



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**HIDROGRAMA DE RUPTURA COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE DO RISCO DE  
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO RESERVATÓRIO SERRA AZUL**

**Daniela Domingos**

**Belo Horizonte**

**2025**

**Daniela Domingos**

**HIDROGRAMA DE RUPTURA COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE DO RISCO DE  
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO RESERVATÓRIO SERRA AZUL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista

Orientadora: Prof. Dra. Luciana Peixoto Amaral

Belo Horizonte  
2025



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS**  
**GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL - NS**



**FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 8 / 2025 - DCTA (11.55.03)**

**Nº do Protocolo: 23062.038905/2025-90**

**Belo Horizonte-MG, 22 de julho de 2025.**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**

**DANIELA DOMINGOS**

### **HIDROGRAMA DE RUPTURA COMO SUBSÍDIO PARA ANÁLISE DE RISCO DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO RESERVATÓRIO SERRA AZUL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 14 de julho de 2025.

Banca examinadora:

---

Luciana Peixoto Amaral – Presidente da Banca Examinadora

Prof<sup>a</sup>. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais –  
Orientadora

---

Lilia Maria de Oliveira

Prof<sup>a</sup>. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais –  
CEFET/MG

---

Evandro Carrusca de Oliveira

Prof. Dr. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais –  
CEFET/MG

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 19:10 )*

EVANDRO CARRUSCA DE OLIVEIRA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DCTA (11.55.03)  
Matrícula: 2150490

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 19:15 )*

LILIA MARIA DE OLIVEIRA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DCTA (11.55.03)  
Matrícula: 1815815

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 17:19 )*

LUCIANA PEIXOTO AMARAL  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DCTA (11.55.03)  
Matrícula: 1808233

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>  
informando seu número: **8**, ano: **2025**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:  
**22/07/2025** e o código de verificação: **88883b9ede**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força, persistência e coragem durante esses anos na graduação.

À minha mãe e à minha irmã, por confiarem em mim e me darem o apoio e o suporte essenciais para a realização desse sonho.

À professora Dra. Luciana Peixoto Amaral, pela orientação, paciência e empenho dedicados a mim na execução deste trabalho.

Ao CEFET-MG por proporcionar experiências inesquecíveis e me capacitar para exercer a profissão que escolhi com o coração. Agradeço a todos os professores por compartilharem seus conhecimentos e por todas as conversas agradáveis que enriqueceram ainda mais a minha vivência acadêmica nesta instituição.

## RESUMO

DOMINGOS, DANIELA. **Hidrograma de ruptura como subsídio para análise do risco de rompimento da barragem do reservatório Serra Azul**. 2025. 62 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

O desenvolvimento de uma sociedade exige a criação de estruturas que atendam às necessidades da população, como as barragens. Estas exercem funções imprescindíveis ao bem-estar coletivo. Contudo, elas também são uma fonte de potenciais riscos de acidentes por rompimento, com poder de gerar danos sociais e ambientais consideráveis. Para evitar esse tipo de catástrofe a construção, operação e manutenção de barragens é regulada pelo poder público através da Política Nacional de Segurança de Barragens, que exige estudos e geração de dados sobre a situação de segurança das mesmas. A vazão de pico em caso de rompimento é uma informação básica para a realização dos estudos, podendo ser obtida através de fórmulas empíricas ou do software de modelagem hidrológica Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). O presente trabalho visa simular um evento de ruptura de barragem através de modelagem hidrológica, com a geração do hidrograma efluente de ruptura. Para o desenvolvimento do trabalho foi escolhido o reservatório Serra Azul, localizado no município de Mateus Leme. Simulou-se a ruptura da barragem por *piping*, além da estimativa da vazão de pico via modelagem hidrológica, bem como por meio de equações empíricas. Os resultados obtidos por ambos os métodos foram analisados e comparados. A vazão máxima efluente obtida no HEC-HMS foi de 21.920,0 m<sup>3</sup>/s, enquanto as equações forneceram valores muito distintos entre si e apenas a equação do Bureau of Reclamation, cuja vazão foi 23.682 m<sup>3</sup>/s, se aproximou do resultado obtido na modelagem computacional. Estimar a vazão de pico corretamente é essencial para o planejamento e execução de medidas preventivas e de mitigação, visto que o rompimento de uma barragem pode gerar perdas socioambientais irreparáveis.

Palavras-chave: Segurança de barragens. HEC-HMS. Hidrograma de ruptura.

## ABSTRACT

DOMINGOS, DANIELA. **Rupture hydrograph as a subsidy for analysis of the risk of rupture of the Serra Azul reservoir dam.** 2025. 62p. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

The development of a society requires the creation of structures that meet the needs of the population, such as dams. These perform functions essential to collective well-being. However, they also pose a potential risk of accidents due to dam failure, potentially causing considerable social and environmental damage. To prevent this type of catastrophe, the construction, operation, and maintenance of dams are regulated by the government through the National Dam Safety Policy, which requires studies and the generation of data on their safety status. Peak flow in the event of a dam failure is essential information for conducting these studies and can be obtained through empirical formulas or the hydrological modeling software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). This study aims to simulate a dam failure event through hydrological modeling, generating the effluent hydrograph of the dam failure. The Serra Azul reservoir, located in the municipality of Mateus Leme, was chosen for this study. The dam failure was simulated using piping, and peak flow was estimated using hydrological modeling and empirical equations. The results obtained by both methods were analyzed and compared. The maximum effluent flow rate obtained by the HEC-HMS was 21,920.0 m<sup>3</sup>/s, while the equations provided very different values. Only the Bureau of Reclamation equation, whose flow rate was 23,682 m<sup>3</sup>/s, came close to the result obtained through computer modeling. Accurately estimating peak flow is essential for planning and implementing preventive and mitigation measures, as a dam failure can generate irreparable social and environmental losses.

Keywords: Dam safety. HEC-HMS. Rupture hydrograph.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>   | <b>11</b> |
| 2.1 Objetivo Geral.....   | 11        |
| 2.2 Objetivos Específicos.....                                      | 11        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                 | <b>12</b> |
| 3.1 Barragens.....  | 12        |
| 3.2 Segurança de barragens.....                                     | 16        |
| 3.3 Formação de brechas de ruptura em barragens de terra.....       | 21        |
| 3.4 Modelagem hidrológica.....                                      | 33        |
| 3.5 Casos de rupturas de barragens no Brasil.....                   | 35        |
| 3.5.1 Barragem Lagoa do Nado.....                                   | 35        |
| 3.5.2 Barragem de Algodões.....                                     | 36        |
| 3.5.3 Represa do balneário municipal de Caarapó.....                | 37        |
| 3.6 Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).....              | 38        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                   | <b>40</b> |
| 4.1 Escolha e caracterização da área de estudo.....                 | 40        |
| 4.2 Coleta, tratamento e análise de dados.....                      | 43        |
| 4.3 Modelagem hidrológica.....                                      | 45        |
| 4.4 Estimativa de vazões de pico através de fórmulas empíricas..... | 48        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                               | <b>49</b> |
| 5.1 Modelagem hidrológica através de HEC-HMS.....                   | 49        |
| 5.2 Resultados obtidos através das equações empíricas.....          | 51        |
| 5.3 Comparação entre as vazões de pico.....                         | 52        |
| <b>6 CONCLUSÕES.....</b>  | <b>54</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>55</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1 - Principais estruturas de uma barragem de terra.....                                  | 13 |
| Figura 3.2 - Seção típica de barragem de terra homogênea, barragem de Ponte Nova - SP....         | 13 |
| Figura 3.3 - Barragem de seção mista ou zonada. Barragem de Três Marias - MG.....                 | 14 |
| Figura 3.4 - Seção típica de barragem de terra-enrocamento.....                                   | 15 |
| Figura 3.5 - Barragem de alvenaria do Açude Cedro no Ceará.....                                   | 15 |
| Figura 3.6 - Evolução do cadastro de barragens e verificação quanto ao enquadramento na PNSB..... | 17 |
| Figura 3.7 - Principais usos das barragens cadastradas.....                                       | 18 |
| Figura 3.8 - Usos principais das barragens enquadradas na PNSB.....                               | 19 |
| Figura 3.9 - Barragens enquadradas na PNSB por tipo de material do maciço.....                    | 20 |
| Figura 3.10 - Formação de brecha por overtopping.....   | 22 |
| Figura 3.11 - Formação de brecha por piping.....  | 22 |
| Figura 3.12 - Parâmetros de brecha de ruptura de barragens.....                                   | 23 |
| Figura 3.13 - Esquema da largura de fundo da brecha.....  | 24 |
| Figura 3.14 - Esquema declividade da parede lateral da brecha.....                                | 24 |
| Figura 3.15 - Fases de formação da brecha de ruptura por erosão interna ou piping.....            | 25 |
| Figura 3.16 - Hidrograma de decaimento parabólico.....  | 33 |
| Figura 3.17 - Barragem Lagoa do Nado após o rompimento.....                                       | 35 |
| Figura 3.18 - Barragem da Lagoa do Nado rompida.....  | 35 |
| Figura 3.19 - Barragem de Algodões 1 com erosão dias antes do rompimento.....                     | 36 |
| Figura 3.20 - Barragem Algodões 1 após o rompimento.....  | 37 |
| Figura 3.21 - Represa do balneário de Caarapó rompida.....  | 37 |
| Figura 3.22 - Sistema de abastecimento de água da RMBH.....                                       | 39 |
| Figura 3.23 - Reservatórios do Sistema Paraopeba.....   | 39 |
| Figura 4.1 - Localização da Micro-bacia do Ribeirão Serra Azul.....                               | 41 |
| Figura 4.3 - Divisão político-administrativa de Mateus Leme.....                                  | 42 |
| Figura 4.4 - Ocupação na vizinhança do reservatório.....  | 42 |
| Figura 4.5 - Dados de entrada do reservatório.....  | 45 |
| Figura 4.6 - Dados de entrada do Dam Break.....   | 46 |
| Figura 4.7 - Dados de entrada do componente Meteorologic Model.....                               | 46 |
| Figura 4.8 - Dados de entrada do componente Control Specification.....                            | 47 |
| Figura 4.9 - Dados de entrada do componente Paired Data - Curva Cota x Volume.....                | 47 |
| Figura 4.10 - Comandos para gerar o hidrograma de ruptura.....                                    | 48 |
| Figura 5.1 - Hidrograma de ruptura do reservatório Serra Azul.....                                | 49 |
| Figura 5.2 - Tempo do primeiro pico de vazão.....   | 50 |
| Figura 5.3 - Tempo do segundo pico de vazão.....  | 51 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Dados usados para calcular os parâmetros da brecha através das equações empíricas..... | 43 |
| Tabela 4.2 - Dados usados para calcular as vazões de pico através das equações empíricas...         | 44 |
| Tabela 4.3 - Dados de entrada do modelo hidrológico HEC-HMS, referente à ruptura da barragem.....   | 44 |
| Tabela 4.4 - Fórmulas empíricas para calcular as vazões de pico.....                                | 48 |
| Tabela 5.1 - Largura média e tempo de ruptura da brecha obtidas por fórmulas empíricas....          | 52 |
| Tabela 5.1 - Vazões de pico obtidas por fórmulas empíricas.....                                     | 52 |

# 1 INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas de engenharia para diversos fins, tais como armazenamento de água para abastecimento de água ou contenção de rejeitos industriais. Nos casos de barragens que armazenam água, a disponibilidade contínua dos recursos hídricos é um importante subsídio que favorece o desenvolvimento da sociedade ao possibilitar por exemplo, a geração de energia elétrica e a possibilidade de lazer. As barragens podem ser construídas de terra, enrocamento ou concreto, sendo as de terra as mais comuns devido à disponibilidade local de materiais, o que reduz os custos de construção, tornando-as mais econômicas e ainda assim tecnologicamente adequadas (REYNOLDS, 2013).

As barragens de terra são as mais simples, sendo, portanto, menos exigentes quanto ao tipo de fundação, que vai de rocha compacta até terrenos construídos de materiais inconsolidados. As barragens são geralmente associadas a um elevado potencial de risco devido às consequências catastróficas para o meio ambiente e possibilidade de perda de vidas, em caso de um colapso. Em Minas Gerais houveram duas tragédias envolvendo barragens de rejeitos, que foram o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana em 2016 e da barragem da Mina do Feijão, em Brumadinho, em 2019 (AMARAL, 2019).

Os reservatórios de água para abastecimento humano, tem como função regularizar a vazão, o que é um fator importante para a segurança hídrica do sistema, mas também oferecem riscos de acidentes, expondo a sociedade e o meio ambiente a possíveis perdas e prejuízos oriundos de rompimentos. Ferramentas de modelagem hidráulico-hidrológica, como Hydrologic Modeling System HEC-HMS e River Analysis System HEC-RAS, são essenciais para avaliar o potencial desses possíveis acidentes e prevenir ou minimizar eventuais desastres (EUA, 2025).

Galgamento, *piping*, falhas de projeto e dimensionamento inadequado do vertedouro são as causas mais comuns de rompimento de barragens. A erosão interna ou *piping* compromete a estabilidade da infraestrutura do maciço e do sistema de drenagem (GOMES, 2019).

O rompimento de uma barragem é caracterizado pela formação de uma brecha no maciço por onde o líquido retido no reservatório escoar. Para prevenir acidentes, a realização de estudos de segurança é fundamental. A etapa inicial destes estudos envolve o conhecimento da vazão efluente da brecha, fornecida pelo hidrograma de ruptura, que depende de fatores como o hidrograma afluente ao reservatório, volume do reservatório, tipo da barragem, tipo de falha,

localização da brecha no maciço, geometria da brecha, susceptibilidade à erosão do maciço, vazão de pico e tempo de formação da brecha (VIEIRA et. *al.*, 2020).

