em suas versões mais atuais, obter as manchas de inundação geradas pelo rompimento através da ferramenta *RAS Mapper*. Apesar de outros autores pontuarem um maior

tempo para executar a simulação do *dam break* no HEC-RAS, como é o caso de Mendes apud USACE (2008), esta situação não foi observada pela autora durante a modelagem realizada.

Neste trabalho, devido a necessidade de tornar os modelos comparáveis, o reservatório foi inserido considerado o amortecimento de vazões pela curva cota volume, no entanto os resultados obtidos não foram iguais. Os resultados nos cenários de galgamento e *piping* utilizando o HEC-RAS foram superiores. Caso o PAE e demais planos de segurança desta barragem utilizem a mancha de inundação do HEC-RAS como base, a área de atuação será maior, o que trará mais segurança para os possíveis atingidos. É importante ressaltar que o estudo realizado trata de uma barragem com grandes vazões, localizado em uma região pouco habitada e com relevo de planície, os mesmos resultados podem variar em barragens com características diferentes.

Conclui-se que para a modelagem proposta, onde a barragem estudada está localizada em uma região de planície, a influência do *software* não impactou significativamente nos resultados obtidos das manchas de alagamento. Sendo assim, neste cenário, a escolha do HEC-RAS ou HEC-HMS para a simulação de rompimento e obtenção do hidrograma de ruptura pode ficar a critério do modelador. No entanto, a utilização do HEC-RAS, neste caso, parece ser mais interessante, tendo em vista que com este *software* é possível realizar toda a simulação necessária para a obtenção de manchas de inundação.

Pelas características existentes no modelo proposto, sugere-se a realização de trabalhos futuros que abordem barragens com configurações distintas à estudada, a citar barragens de pequeno porte e, ou localizadas em vales encaixados, com o objetivo de validar a hipótese de semelhança entre o resultado das modelagens nos *softwares* utilizados. Observa-se também a oportunidade de estudo considerando barragens com material construtivo distinto, a fim de analisar o desenvolvimento da brecha de ruptura nestas estruturas.

Outro aspecto a ser explorado é a variação dos parâmetros de brecha nas simulações e do coeficiente de *Manning* no modelo hidrodinâmico para a geração da mancha de inundação, pois esta análise de sensibilidade pode influenciar na diferença observada entre os resultados dos *softwares* analisados, e não foi explorada no trabalho realizado. Além disso sugere-se, também, a utilização das ferramentas individuais de cada software para auxiliar na modelagem, como por exemplo a utilização de dados climatológicos para compor as informações de simulação no HEC-HMS e também a modelagem do reservatório por seção transversal no HEC-RAS.

## REFERÊNCIAS

A NOTÍCIA DO VALE. **Barragem de Sobradinho inicia o mês de junho com volume útil de 63% de sua capacidade.** Disponível em: <https://anoticiadovale.com/index.php/pt/categorias/15-sobradinho/4883-barragem-de-sobradinho-inicia-o-mes-de-junho-com-volume-util-de-63-de-sua-capacidade>. Acesso em: 01 jun. 2021

AGÊNCIA ANSA (org.). **3 anos após Mariana, barragem se rompe em Brumadinho.** 2019. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2019/01/3-anos-apos-mariana-barragem-se-rompe-em-brumadinho.html>. Acesso em: 05 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Relatório de Segurança de Barragens – RSB 2019.** Brasília, DF. 2020.

BRASIL. **Lei n. 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. Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 2010. BRASIL.

BRASIL. **Lei n. 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, 30 de set. 2020

BRASIL. SNISB. (org.). **Painel de Informações do SNISB.** 2021. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

COLLISCHONN, W. **Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997, 193p

CEMIG (org.). **UHE Irapé.** Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina/uhe-irape/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

CHESF (org.). **Sobradinho**: Descrição do aproveitamento de Sobradinho. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>. Acesso em: 05 mar. 2021.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p.191-206, jul./dez. 1997

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. - ELETROBRÁS. **Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas**. Brasil: Eletrobrás, 2003. 278 p.

ESTADO DE MINAS (Minas Gerais). **Rompimento de barragens em Mariana**: imagens da destruição em minas. imagens da destruição em Minas. 2015. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/galeria-de-fotos/2015/11/06/interna\\_galeriafotos,5440/rompimento-de-barragens-em-mariana-imagens-da-destruicao-em-minas.shtml](https://www.em.com.br/app/galeria-de-fotos/2015/11/06/interna_galeriafotos,5440/rompimento-de-barragens-em-mariana-imagens-da-destruicao-em-minas.shtml). Acesso em: 13 maio 2021.

FERLA, Rute. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens**. 2018, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FERREIRA, Ana Luisa Moreira; ANDREZEJEWSKI Edgar Alberti. COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUPTURA DE UMA BARRAGEM HIPOTÉTICA. **Comitê Brasileiro de Grandes Barragens – XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu, v.30, n.1, p. 1-12, maio 2015.

G1. **Energia Sustentável do Brasil apresenta nova marca e agora é Jirau Energia**. [Internet] 31/01/2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2021/01/31/energia-sustentavel-do-brasil-apresenta-nova-marca-e-agora-e-jirau-energia.ghtml>.

HEC – HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS River Analysis System, **User's Manual**, Version 6.0 Beta. US Army Corps of Engineers, Davis, USA, 2020, p705.  
MENDES, Thiago Augusto. **Avaliação da Vulnerabilidade de Barramentos ao Rompimento de pequenos barramentos localizados a montante [manuscrito]** 2008, 99-105. Universidade Federal de Goiás.

LAURIANO, André Wilhiam. **Estudo de ruptura da Barragem de Funil [manuscrito]: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2009.

LOPER JUNIOR, Paulo Roberto. **Definição da Mancha de Inundação Gerada por Rompimento Hipotético de Barragem: Uma comparação entre Modelos Dinâmico e Estático**, 2020 77p. Universidade Federal de Santa Catarina.

MOTA, Kevin Reiny Rocha, **Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem de Salto Moraes em Ituiutaba/MG**. 2017. Universidade Federal de Uberlândia.

MENDES, Thiago Augusto. **Avaliação da Vulnerabilidade de Barramentos ao Rompimento de pequenos barramentos localizados a montante [manuscrito]**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2008.

MUSSOLINE GUEDES. **A tragédia de Algodões 10 anos depois**. 2019. Disponível em: <https://cidadeverde.com/colunadozozimo/98530/a-tragedia-de-algodoes-10-anos-depois>. Acesso em: 05 mar. 2021.

PEREIRA, Geraldo Magela. Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 3018 p.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Acidentes e rupturas de barragens de armazenamento de água**. São Paulo: Abge, 2020. 307 p.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: Eesc-Usp, 2006. 540 p.

SANTOS, J. Brito dos; FRANÇA, M. J.; ALMEIDA, A. Betâmio de. **Risco associado à ruptura por galgamento de barragens de aterro**. Ingeniería del Agua, Córdoba, v. 14, n. 4, p.260-278, maio 2007.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS, **River Analysis System Hydraulic User's Manual**. Hydrologic Engineering Center (HEC), 2020.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS, **River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. **Analysis of earth dam failures- A database approach**. Isgsr2007- First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, v. 1, n. 1, p.293-302, 18 out. 2007