O hidrograma representa o volume de água que escoar pela brecha ao longo do tempo, logo fornece a informação inicial e essencial que é a vazão de pico e o tempo de escoamento. Essas informações servem como subsídio para as etapas seguintes dos estudos de segurança, em que serão identificadas as áreas potencialmente inundáveis. Através de sistemas de informação geográfica e modelagem hidrológica, a simulação de um evento de ruptura permite gerar mapas das prováveis áreas de inundação e a avaliação dos riscos associados ao rompimento servirá de base para o planejamento de ações emergenciais como a definição de rotas de fuga, de pontos de encontro, os meios de comunicação com a população, dentre outros (A BHARATH et. *al.*, 2021).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo gerar um hidrograma de ruptura do reservatório Serra Azul, como uma etapa básica dos estudos de segurança desta barragem, utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS e, além disso, também visa obter a vazão de pico através de equações empíricas disponíveis na literatura, comumente utilizadas em estudos de segurança de barragens e comparar os resultados com os obtidos pelo HEC-HMS.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Gerar o hidrograma de ruptura da barragem Serra Azul, por meio de simulação hidrológica no HEC-HMS, fornecendo subsídios à geração de manchas de inundação, com base em modelos hidráulicos e sistema de informação geográfica, de forma a analisar os potenciais impactos e áreas impactadas com o rompimento do reservatório.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterização do reservatório Serra Azul e seu entorno
- Definição do cenário de simulação
- Estimativa dos parâmetros de formação da brecha
- Simulação hidrológica para geração de hidrograma de ruptura
- Cálculo da vazão de pico através de equações empíricas reportadas na literatura;
- Comparação das vazões de pico obtidas pelo modelo hidrológico e pelas equações empíricas

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Barragens

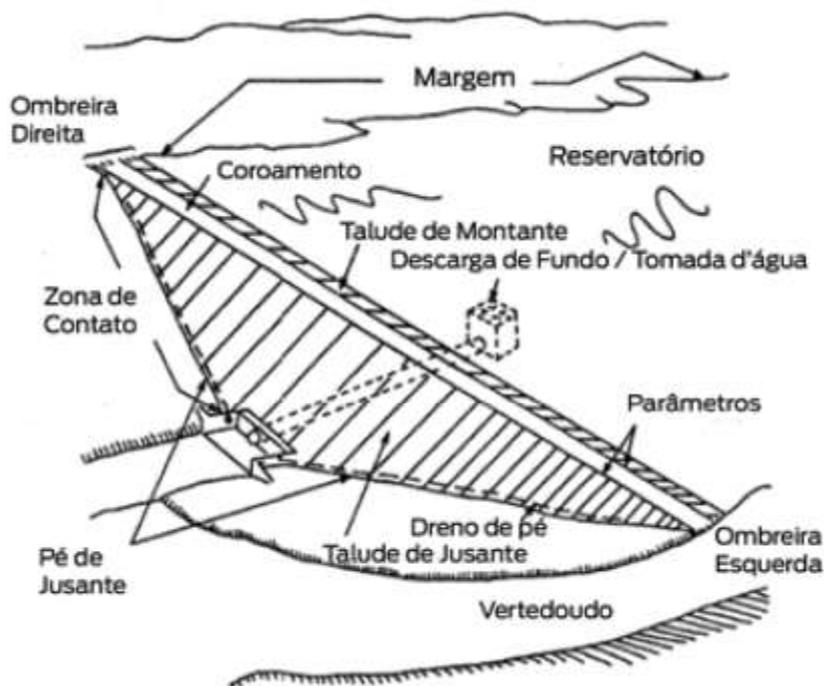
O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) define barragem como:

“toda 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”.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2016) identifica como principais componentes de uma barragem as estruturas de retenção ou barramento, a fundação, as ombreiras direita e esquerda, a zona vizinha a jusante, as estruturas extravasoras, as estruturas de adução e o reservatório.

Marques (2023) explica que a área da seção transversal do barramento geralmente é trapezoidal, a parte superior é chamada de coroamento ou crista, o lado do barramento em contato com a água é o talude de montante e o lado oposto à água é o talude de jusante, conforme apresentados na Figura 3.1. Além dessas, há as estruturas de segurança ou extravasores cuja função é prevenir o transbordamento liberando de forma controlada a água excedente. As mais comuns são a soleira livre, que é uma abertura na parte superior da barragem por onde a água escoar, os canais extravasores construídos ao redor da barragem, os tubos extravasores, que são tubulações instaladas no corpo do maciço ou ainda comportas e válvulas de controle para regularizar a vazão. Vale a pena ressaltar que o tipo de extravasor depende das características da barragem e das condições hidrológicas da região. É importante salientar que a altura do barramento determina a capacidade de armazenamento do reservatório e a topografia do terreno determina a área de inundação.

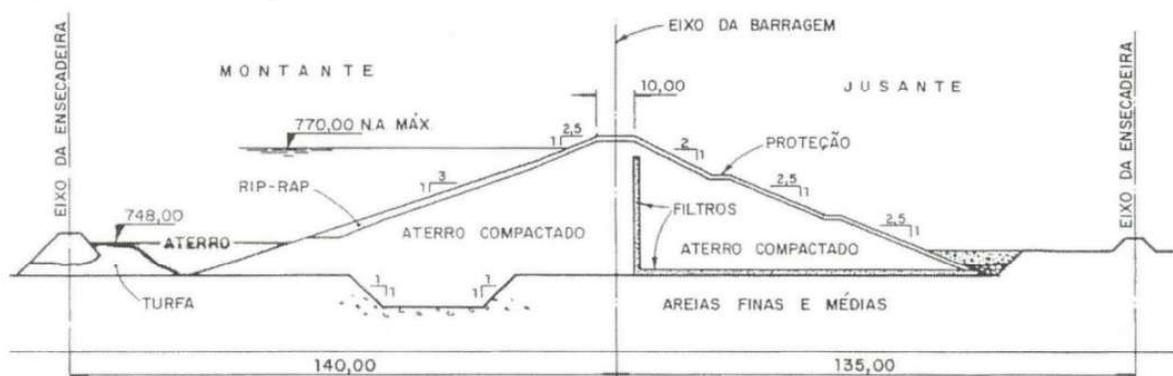
**Figura 3.1** - Principais estruturas de uma barragem de terra.



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2016).

As barragens podem ser construídas de terra, terra-enrocamento ou concreto. As barragens de terra podem ser do tipo homogênea ou zonada. Na Figura 3.2 é apresentado o esquema da barragem de terra homogênea Ponte Nova, em São Paulo. Entretanto, para que este tipo de estrutura seja tecnicamente viável é necessário utilizar solos com propriedades parecidas, o que as torna menos utilizadas, devido à dificuldade de se encontrar solos de características semelhantes (ANA, 2014).

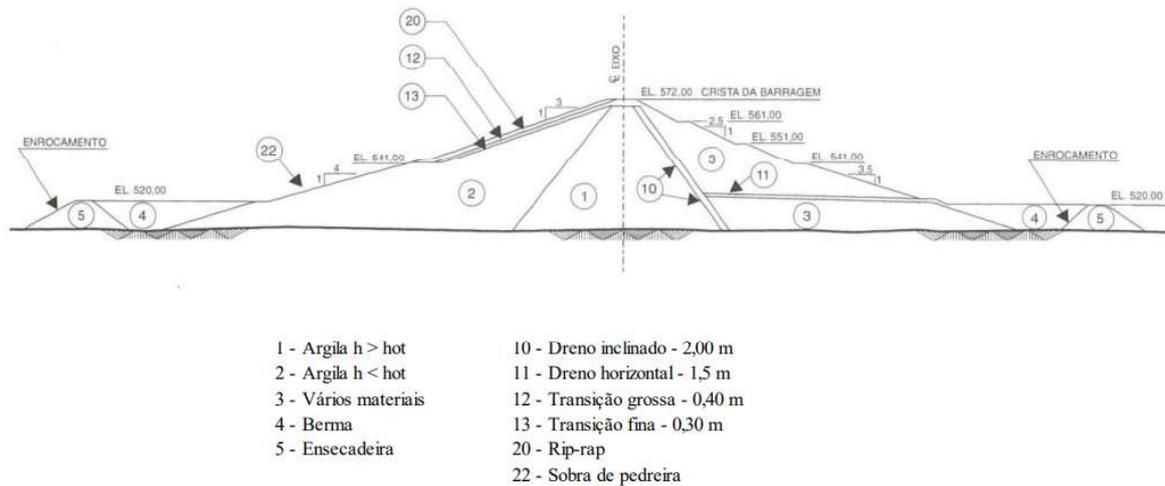
**Figura 3.2** - Seção típica de barragem de terra homogênea, barragem de Ponte Nova - SP.



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2014).

As barragens de terra de seção mista ou zonada (Figura 3.3) permitem que solos de diferentes tipos sejam utilizados. A depender das propriedades particulares do tipo de solo disponível, o material será depositado em zonas ou áreas específicas do maciço. Logo, os materiais mais permeáveis são utilizados nos espaldares e os menos permeáveis no centro do maciço, que apresenta a seção transversal da barragem de Três Marias em Minas Gerais (ANA, 2014).

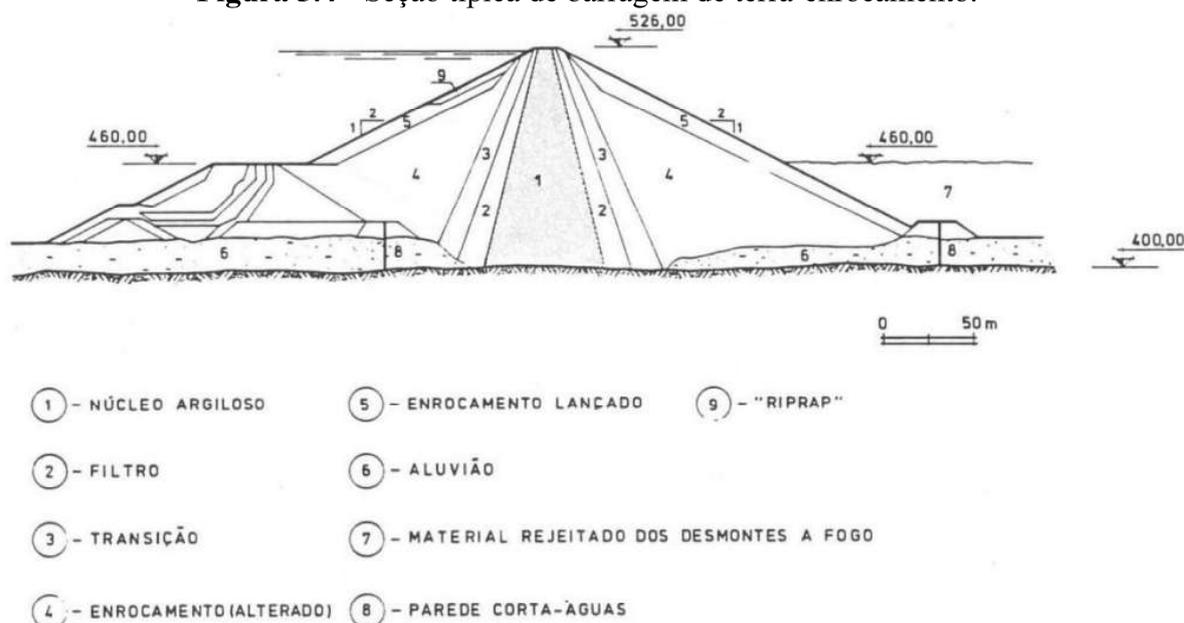
**Figura 3.3** - Barragem de seção mista ou zonada. Barragem de Três Marias - MG.



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2014).

As barragens de terra-enrocamento (Figura 3.4), em comparação com as barragens apenas de terra, apresentam taludes mais inclinados, o que propicia menor volume de material, resultando em obras mais compactas. Porém, só podem ser construídas se houver disponibilidade de enrocamento próximo à obra e as fundações serem de boa resistência. A distribuição dos materiais nas seções deve garantir a melhor compatibilização de deformações entre o núcleo, as transições e enrocamento dos espaldares, ou seja, as deformações esperadas na estrutura da barragem devem ser compatíveis com a capacidade de deformação da fundação e com as tensões admissíveis nos materiais para que a barragem se comporte de maneira estável e segura sem deformações excessivas que possam comprometer sua integridade (ANA, 2014).

**Figura 3.4** - Seção típica de barragem de terra-enrocamento.



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2014).

As barragens de concreto (Figura 3.5) podem ser feitas totalmente em concreto simples, convencional ou compactado, ou concreto armado. Este tipo de estrutura exige que exista rocha sã ao longo do eixo, por exercer maiores pressões nas fundações e nas paredes do vale, assim, a base de sustentação da barragem deve ser o mais resistente possível (ANA, 2016).

**Figura 3.5** - Barragem de alvenaria do Açude Cedro no Ceará.



Fonte: Alfano (2022).

### 3.2 Segurança de barragens

O desenvolvimento de uma população implica em aumento das áreas ocupadas por residências nos territórios municipais. Isso indica que mesmo que um reservatório tenha sido construído afastado da mancha urbana, ao longo do tempo, pode ocorrer a ocupação de áreas próximas do barramento e conseqüentemente construção de vias de tráfego, equipamentos públicos, etc. Portanto, a questão de segurança de barragens deve ser considerada, a fim de evitar ou minimizar potenciais prejuízos socioambientais e econômicos que podem se originar de um acidente (JESUS, 2021).

Para evitar desastres desse tipo de acidente, o Plano de Segurança da Barragem é fundamental. Sendo um instrumento da Lei nº 12.334/2010, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), ele contém informações técnicas sobre a construção, operação, manutenção e situação de segurança. Tais dados são obtidos a partir de estudos e monitoramentos realizados periodicamente (ANA, 2025).

A PNSB considera como barragens as estruturas que possuem ao menos uma das seguintes características (BRASIL, 2010):

- 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 metros;
- capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>;
- categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas; ou
- categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador.

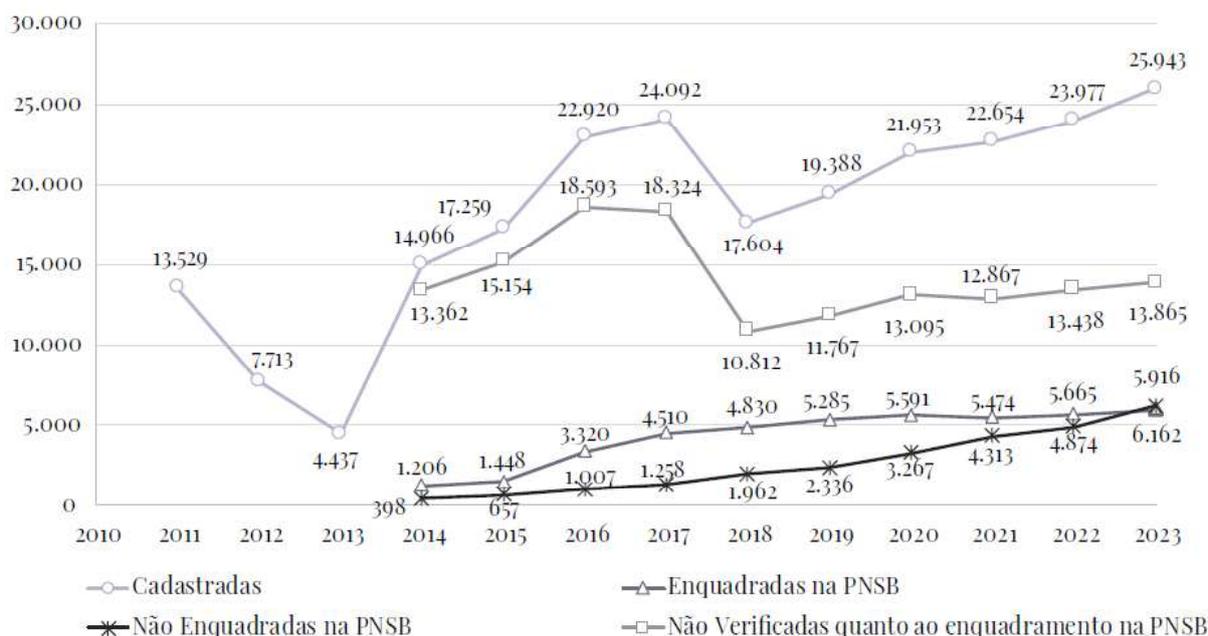
A Lei nº 12.334/2010 também traz as seguintes definições:

- Reservatório: acumulação não natural de água, de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos;
- Barragem: 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;

- Segurança de barragem: condição que visa a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente;
- Gestão de risco: ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos;
- Mapa de inundação: produto do estudo de inundação que compreende a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por eventual vazamento ou ruptura da barragem e seus possíveis cenários associados e que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas por essa situação;
- Acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrollável do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa.

O Relatório Anual de Segurança de Barragens em 2023 registrou a evolução do cadastramento e da classificação de barragens no país desde 2010. Conforme apresentado na Figura 3.6, observa-se um aumento significativo no cadastro. É necessário salientar que nem toda barragem cadastrada se enquadra na PNSB, o que explica o número maior de barragens cadastradas, em relação às enquadradas e às não enquadradas (SNISB. 2023).

**Figura 3.6 - Evolução do cadastro de barragens e verificação quanto ao enquadramento na PNSB.**

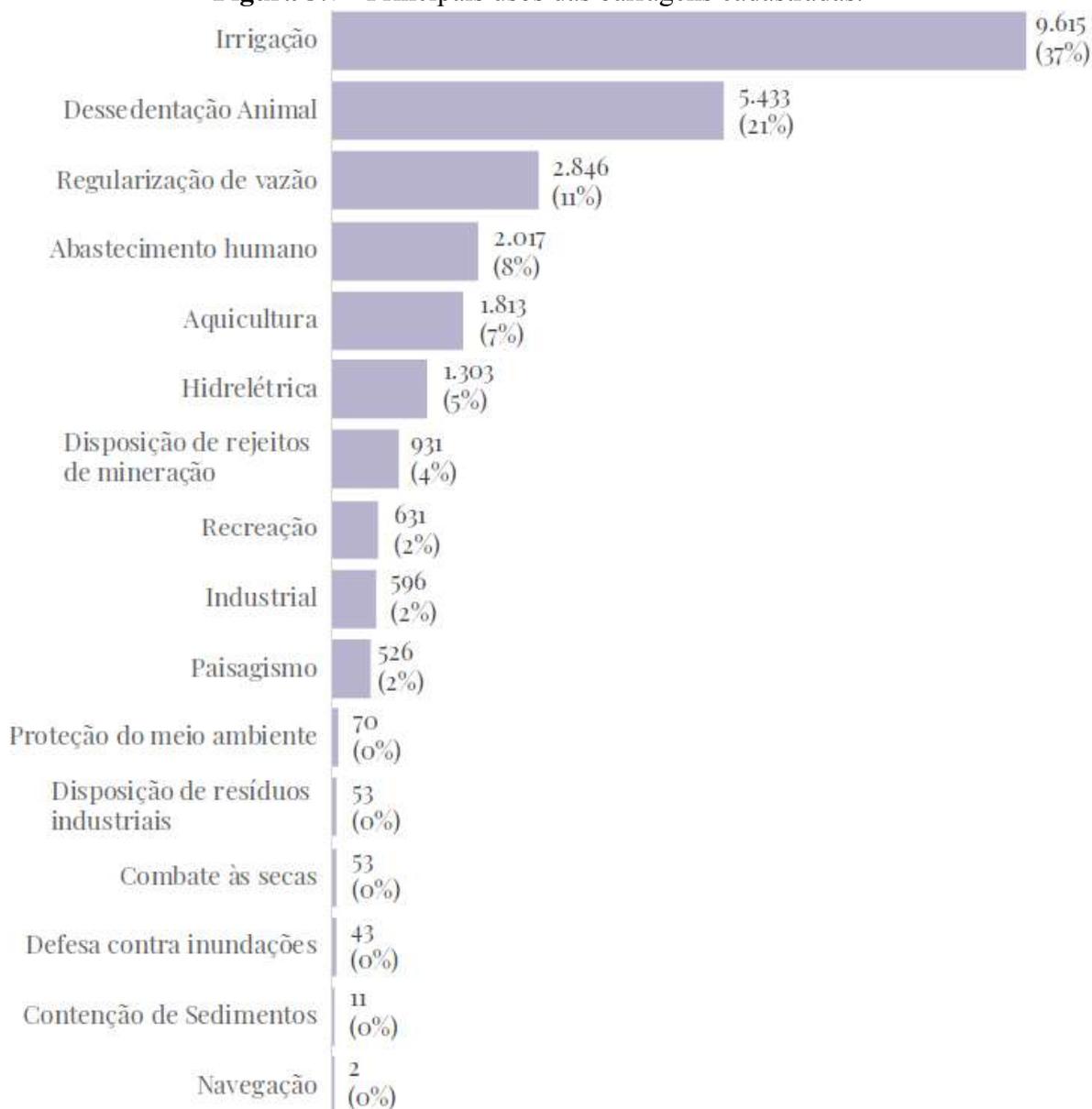


Fonte: Adaptado de SNISB (2023).

Em relação aos principais usos, o relatório aponta que 9.615 (37%) das barragens são destinadas à irrigação, 5.433 (21%) à dessedentação animal, 2.846 (11%) à regularização de

vazão, 2.017 (8%) ao abastecimento humano de água, 1.813 (7%) à aquicultura, 1.303 (5%) à geração de energia elétrica, 931 (4%) à disposição de rejeitos de mineração, 596 (2%) ao uso industrial, 631 (2%) à recreação, 526 (2%) paisagismo e 232 (1%) para outros usos, o que pode ser observado na Figura 3.7 (SNISB, 2023).

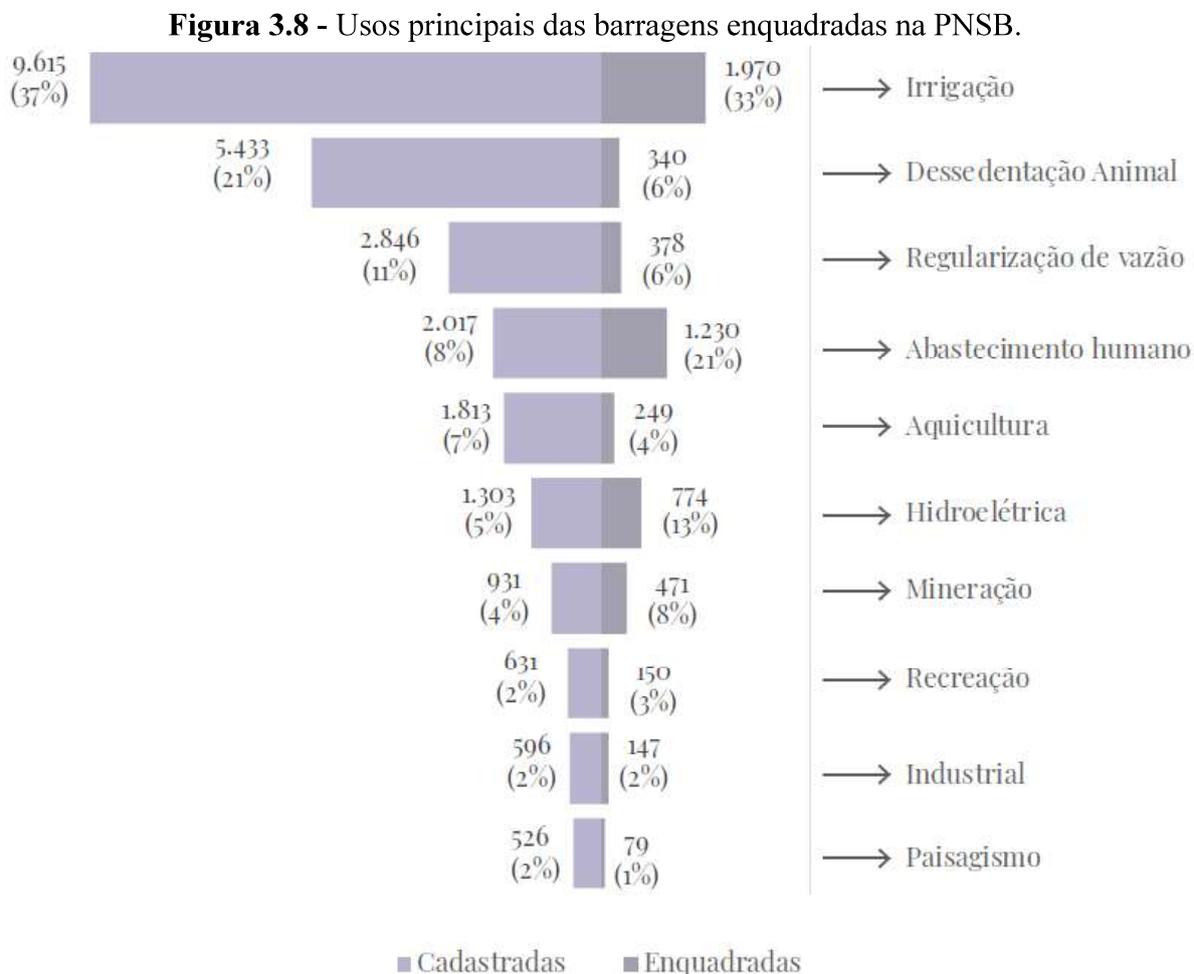
**Figura 3.7 - Principais usos das barragens cadastradas.**



Fonte: Adaptado de SNISB (2023).

SNISB (2023) informa que 13.865 barragens, o equivalente a 53 % do total cadastrado, não apresentaram informações suficientes, inviabilizando a verificação quanto ao enquadramento na PNSB. Já em relação às barragens enquadradas, o estudo mostra que determinados setores se destacam, como por exemplo, o setor de geração de energia hidrelétrica, que corresponde a 5% das barragens cadastradas e 13% das barragens enquadradas, o que pode ser observado na

Figura 3.8. O total de barragens enquadradas na PNSB é de 5.916, sendo 5.399 de acumulação de água para diversos fins e 517 de acumulação de rejeitos de mineração e resíduos industriais.



Fonte: Adaptado de SNISB (2023).

Um conceito relevante é o Dano Potencial Associado à barragem (DPA). A PNSB o define como:

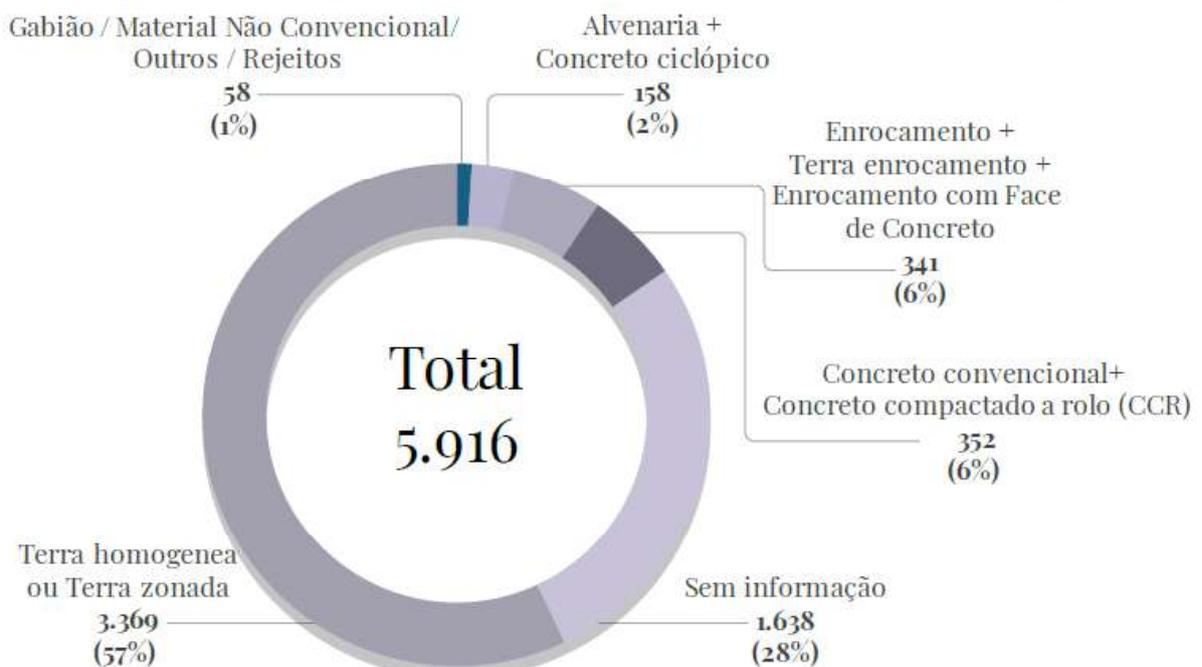
“dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais”

Assim, o DPA é classificado como baixo, médio ou alto. Do total de barragens enquadradas na PNSB, 5.581 (99%) têm classificação de DPA. Destas, 5.178 (88%) tem DPA médio ou alto e 403 (7%) têm DPA baixo. 335 barragens (6%) não foram classificadas nesta categoria.

O Relatório de Segurança de barragens 2023 também apresenta a classificação de categorias de risco (CRI), onde são analisados os aspectos que influenciam a possibilidade de ocorrência de um desastre, cuja classificação pode ser baixa, média ou alta. A CRI é avaliada quanto às características técnicas da barragem, ao estado de conservação da barragem e ao atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Do total de barragens enquadradas na PNSB, 4.516 (76%) barragens estão classificadas no CRI, sendo 1.692 (29%) com CRI alto, 2.791 barragens (47%) com CRI médio ou baixo, em 33 barragens (1%) a categoria não se aplica e 1.400 barragens (24%) não foram classificadas quanto ao CRI. O DPA e o CRI podem ser analisados em conjunto para uma melhor representação da situação de segurança das barragens, sendo desejável que ambas as classificações estejam em nível baixo. Assim, as barragens cujos DPA e CRI são altos representam maior risco à sociedade (SNISB, 2023).

Ainda de acordo com SNISB (2023), a porcentagem de barragens por tipo de material pode ser observada na Figura 3.9, onde 57% das barragens submetidas à PNSB foram construídas em terra, 6% em concreto convencional ou CCR, 6% em terra-enrocamento e 28% das barragens não informou o tipo de material usado na construção. Essa precariedade de informações é um desafio considerável ao poder público para realizar uma gestão mais eficiente da segurança de barragens no país (SNISB, 2023).

**Figura 3.9 - Barragens enquadradas na PNSB por tipo de material do maciço.**



Fonte: Adaptado de SNISB (2023).

### 3.3 Formação de brechas de ruptura em barragens de terra

A Association of State Dam Safety Officials (2025) afirma que em um estudo realizado nos Estados Unidos da América, as cinco causas mais comuns de acidentes em barragens são:

- Galgamento: transbordamento de água da parte superior da barragem. Nos Estados Unidos da América, cerca de 34% dos rompimentos de barragem ocorrem por galgamento oriundo de projeto inadequado ou obstrução de vertedouros, ou recalque da crista da barragem;
- Perfuração por tubulação (*piping*): erosão interna causada por infiltração no maciço, que cria caminhos por onde a água escoar até desestabilizar o aterro, culminando em rompimento. É comum ocorrer ao redor das estruturas hidráulicas como tubulações e vertedouros, também em rachaduras na barragem e na fundação, e, até mesmo em tocas de animais e raízes de vegetação lenhosa. É causa de aproximadamente 20% dos acidentes com barragens nos EUA.
- Os defeitos na fundação correspondem a cerca de 30% dos acidentes.
- Em menor grau a falta de manutenção e de práticas de boa conservação e rachaduras causadas por recalque natural também contribuem para a ocorrência de acidentes.

Imbrogno (2014) explica que a maioria das falhas e incidentes em barragens podem ser como resultado de um único fator potencial ou de uma combinação de fatores, acrescentando ainda às causas mais comuns:

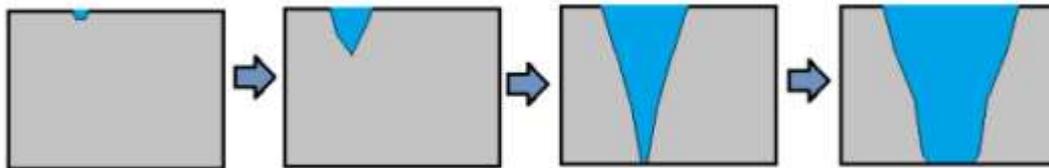
- Projeto inadequado de vertedouro: é o resultado de práticas de engenharia inadequadas. Não é raro vertedouros de barragens de baixo risco serem projetados com capacidade reduzida ocasionando transbordamento durante chuvas intensas.
- Instabilidade de talude ou estrutural: pode ser causada por diversas deficiências nos componentes da barragem. Encostas íngremes, infiltração, baixa capacidade de coesão do material e manutenção inadequada podem ser fatores contribuintes.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2012) considera que a ruptura por *piping* pode ocorrer por falhas estruturais na barragem que favorecem infiltrações erodindo o maciço, ou mesmo pela má compactação do maciço, que cria caminho para a água passar causando a erosão do material. Já a ruptura por galgamento ou *overtopping*, também conhecida como ruptura hidrológica, depende da ocorrência de precipitação excessiva, que

eleva o nível de água do reservatório até que ele esteja mais alto que a cota da crista da barragem. Logo, o volume de água superior à capacidade do vertedouro, arrasta o material ao ponto de ocorrer uma ruptura.

O galgamento ou *overtopping* (Figura 3.10) se inicia em um ponto mais fraco no coroamento do maciço, onde a água arrasta o material mais superficial gerando uma brecha em forma de “V”, que se aprofunda e se alarga culminando em ruptura (FARIA e REIS, 2017).

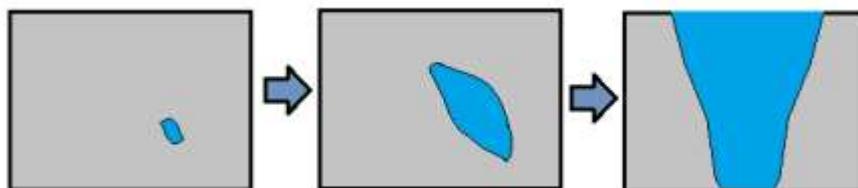
**Figura 3.10** - Formação de brecha por *overtopping*.



Fonte: Adaptado de Faria e Reis (2017).

O *piping* é a ocorrência de erosão interna da massa de solo, que cria uma abertura progressiva de canais ou tubulações dentro do maciço. O processo erosivo provoca a remoção de partículas do interior do solo ou da estrutura, formando "tubos" vazios que resultam em colapsos e escorregamentos do terreno. O grau de compactação do solo, o adequado dimensionamento do sistema de drenagem interna do maciço e o monitoramento de parâmetros geotécnicos são cruciais para evitar o processo de formação de *piping* em barragens de terra. Na Figura 3.11 é mostrado o processo de formação do *piping*, que se inicia com a formação do tubo concentrado no maciço, cuja área da seção transversal aumenta até a formação da brecha e ruptura da barragem (FARIA e REIS, 2017).

**Figura 3.11** - Formação de brecha por *piping*.

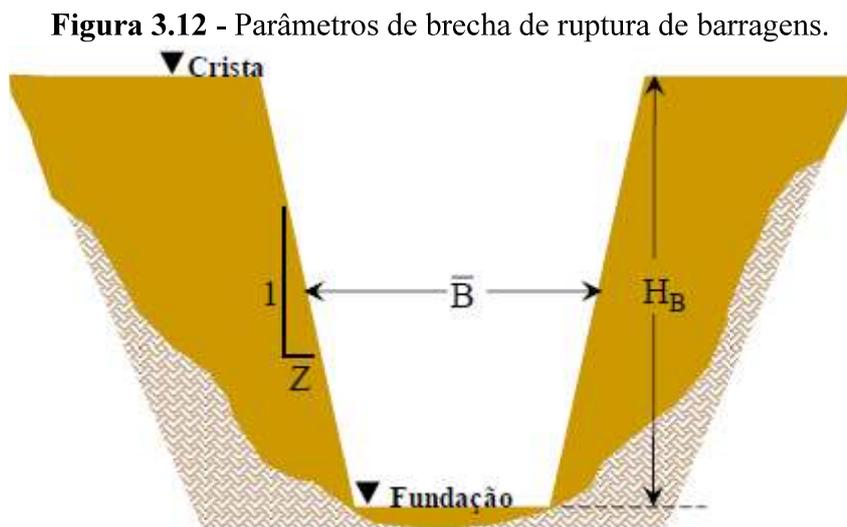


Fonte: Adaptado de Faria e Reis (2017).

Quando a infiltração de água causa erosão no maciço ou na fundação, a redução da capacidade coesiva do material causa instabilidade no talude chegando ao ponto de ocorrer até deslizamentos. A erosão geralmente começa na porção a jusante da barragem crescendo em direção à montante. O canal formado ou *piping* surge aonde o material tem maior permeabilidade. Dependendo do nível e da localização, a erosão pode ser bastante difícil de ser detectada e, às vezes, a erosão só será identificada muitos anos após a construção da

barragem. Quando os tubos ocorrem no núcleo do aterro são um grande problema, principalmente se estiverem abaixo do nível médio do reservatório. Algumas formas de evitar o surgimento deles são o sistema de drenagem interna, núcleos impermeáveis e mantas impermeáveis de fundo do reservatório a montante (IMBROGNO, 2014).

A formação de brechas é um ponto chave no estudo de segurança de barragens. Brecha de ruptura é uma abertura formada em uma estrutura de contenção, oriunda de processo erosivo ou de instabilização do maciço, como resultado de um processo de falha, onde o material compactado na estrutura é progressivamente arrastado, até que o processo seja irreversível. São apresentados na Figura 3.12 a extensão vertical ( $H_B$ ), a distância entre as paredes da brecha na altura média ( $B$ ), a fundação ou largura de fundo ( $L_{bf}$ ) e a razão de alargamento da brecha ao longo da altura ( $Z$ ), que são alguns parâmetros essenciais para os estudos de formação de brechas (SILVA, 2021).



Fonte: Adaptado de Silva (2021).

Os parâmetros essenciais para os estudos de formação de brechas em barragens são:

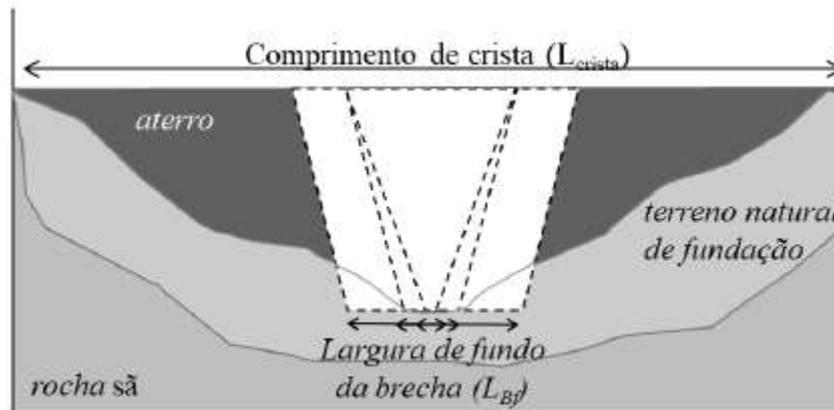
a)  $H_B$  é a extensão vertical da brecha, é a distância entre a crista e a fundação. É importante destacar que a altura da brecha varia de acordo com a resistência do material à erosão, portanto, quanto mais o material for susceptível à erosão, maior é a altura da brecha;

b)  $B$  é a distância entre as paredes da brecha na altura média. O limite máximo para largura é a distância entre as ombreiras. Embora o terreno natural seja mais resistente à erosão do que o maciço, considera-se o limite físico de erosão a superfície da rocha sã nas ombreiras da

barragem, pois não se pode ignorar o potencial erosivo do terreno natural. Cabe ressaltar que a partir da largura é possível estimar a taxa de abertura da brecha.

c) Largura de Fundo ( $L_{bf}$ ) é a distância entre as laterais da brecha na cota mais baixa (Figura 3.13), como um dos parâmetros de referência para estimar as vazões que escoam pela brecha (SILVA, 2021).

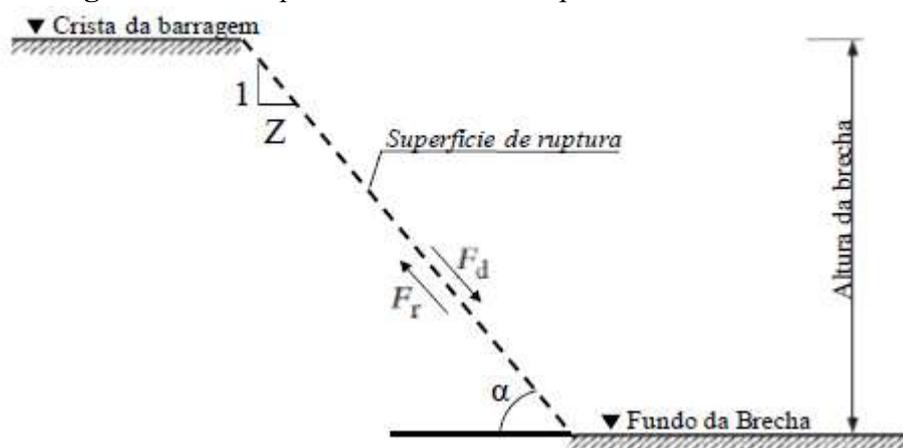
**Figura 3.13** - Esquema da largura de fundo da brecha.



Fonte: Adaptado de Silva (2021).

d)  $Z$  é a razão de alargamento da brecha ao longo da altura, o que define o formato final como trapezoidal, retangular ou triangular. A declividade da parede lateral é determinada pela capacidade coesiva dos materiais. Normalmente, os ângulos de inclinação entre  $50^\circ$  e  $85^\circ$  ( $Z$  entre 0,84 e 0,09) são viáveis, já os ângulos de  $45^\circ$  e  $90^\circ$  ( $Z$  iguais a 1 e 0 respectivamente) são considerados extremos. A representação esquemática da declividade da parede lateral é mostrada na Figura 3.14 (SILVA, 2021).

**Figura 3.14** - Esquema declividade da parede lateral da brecha.



Fonte: Adaptado de Silva (2021).

O tempo de desenvolvimento das causas da ruptura não é incluso no tempo de formação da brecha. Logo, a contagem de tempo se inicia apenas após a identificação de um processo irreversível de ruptura. Por exemplo, nos casos de *piping*, não se considera o tempo de desenvolvimento da erosão tubular. A contagem só é iniciada depois que o *piping* está formado e o fluxo entre o reservatório e o talude de jusante da barragem já está estabelecido, o que caracteriza um processo irreversível. No processo de formação de brechas (Figura 3.15) é comum considerar a ocorrência de cinco fases distintas, a saber: iniciação, progressão, transição, formação e finalização. Porém, nos casos de *piping*, considera-se que a formação ocorre em quatro fases: iniciação, continuação da erosão, progressão para formar o tubo e formação da brecha (SILVA, 2021).

**Figura 3.15** - Fases de formação da brecha de ruptura por erosão interna ou *piping*.



a) iniciação; b) continuação da erosão; c) progressão para formar tubo; d) formação da brecha  
Fonte: Adaptado de Silva (2021).

Com a formação da brecha e a ruptura da barragem, a água armazenada no reservatório escoar. Carvalho et al. (2024) afirma que durante o tempo de escoamento ocorre um momento em que a vazão de saída é máxima. Esta é a chamada vazão de pico, que ocorre durante o rompimento de barragens e pode ser determinada através das características geométricas e do tempo de formação das brechas.

Na literatura são apresentadas várias equações matemáticas empíricas para determinar os parâmetros da brecha. Essas equações de regressão, desenvolvidas em estudos de barragens de terra, de terra zonada e de enrocamento (USACE, 2025) são descritas a seguir.

- Bureau of Reclamation (1988) apud Almeida (2023)

A equação para largura média da brecha é

$$B_b = 3H_w \quad \text{Equação 3.1}$$

A equação para calcular o tempo de ruptura é

$$T_f = 0,011B_b \quad \text{Equação 3.2}$$

- Von Thun e Gillette (1990):

Foram utilizadas 57 barragens para desenvolver a metodologia. O método propõe a utilização de declives laterais de ruptura de 1,0H:1,0V, exceto para barragens com solos coesivos, onde os declives laterais devem ser da ordem de 0,5H:1V a 0,33H:1V. As alturas das barragens estavam entre 3,66 e 92,96 m com 89% < 30 m e 75% < 15 m. Os volumes de água no momento da ruptura entre 0,027 e 660,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> com 89% < 25,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> e 84% < 15,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup>.

A equação de Von Thun e Gillette para a largura média da brecha é:

$$B_{umve} = 2.5 h_c + C_b \quad \text{Equação 3.3}$$

Em que:

$B_{umve}$  é a largura média da violação (m);

$h_c$  é a profundidade da água acima do fundo da brecha (m);

$C_b$  é o coeficiente em função do tamanho do reservatório, de acordo com o Quadro 3.1.

**Quadro 3.1** - Coeficiente em função do tamanho do reservatório.

| Volume reservatório m <sup>3</sup>          | Cb, metros | Volume reservatório, acre-pés | Cb, pés |
|---|------------|-------------------------------|---------|
| < 1,23*10 <sup>6</sup>                      | 6,1        | < 1.000                       | 20      |
| 1,23*10 <sup>6</sup> - 6,17*10 <sup>6</sup> | 18,3       | 1.000 - 5.000                 | 60      |
| 6,17*10 <sup>6</sup> - 1,23*10 <sup>7</sup> | 42,7       | 5.000 - 10.000                | 140     |
| > 1,23*10 <sup>7</sup>                      | 54,9       | > 10.000                      | 180     |

Fonte: Adaptado de USACE (2025).

Esta metodologia consta de dois conjuntos diferentes de equações para o tempo de desenvolvimento da brecha. O primeiro conjunto de equações representa o tempo de desenvolvimento da brecha em função da profundidade da água acima do fundo da brecha, dado por:

$$t_f = 0.02h_c + 0.25 \text{ (erosão resistente)} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$t_f = 0.015 h_c \text{ (facilmente erodível)} \quad \text{Equação 3.5}$$

Em que:

$t_f$  é o tempo de formação da brecha (horas)

$h_c$  é a profundidade da água acima do fundo da brecha (m)

O segundo conjunto de equações descreve o tempo de desenvolvimento da brecha como uma função da profundidade da água acima do fundo da brecha e da largura média da brecha, dado por:

$$t_f = \frac{B_{umve}}{4hc} \text{ (erosão resistente)} \quad \text{Equação 3.6}$$

$$t_f = \frac{B_{umve}}{4hc + 61.0} \text{ (facilmente erodível)} \quad \text{Equação 3.7}$$

Em que  $B_{umve}$  é a largura média da brecha (em metros).

- Froehlich (1995a)

Foram utilizados 63 conjuntos de dados de terra, terra zonada, terra com parede central (ou seja, argila) e enrocamento para desenvolver um conjunto de equações para prever a largura

média da brecha, às inclinações laterais e o tempo de ruptura. As alturas das barragens estavam entre 3,66 e 92,96 m com 90% < 30 m e 76% < 15 m. Os volumes de água no momento da ruptura variaram entre 0,0130 – 660,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> com 87% < 25,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> e 76% < 15,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup>.

As equações para cálculo da largura média de brecha e do tempo de falha são:

$$B_{umve} = 0,1803K_0V_c^{0,32}h_b^{0,19} \quad \text{Equação 3.8}$$

$$t_f = 0,00254V_c^{0,53}h_b^{-0,90} \quad \text{Equação 3.9}$$

Em que:

$B_{umve}$  é a largura média da brecha (m);

$K_0$  é a constante 1,4 para falhas de galgamento e 1,0 para tubulação;

$V_c$  é o volume do reservatório no momento da falha (m<sup>3</sup>);

$h_b$  é a altura da brecha final (m);

$t_f$  é o tempo de formação da brecha (horas).

Assim, as inclinações laterais médias devem ser 1,4H:1V para falhas por galgamento 0,9H:1V para *piping*.

- Froehlich (2008)

As equações foram atualizadas usando como base 74 conjuntos de dados de terra, terra zonada, terra com parede central (ou seja, argila) e enrocamento para desenvolver um conjunto de equações para prever a largura média da ruptura, as inclinações laterais e o tempo de ruptura. As alturas das barragens estavam entre 3,05 e 92,96 m com 93% < 30 m e 81% < 15 m. Os volumes de água no momento da ruptura entre 0,0139 e 660,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> com 86% < 25,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> e 82% < 15,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup>.

As equações descritas por Froehlich (2008) para cálculo da largura média de brecha e do tempo de falha são:

$$B_{umve} = 0,27K_0V_c^{0,32}h_b^{0,04}$$

**Equação 3.10**

$$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_c}{gh_b^2}}$$

**Equação 3.11**

Em que:

$B_{umve}$  é a largura média da brecha (m);

$K_0$  é a constante 1,3 para falhas de galgamento e 1,0 para *piping*;

$V_c$  é o volume do reservatório no momento da falha (m<sup>3</sup>);

$g$  é a aceleração da gravidade 9,81 (m/s<sup>2</sup>);

$h_b$  é a altura da brecha final (m/s<sup>2</sup>);

$t_f$  é o tempo de formação da brecha (segundos).

Portanto, as inclinações laterais médias devem ser 1,0 H:1V para falhas por galgamento e 0,7 H:1V para *piping*.

- Xu e Zhang (2009)

Esta metodologia utilizou 182 barragens de terra e enrocamento dos Estados Unidos e da China, com quase 50% das barragens com mais de 15 metros de altura. Seu artigo mostra detalhes para 75 barragens que eram compostas de aterro homogêneo, barragens preenchidas por zona, barragens com paredes centrais e barragens com face de concreto. Sua equação final para a largura média da ruptura é baseada em 45 falhas de barragens, e sua equação para o tempo de falha é baseada em apenas 28 falhas de barragens. Os dados usados para a análise de regressão tinham os seguintes intervalos:

Altura das barragens: 3,2 – 92,96 m com 78% < 30 m e 58% < 15 m. Volume de água no momento da ruptura: 0,105 – 660,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> com 80% < 25,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup> e 67% < 15,0 m<sup>3</sup> x 10<sup>6</sup>.

A equação de regressão de Xu e Zhang (2009) para a largura média da brecha é dada por:

$$\frac{B_{umve}}{hb} = 0.787 \left( \frac{h_d}{h_r} \right)^{0.133} \left( \frac{V_c^{1/3}}{h_c} \right)^{0.652} e^I$$

**Equação 3.12**

Em que:

$B_{umve}$  é a largura média da violação (m);

$V_c$  é o volume do reservatório no momento da falha (m<sup>3</sup>);

$h_b$  é a altura da brecha final (m);

$h_d$  é a altura da barragem (m);

$h_r = 15$  (m) ( altura de referência para distinguir grandes barragens de pequenas);

$h_c$  é a altura da água acima da elevação do fundo da ruptura no momento da ruptura (m);

$B_3$ :  $b_3+b_4+b_5$  coeficiente função das propriedades da barragem

$b_3$ : -0,041, 0,026 e -0,226 para barragens com paredes centrais, barragens com revestimento de concreto e barragens homogêneas/de preenchimento zoneado, respectivamente.

$b_4$ : 0.149 -0.389 para galgamento e *piping* respectivamente;

$b_5$ : 0.291, -0.14 e -0.391 para alta, média e baixa erodibilidade da barragem respectivamente.

Xu e Zhang apud Amorim (2021) também apresentam uma equação para estimar o tempo de ruptura da brecha.

$$\frac{T_f}{T_r} = 0,304 \left( \frac{h_d}{h_r} \right)^{0.707} \left( \frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{0.508} e^{B_5}$$

**Equação 3.13**

Em que:

$T_f$  é o tempo de ruptura (h);

$T_r$  é o tempo de ruptura = 1 hora;

$B_5$ :  $b_9+b_{10}+b_{11}$  coeficiente função das propriedades da barragem;

$b_9$ : -0,327, -0,674 e -0,189 para barragens com núcleo central, barragens com talude concretado e barragens de terra respectivamente;

$b_{10}$ : -0,579 e -0,611 para galgamento e *piping* respectivamente;

$b_{11}$ : -1,205, -0,564 e 0,579 para alta, média e baixa erodibilidade respectivamente.

Com os valores de parâmetros de brecha é possível calcular a vazão de pico a partir das equações disponíveis na literatura apresentadas no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2** - Fórmulas matemáticas para determinar vazão de pico.

| AUTOR  | VAZÃO DE PICO   | CARACTERÍSTICA   |
|--|---|--|
| Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)                             | $Q_p = 7,683H_d^{1,909}$  | Equação baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa   |
| Hagen (1982)   | $Q_p = 1,205(H_dV)^{0,48}$  | Equação baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura  |
| Saint-Venant (-) apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)      | $Q_p = \frac{8}{27}B_d\sqrt{gY_{médio}^{\frac{3}{2}}}$  | Equação desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento   |
| Schoklistch (1917) apud ICOLD (1998)                           | $Q_p = \frac{8}{27}\left(\frac{B_d}{B_b}\right)^{1/2}B_b\sqrt{gY_{médio}^{\frac{3}{2}}}$                            | Equação considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem   |
| Bureau of Reclamation (1982) apud Bureau of Reclamation (1987) | $Q_p = 19H_d^{1,85}$  | Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da ruptura                     |
| Vertedor de Soleira Espessa (Singh, 1996)                      | $Q_p = 1,7B_bH_b^{3/2}$   | De acordo com Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor retangular de soleira espessa |
| Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)                      | $Q_p = 1,7B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[ \frac{1,94A_s}{(B_b\sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$ | Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t)  |

Fonte: Adaptado de Faria (2017).

Em que:

$Q_p$  = vazão máxima defluente da barragem em ruptura ( $m^3/s$ );

$V$  = volume máximo do reservatório para o nível de água máximo ( $m^3$ );

$A_s$  = área do reservatório para o nível de água máximo ( $m^2$ );

$B_d$  = largura da barragem (m);

$H_d$  = altura da barragem (m);

$B_b$  = largura final da brecha (m);

$H_b$  = altura final da brecha (m);

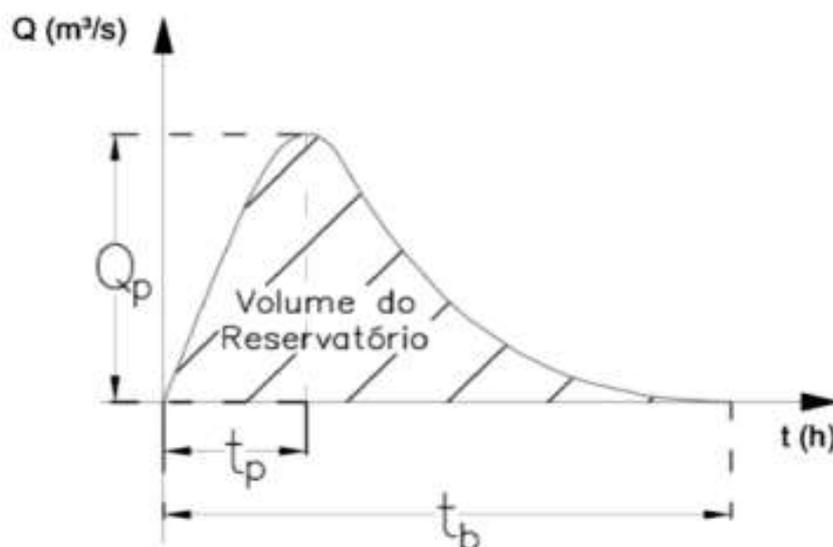
$Y_{médio}$  = profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m); e

$T_p$  = tempo para desenvolvimento da brecha (s).

Com o conhecimento das vazões efluentes, constrói-se um gráfico que representa a variação da vazão efluente no tempo (hidrograma de ruptura). Os estudos de ruptura de barragens envolvem diferentes etapas, sendo o hidrograma de ruptura, a primeira delas. As fases seguintes são a propagação, a geração de mapas de inundação e por último a elaboração de planos de contingências. A geração do hidrograma permite a identificação das áreas afetadas, através da simulação de uma ruptura hipotética, fornecendo dados como os tempos de chegada da onda de cheia, as velocidades e profundidades do escoamento (VIEIRA, 2020).

Faria e Reis (2017) afirmam que o hidrograma de ruptura deve fornecer a vazão efluente no momento da ruptura, baseado no tempo de formação e no formato da brecha. A partir da vazão de pico, tempo de pico e tempo de base, obtém-se o hidrograma de ruptura. O hidrograma com decaimento parabólico (Figura 3.16) apresenta o comportamento mais próximo da realidade, pois representa o tempo de esvaziamento de forma gradual, expressando melhor os eventos de ruptura ocorridos em barragens de terra.

**Figura 3.16** - Hidrograma de decaimento parabólico.



Fonte: Adaptado de Faria e Reis (2017).

Valle *et al.*, 2024 simularam o rompimento de uma barragem de água de pequeno porte na região metropolitana de São Paulo, onde a etapa básica deste estudo sobre propagação de onda ocasionada por rompimento de barragem através da definição do hidrograma de ruptura a partir do qual foi estimada a propagação da onda de inundação e o comportamento da lâmina d'água.

Silva e Ribeiro (2018) em seu trabalho apresentaram a base de dados para realizar uma análise de propagação de onda de cheia da barragem de Chapéu d'Uvas em Juiz de Fora - MG. Foram analisados dois cenários de ruptura, para os quais foram determinados dentre outros dados a vazão de pico e o hidrograma de ruptura como etapa inicial da pesquisa.

Na Malásia, Sharim e Ros (2020) realizaram um estudo de rompimento da barragem de Temenggor, localizada no estado de Perak, com capacidade máxima de 127 milhões de metros cúbicos. Foram gerados hidrogramas de ruptura através de algumas equações de regressão como as de Froehlich, Macdonald e Langridge-Monopolis e Von Thun e Gillette. Os resultados fornecidos pelas equações foram considerados confiáveis para serem utilizados nas etapas seguintes de simulação e determinação das áreas afetadas.

### **3.4 Modelagem hidrológica**

Outro método para obtenção do hidrograma de ruptura de uma barragem é através do uso de software como o Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), onde é possível alimentar o

banco de dados do programa e realizar a modelagem computacional do evento de ruptura. Segundo o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (2025), o HEC-HMS é uma ferramenta que simula processos hidrológicos de sistemas de bacias hidrográficas, incluindo procedimentos tradicionais de análise hidrológica, como infiltração de eventos e hidrogramas unitários. Também realiza simulações de eventos contínuos, como evapotranspiração, derretimento de neve, quantificação de umidade do solo, além de fornecer recursos de análise suplementares para otimizações de modelos, previsões de vazão, avaliação de incerteza de modelo, erosão e transporte de sedimentos e até qualidade da água. Os resultados da simulação podem ser usados em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impactos futuros da urbanização, projetos de vertedouro de reservatório, mitigação de danos e perdas por inundações, dentre outros. Por essa versatilidade o HEC-HMS é um software muito utilizado em estudos de rompimento de barragem para gerar o hidrograma de ruptura.

Santana e Silva (2024) realizaram uma simulação computacional de rompimento da barragem Chinelo, no sertão de Pernambuco, para determinar a mancha de inundação em caso de acidente. O estudo teve como etapas a caracterização da barragem, a elaboração do hidrograma de ruptura no software HEC-HMS 4.9, a determinação do cenário de ruptura e dos parâmetros de formação da brecha, a simulação de rompimento no software HEC-RAS e a confecção dos mapas com as áreas de perigo. A partir dos resultados concluiu-se que em caso de rompimento da barragem Chinelo, aproximadamente 50 edificações seriam afetadas, colocando em risco vidas humanas.

Phyo et. al. (2023) realizaram um estudo sobre a barragem de Swa Chaung, situada no município de Yaedashe, no sul do Mianmar. As funções dessa represa são armazenar o excesso de água da chuva na estação das monções, afim de evitar inundações à jusante e fornecer água para irrigação no períodos de seca. A barragem de terra tem 30 metros de altura e 2,012 km de comprimento, a área do reservatório é de 28 km<sup>2</sup> e o volume total armazenado é de 267 milhões de m<sup>3</sup>. O HEC-HMS foi aplicado para calcular a vazão proveniente de eventos de precipitação para três cenários de ruptura diferentes e obter as respectivas vazões de pico.

### 3.5 Casos de rupturas de barragens no Brasil

#### 3.5.1 Barragem Lagoa do Nado

No dia 13 de novembro de 2024, a barragem Lagoa do Nado, localizada no Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado, em Belo Horizonte, rompeu por causa de uma intensa chuva. Na Figura 3.17 é mostrada a área da lagoa após o rompimento. A água escoou na Avenida Dom Pedro I, interditando a via (G1, 2024).

**Figura 3.17** - Barragem Lagoa do Nado após o rompimento.



Fonte: G1 (2024).

O reservatório tinha capacidade de armazenamento de 63 mil metros cúbicos de água. O volume escoado espalhou material sólido em uma área aproximada de 4 mil metros quadrados além de derrubar árvores e causar outros prejuízos. Na Figura 3.18 é mostrada a barragem rompida enquanto a água ainda estava escoando da lagoa (CORDEIRO, 2024).

**Figura 3.18** - Barragem da Lagoa do Nado rompida.



Fonte: G1 (2024).

### 3.5.2 Barragem de Algodões

Em maio de 2009, a barragem de Algodões 1, no Piauí, rompeu, liberando 50 milhões de metros cúbicos de água na cidade de Cocal da Estação, destruindo pelo menos 500 casas e tirando a vida de 15 pessoas. As causas do acidente foram uma quantidade de chuva acima da média associada à falta de manutenção da barragem. Na Figura 3.19 é mostrada a barragem alguns dias antes do rompimento. Era período de chuvas e duas semanas antes houve o transbordamento da barragem, o que criou uma erosão entre o sangradouro e a parede (LIMA, 2024).

**Figura 3.19** - Barragem de Algodões 1 com erosão dias antes do rompimento.



Fonte: G1 (2024).

Na Figura 3.20 é possível visualizar a barragem após o rompimento. Havia rachaduras há pelo menos um ano antes do acidente e como medidas corretivas estavam sendo aplicadas injeções de concreto pela empresa responsável pela operação. A primeira injeção ocorreu em junho do ano anterior. Em outubro, o governo do Piauí contratou uma consultoria para avaliar a situação e a empresa sugeriu a reconstrução total do maciço de terra e adição de argila, porém no começo de maio foi realizada uma obra de reforço no dique. Então, em 27 de maio de 2009, o sangradouro se rompeu (CARVALHO, 2009).

**Figura 3.20** - Barragem Algodões 1 após o rompimento.



Fonte: Carvalho (2009).

### 3.5.3 Represa do balneário municipal de Caarapó

Em 2015, no município de Caarapó (MS), uma barragem rompeu após chuvas intensas na região. Segundo relatos de funcionários da represa foi observado rompimento inicial na parte de baixo do maciço que, em pouco tempo, cedeu e desmoronou. Não houve mortes, apenas perdas materiais (VACCARI, 2015).

Na Figura 3.21 é apresentado o local do rompimento. Em uma faixa de 100 metros, a mata ciliar foi arrancada pela água que saía da represa (FEITOSA, 2015).

**Figura 3.21** - Represa do balneário de Caarapó rompida.



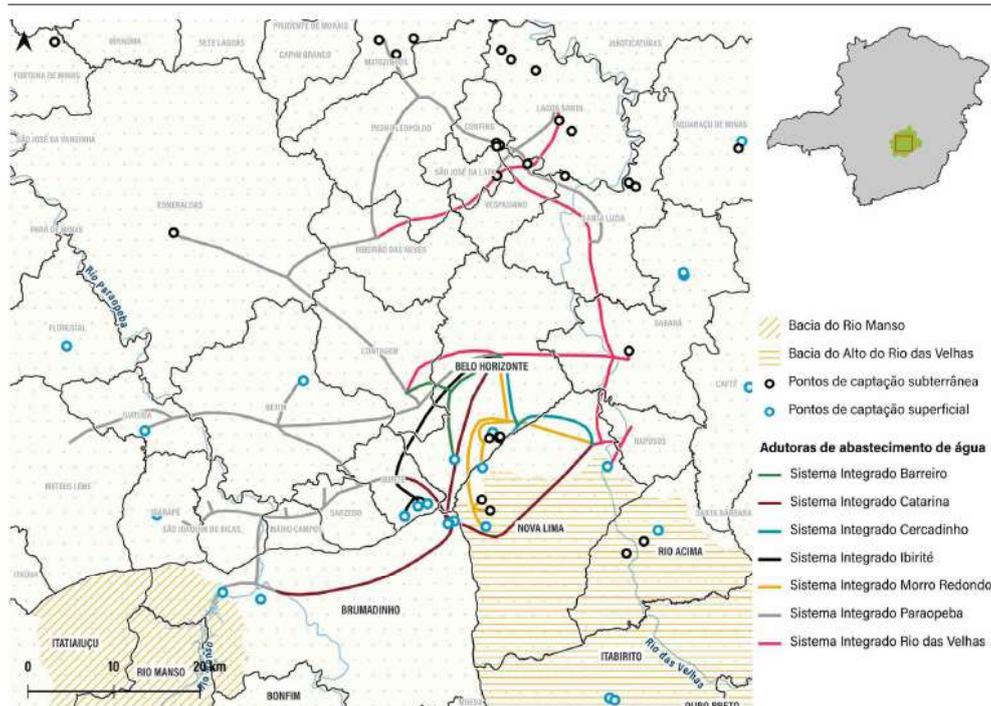
Fonte: Feitosa (2015).

### **3.6 Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH)**

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) foi instituída pela Lei Complementar nº 14, em 1973, formada pelos municípios de Belo Horizonte, Betim, Caeté, Contagem, Ibirité, Lagoa Santa, Nova Lima, Pedro Leopoldo, Raposos, Ribeirão das Neves, Rio Acima, Sabará, Santa Luzia e Vespasiano. Em 1989, os municípios de Brumadinho, Esmeraldas, Igarapé e Mateus Leme foram incorporados. Em 1993, Juatuba e São José da Lapa. Em 1997, mais seis cidades: Florestal, Rio Manso, Mário Campos, São Joaquim de Bicas e Sarzedo. Em 2000, entraram para a RMBH os municípios de Baldim, Capim Branco, Jaboticatubas, Taquaraçu de Minas, Itaguara, Matozinhos e Nova União. A cidade de Itatiaiuçu ingressou em 2002. Além da região metropolitana existe o Colar Metropolitano, formado pelos municípios adjacentes à RMBH composto por 14 municípios: Barão de Cocais, Belo Vale, Bonfim, Fortuna de Minas, Funilândia, Inhaúma, Itabirito, Itaúna, Moeda, Pará de Minas, Prudente de Morais, Santa Bárbara, São José da Varginha e Sete Lagoas (RMBH, 2025).

De todos os municípios da RMBH, 22 são abastecidos pelo Sistema Integrado de Abastecimento de Água (SIAA) (Figura 3.22), cuja gestão está sob a responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG). O SIAA é composto pelos sistemas produtores Paraopeba, responsável pelo abastecimento de 50,93% da população da RMBH, Sistema Rio das Velhas suprindo a demanda de 43,31% e outros sistemas que atendem a 5,76% (ALVES et. al., 2023).

**Figura 3.22 - Sistema de abastecimento de água da RMBH.**



Fonte: Alves et. al. (2023).

O Sistema integrado Paraopeba conta com três reservatórios (Figura 3.23). Os reservatórios Rio Manso, no município de Brumadinho, Serra Azul, localizado na cidade de Mateus Leme e Vargem das Flores, no município de Contagem, formadores do Sistema Paraopeba, fornecem água para aproximadamente 3,5 milhões de pessoas da RMBH. Dentre os reservatórios, o Rio Manso é o maior em volume, podendo armazenar até 160 hm<sup>3</sup>, em seguida, o reservatório Serra Azul com capacidade de reservação de 90 hm<sup>3</sup> e o menor dos três o reservatório Vargem das Flores, que pode conter até 40 hm<sup>3</sup> de água (BRASIL, 2025).

**Figura 3.23 - Reservatórios do Sistema Paraopeba.**



Fonte: Brasil (2025).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia do trabalho está dividida em escolha e caracterização da área de estudo, coleta, tratamento e análise de dados e modelagem hidrológica computacional com o uso do software HEC-HMS, bem como a estimativa da vazão de pico do hidrograma de ruptura por meio de equações empíricas.

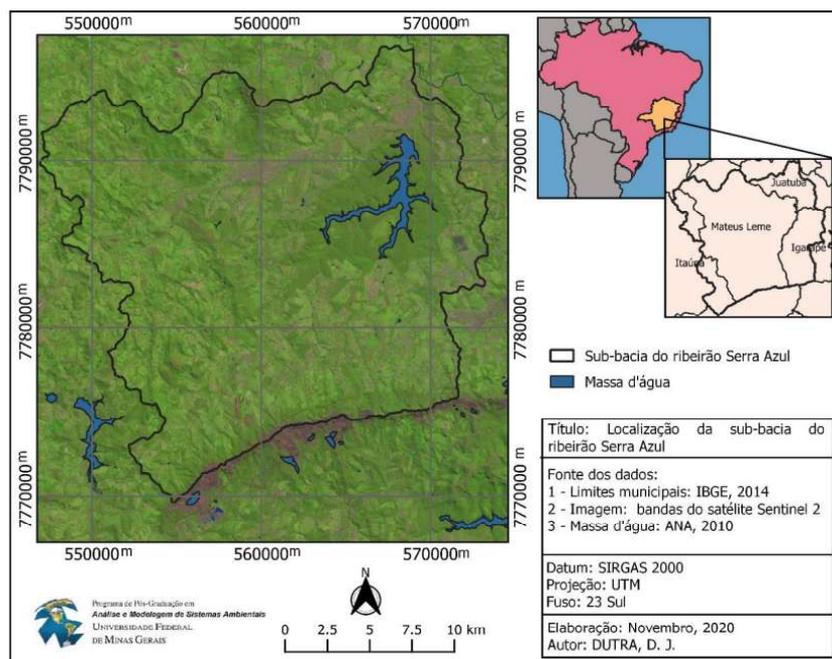
### **4.1 Escolha e caracterização da área de estudo**

Realizou-se uma busca pelos reservatórios de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte, na qual foram identificados os reservatórios Rio Manso, Serra Azul e Vargem das Flores. Assim, devido à disponibilidade de dados, foi escolhido para desenvolvimento do estudo o reservatório Serra Azul.

O Sistema Serra Azul localiza-se no município de Mateus Leme, na micro-bacia do Ribeirão Serra Azul (Figura 4.1), no alto curso do Rio São Francisco. A bacia do Ribeirão Serra Azul possui 447,83 km<sup>2</sup> de área de drenagem ocupando parcialmente os territórios dos municípios de Mateus Leme, Igarapé, Juatuba e Itaúna, no Estado de Minas Gerais, a aproximadamente 40 km da capital, Belo Horizonte (DUTRA, 2021).

O reservatório Serra Azul está localizado em uma área de proteção especial com fins de preservação do manancial, instituída pelo Decreto nº 20.792 de 08 de setembro de 1980. Abrangendo parte dos Municípios de Mateus Leme, Igarapé e Itaúna, em uma área total de quase 256 km<sup>2</sup>, os divisores de água são a Serra Azul, a Serra dos Caboclos, a Serra do Caxambu, a Serra das Perobas e a Serra da Saudade, que separam as bacias do Rio Manso e do Ribeirão Serra Azul na região sul (ALMG, 1980).

**Figura 4.1 - Localização da Micro-bacia do Ribeirão Serra Azul.**



Fonte: Adaptado de Dutra (2021).

Na Figura 4.2 é apresentada uma fotografia do reservatório do Sistema Serra Azul, que conta com um barramento de terra de 640 metros de comprimento, altura máxima de 48 metros e área inundada de 8,9 km<sup>2</sup>, cuja profundidade média é de 10 metros, com a máxima chegando a 40 metros. O vertedouro é do tipo não controlado com vazão de saída máxima é de 325 m<sup>3</sup>/s e bacia de dissipação do tipo ressalto hidráulico, além de possuir uma válvula controladora de diâmetro de 400 mm, para escoamento de fluxo residual de aproximadamente 330 L/s no ribeirão a jusante da barragem (ARSAE, 2013).

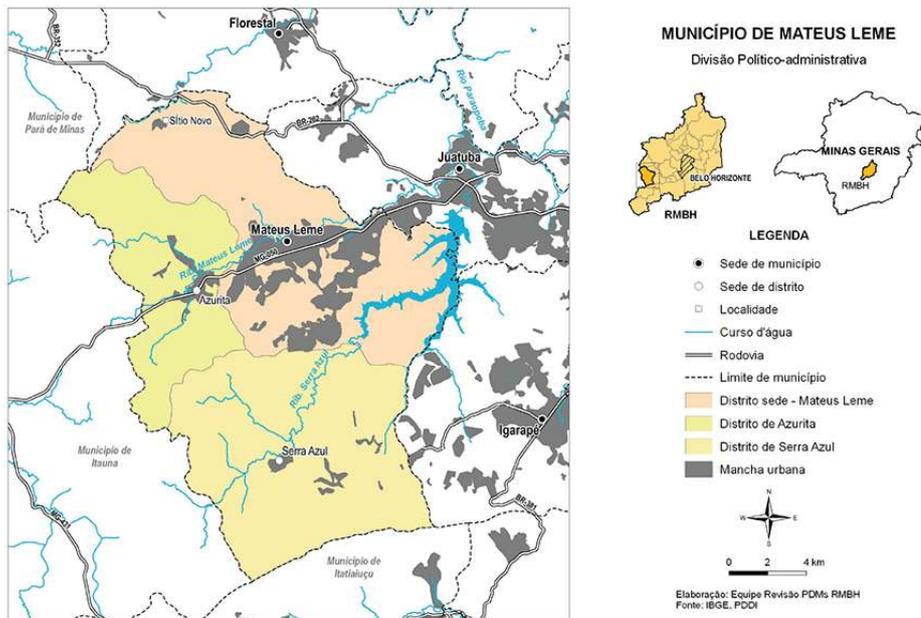
**Figura 4.2 - Reservatório Serra Azul.**



Fonte: Freitas (2018).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2022), o município de Mateus Leme possui uma população de 37.841 habitantes e território cuja área é de 301.383 km<sup>2</sup>. Na Figura 4.3 é apresentada a divisão político administrativa de Mateus Leme, onde é possível observar as manchas urbanas (cor cinza) no entorno do reservatório Serra Azul.

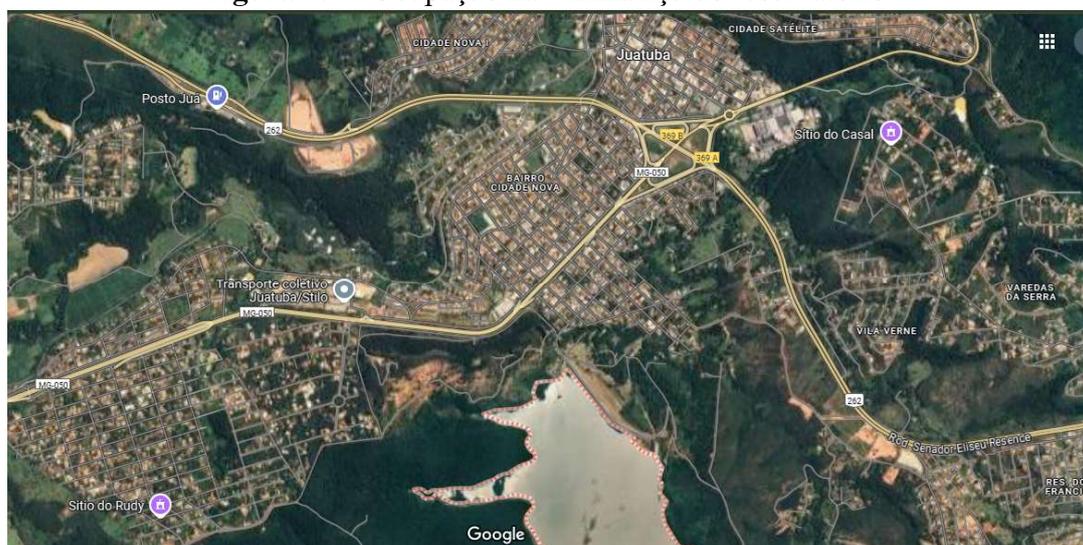
**Figura 4.3 - Divisão político-administrativa de Mateus Leme.**



Fonte: RMBH (2017).

A área próxima à barragem do reservatório (Figura 4.4) é bastante ocupada com bairros residenciais pertencentes aos municípios de Juatuba e Mateus Leme, além de contar com duas vias de tráfego importantes: a MG - 050 e a BR - 262.

**Figura 4.4 - Ocupação na vizinhança do reservatório.**



Fonte: Google (2025).

## 4.2 Coleta, tratamento e análise de dados

Na Tabela 4.1 são apresentados os dados utilizados na determinação dos parâmetros da brecha através das equações empíricas apresentadas no item 3.3.

**Tabela 4.1** - Dados usados para calcular os parâmetros da brecha através das equações empíricas.

| Dados  | Valores                      | Fonte                 |
|--|------------------------------|-----------------------|
| Altura da barragem (hd)                            | 47,00 (m)                    |                       |
| Altura da brecha (hb)                              | 47,00 (m)                    |                       |
| Altura da lâmina d'água no momento da ruptura (hw) | 760,00 (m)                   | Coelho et. al. (2013) |
| Volume do reservatório no momento da ruptura (Vw)  | 93565075,3 (m <sup>3</sup> ) |                       |
| Área do reservatório no momento da ruptura         | 7378732,00 (m <sup>2</sup> ) |                       |
| Comprimento total da barragem                      | 640 (m)                      | ARSAE (2013)          |
| Inclinação do talude da brecha (Z)                 | 0,7                          | Silva (2021)          |
| Cota de fundo do reservatório                      | 713,00 (m)                   |                       |
| Cota de fundo da brecha                            | 736,5 (m)                    | Coelho et. al. (2013) |
| Hr (valor de referência)                           | 15,0 (m)                     |                       |

Fonte: A autora (2025).

Na Tabela 4.2 são apresentados os dados usados para calcular as vazões de pico através das equações empíricas apresentadas no item 3.3.

**Tabela 4.2** - Dados usados para calcular as vazões de pico através das equações empíricas.

| Dados   | Valores                      | Fonte                 |
|---|------------------------------|-----------------------|
| Altura da barragem (hd)                           | 47,00 (m)                    | Coelho et. al. (2013) |
| Comprimento total da barragem                     | 640 (m)                      | ARSAE (2013)          |
| Volume do reservatório no momento da ruptura (Vw) | 93565075,3 (m <sup>3</sup> ) |                       |
| Área do reservatório no momento da ruptura        | 7378732,0 (m <sup>2</sup> )  | Coelho et. al. (2013) |
| Aceleração da gravidade                           | 9,81 m/s <sup>2</sup>        |                       |

Fonte: A autora (2025).

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados usados para calcular a vazão de pico através do modelo hidrológico computacional.

**Tabela 4.3** - Dados de entrada do modelo hidrológico HEC-HMS, referente à ruptura da barragem.

| Dados                              | Valores                            | Fonte                     |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Cota de fundo do reservatório      | 713,0 (m)                          |                           |
| Cota de fundo da brecha            | 736,5 (m)                          | Coelho et al. (2013)      |
| Cota elevação de topo              | 760,0 (m)                          |                           |
| Curva Cota área volume             | planilha                           |                           |
| Altura vertedouro                  | 5 (m)                              | Curvas de nível           |
| Cota inicial                       | 755,0 (m)                          | Hd – altura do vertedouro |
| Largura média da brecha            | 111,94 (m)                         |                           |
| Largura de fundo da brecha         | 79,04 (m)                          | Froehlich (2008)          |
| Tempo de ruptura da brecha         | 1,15 (h)                           |                           |
| Inclinação do talude da brecha (Z) | 0,7                                | Silva (2021)              |
| Cota de fundo da brecha            | (Hd/2) + cota de fundo = 736,5 (m) | Coelho et al. (2013)      |
| Coefficiente <i>piping</i>         | 1                                  | Froehlich (2008)          |

Fonte: A autora (2025).

### 4.3 Modelagem hidrológica

O cenário de ruptura adotado considera a formação de brecha por *piping*, o rompimento da barragem em um dia seco (sem ocorrência de precipitação) e o reservatório encontra-se com o volume total máximo armazenado (nível de água máximo).

Através da ferramenta HEC-HMS iniciou-se o processo de modelagem hidrológica para geração de hidrograma de ruptura, admitindo como método de formação de brecha o *piping* e utilizando os seguintes componentes do modelo: *Basin Model Manager* (Gerenciador de modelo de bacia), *Meteorologic Model Manager*, (Gerenciador de modelo meteorológico), *Control Specifications Manager* (Gerenciador de especificações de controle) e *Paired Data Manager* (Gerenciador de emparelhamento de dados).

No componente *Basin Model*, representou-se a bacia em estudo “Bacia Serra Azul”, com a criação do componente “Reservatório”, onde foram inseridas as informações apresentadas na Figura 4.5.

**Figura 4.5** - Dados de entrada do reservatório.

The screenshot displays the configuration window for a reservoir element in HEC-HMS. The window title is 'Basin Name: serra\_azul' and the element name is 'reservatorio'. The interface includes a list of parameters with their current values and dropdown menus for selection. The parameters are: Description (empty), Downstream (set to '--None--'), Method (set to 'Outflow Structures'), Storage Method (set to 'Elevation-Storage'), Elev-Stor Function (set to 'cota\_volume'), Initial Condition (set to 'Elevation'), Initial Elevation (M) (set to 755), Main Tailwater (set to 'Assume None'), Auxiliary (set to '--None--'), Time Step Method (set to 'Automatic Adaption'), Outlets (set to 0), Spillways (set to 0), Dam Tops (set to 0), Pumps (set to 0), Dam Break (set to 'Yes'), Dam Seepage (set to 'No'), Release (set to 'No'), and Evaporation (set to 'No').

| Parameter              | Value              |
|------------------------|--------------------|
| Basin Name             | serra_azul         |
| Element Name           | reservatorio       |
| Description            |                    |
| Downstream             | --None--           |
| Method                 | Outflow Structures |
| Storage Method         | Elevation-Storage  |
| *Elev-Stor Function    | cota_volume        |
| Initial Condition      | Elevation          |
| *Initial Elevation (M) | 755                |
| Main Tailwater         | Assume None        |
| Auxiliary              | --None--           |
| Time Step Method       | Automatic Adaption |
| Outlets                | 0                  |
| Spillways              | 0                  |
| Dam Tops               | 0                  |
| Pumps                  | 0                  |
| Dam Break              | Yes                |
| Dam Seepage            | No                 |
| Release                | No                 |
| Evaporation            | No                 |

Fonte: A autora (2025).

Nesta etapa foi criado o componente “*Dam Break*” onde foram inseridos os dados apresentados na Figura 4.6.

**Figura 4.6** - Dados de entrada do *Dam Break*.

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| <b>Basin Name: serra_azul</b>     |               |
| <b>Element Name: reservatorio</b> |               |
| Method:                           | Piping Breach |
| Direction:                        | Main          |
| *Top Elevation (M)                | 760           |
| *Bottom Elevation (M)             | 713           |
| *Bottom Width (M)                 | 79            |
| *Left Slope (xH:1V)               | 0,7           |
| *Right Slope (xH:1V)              | 0,7           |
| *Piping Elevation (M)             | 736,5         |
| *Piping Coefficient:              | 1             |
| *Development Time (HR)            | 1,15          |
| Trigger Method:                   | Specific Time |
| Trigger Date (ddMMYYYY)           | 01jan.2025    |
| *Trigger Time (HH:mm)             | 00:05         |
| Progression Method:               | Linear        |

Fonte: A autora (2025).

No componente *Meteorologic Model*, configurou-se a inclusão da sub-bacia em “Bacia Serra Azul” (Figura 4.7).

**Figura 4.7** - Dados de entrada do componente *Meteorologic Model*.

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| <b>Met Name: Met 1</b> |                      |
| Description:           | <input type="text"/> |
| Unit System:           | Metric               |
| Shortwave:             | --None--             |
| Longwave:              | --None--             |
| Precipitation:         | Specified Hyetograph |
| Temperature:           | --None--             |
| Windspeed:             | --None--             |
| Pressure:              | --None--             |
| Dew Point:             | --None--             |
| Evapotranspiration:    | --None--             |
| Replace Missing:       | Abort Compute        |

Fonte: A autora (2025).

No componente *Control Specification*, determinaram-se a data e o tempo de simulação do evento de ruptura (3 horas) adicionando os dados (Figura 4.8).

**Figura 4.8** - Dados de entrada do componente *Control Specification*.

Fonte: A autora (2025).

No componente *Paired Data*, inseriu-se a curva cota-volume do reservatório Serra Azul, sendo as unidades de medida da cota em metros e do volume em (x1000) m<sup>3</sup>, de acordo com a Figura 4.9.

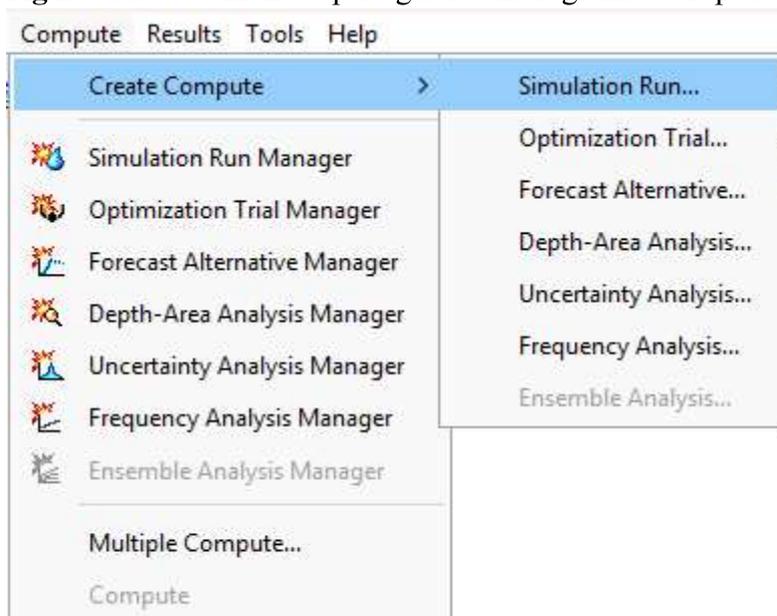
**Figura 4.9** - Dados de entrada do componente *Paired Data* - Curva Cota x Volume.

| Paired Data   |                   | Table | Graph |
|---------------|-------------------|-------|-------|
| Elevation (M) | Storage (1000 M3) |       |       |
| 713           | 0,0000            |       |       |
| 714           | 0,0355            |       |       |
| 715           | 0,2295            |       |       |
| 716           | 0,7395            |       |       |
| 717           | 2,1023            |       |       |
| 718           | 7,3458            |       |       |
| 719           | 19,1419           |       |       |
| 720           | 38,2365           |       |       |
| 721           | 76,3137           |       |       |
| 722           | 155,2466          |       |       |

Fonte: A autora (2025).

A simulação da ruptura hipotética da barragem Serra Azul foi realizada através da ferramenta *Compute – Create Compute – Simulation Run* (Figura 4.10), para a geração do hidrograma de ruptura.

**Figura 4.10** - Comandos para gerar o hidrograma de ruptura..



Fonte: A autora (2025).

#### 4.4 Estimativa de vazões de pico através de fórmulas empíricas

Através das equações empíricas Tabela 4.4 estimou-se a vazão de pico proveniente da ruptura hipotética da barragem Serra Azul.

**Tabela 4.4** - Fórmulas empíricas para calcular as vazões de pico.

| Autor                    | Fórmulas empíricas   |
|--------------------------|--|
| Lou (1981)               | $Q_p = 7,683 H_d^{1,909}$  |
| Saint-Venant -           | $Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g Y_{médio}^{\frac{3}{2}}}$  |
| Singh (1996)             | $Q_p = 1,7 B_b H_b^{\frac{3}{2}}$  |
| Wetmore and Fread (1981) | $Q_p = 1,7 B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A}{B_b}}{7 \left[ \frac{1,94 A}{(p_s \sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$ |
| Schoklistch (1917)       | $Q_p = \frac{8}{27} \left( \frac{B_d}{B_b} \right)^{\frac{1}{2}} B_b \sqrt{g Y_{médio}^{\frac{3}{2}}}$         |

| Autor                        | Fórmulas empíricas          |
|------------------------------|-----------------------------|
| Bureau of Reclamation (1982) | $Q_p = 19H_d^{1.85}$        |
| Hagen (1982)                 | $Q_p = 1,205(H_d V)^{0.48}$ |

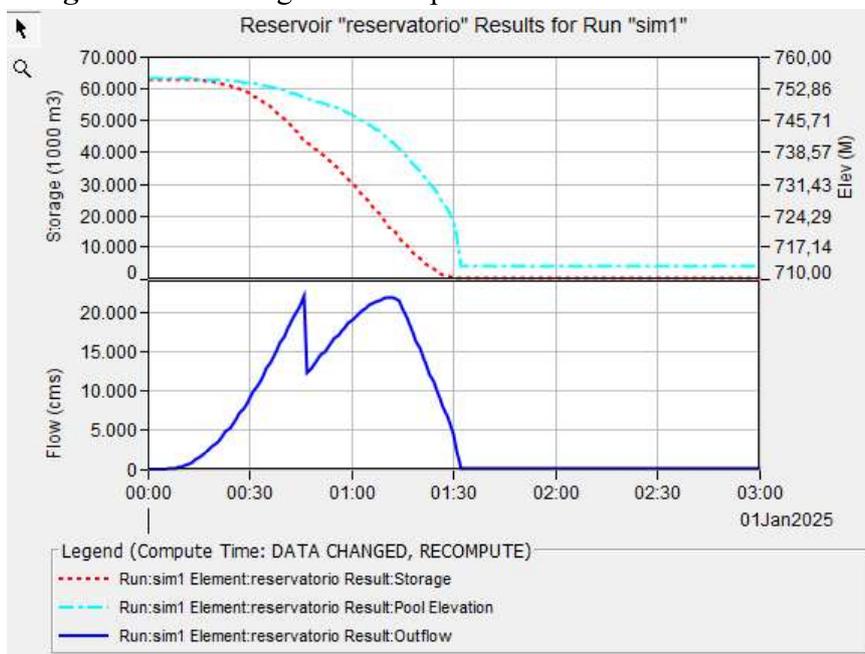
Fonte: A autora (2025).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Modelagem hidrológica através de HEC-HMS

Na Figura 5.1 é mostrado o hidrograma de ruptura resultante da simulação hidrológica no HEC-HMS. O hidrograma de ruptura obtido não apresenta o formato clássico de um hidrograma de decaimento parabólico, pois apresenta um duplo pico. Provavelmente, isto se deve à ruptura parcial da barragem, uma vez que a mesma não se rompe de uma vez, mas gradualmente. Também é possível observar que, enquanto a vazão de saída aumenta, a cota do nível de água e o volume do reservatório diminuem em função do escoamento através da brecha.

**Figura 5.1** - Hidrograma de ruptura do reservatório Serra Azul.



Fonte: A autora (2025).

Na Figura 5.2, é possível observar que o primeiro pico ocorre no tempo de 46 minutos a partir do início da ruptura, com uma vazão de pico de 21.921,0 m<sup>3</sup>/s.

**Figura 5.2 - Tempo do primeiro pico de vazão.**

| Project: proj1 Simulation Run: sim1<br>Reservoir: reservatorio |       |                                  |                   |               |                |
|--|-------|----------------------------------|-------------------|---------------|----------------|
| Start of Run: 01jan.2025, 00:00                                |       | Basin Model: serra_azul          |                   |               |                |
| End of Run: 01jan.2025, 03:00                                  |       | Meteorologic Model: Met 1        |                   |               |                |
| Compute Time:DATA CHANGED, RECOMPUTE                           |       | Control Specifications:Control 1 |                   |               |                |
| Date   | Time  | Inflow (M3/S)                    | Storage (1000 M3) | Elevation (M) | Outflow (M3/S) |
| 01jan.2025   | 00:31 |                                  | 57747,8           | 754,0         | 9760,5         |
| 01jan.2025   | 00:32 |                                  | 57140,5           | 753,8         | 10487,0        |
| 01jan.2025   | 00:33 |                                  | 56488,9           | 753,7         | 11233,3        |
| 01jan.2025   | 00:34 |                                  | 55792,1           | 753,6         | 11998,3        |
| 01jan.2025   | 00:35 |                                  | 55048,8           | 753,4         | 12780,7        |
| 01jan.2025   | 00:36 |                                  | 54258,0           | 753,2         | 13579,2        |
| 01jan.2025   | 00:37 |                                  | 53418,9           | 753,1         | 14392,5        |
| 01jan.2025   | 00:38 |                                  | 52530,7           | 752,9         | 15215,0        |
| 01jan.2025   | 00:39 |                                  | 51592,9           | 752,7         | 16046,3        |
| 01jan.2025   | 00:40 |                                  | 50605,0           | 752,4         | 16886,3        |
| 01jan.2025   | 00:41 |                                  | 49566,4           | 752,2         | 17733,1        |
| 01jan.2025   | 00:42 |                                  | 48476,9           | 751,9         | 18582,5        |
| 01jan.2025   | 00:43 |                                  | 47336,7           | 751,7         | 19425,2        |
| 01jan.2025   | 00:44 |                                  | 46145,9           | 751,4         | 20266,2        |
| 01jan.2025   | 00:45 |                                  | 44904,8           | 751,1         | 21103,2        |
| 01jan.2025   | 00:46 |                                  | 43614,0           | 750,8         | 21921,0        |
| 01jan.2025   | 00:47 |                                  | 42788,7           | 750,5         | 12337,4        |
| 01jan.2025   | 00:48 |                                  | 42032,2           | 750,3         | 12879,9        |

Fonte: A autora (2025).

Já o segundo pico ocorre no tempo de 1:11 h a partir do início da ruptura, com vazão de pico e 21.727,9 m<sup>3</sup>/s, de acordo com a Figura 5.3.

**Figura 5.3 - Tempo do segundo pico de vazão.**

| Project: proj1 Simulation Run: sim1<br>Reservoir: reservatorio |       |               |                                  |               |                |
|--|-------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------|
| Start of Run: 01jan.2025, 00:00                                |       |               | Basin Model: serra_azul          |               |                |
| End of Run: 01jan.2025, 03:00                                  |       |               | Meteorologic Model: Met 1        |               |                |
| Compute Time:DATA CHANGED, RECOMPUTE                           |       |               | Control Specifications:Control 1 |               |                |
| Date   | Time  | Inflow (M3/S) | Storage (1000 M3)                | Elevation (M) | Outflow (M3/S) |
| 01jan.2025   | 01:03 |               | 20550,2                          | 743,7         | 20103,2        |
| 01jan.2025   | 01:04 |               | 25736,1                          | 745,3         | 20503,2        |
| 01jan.2025   | 01:05 |               | 24496,3                          | 744,8         | 20814,4        |
| 01jan.2025   | 01:06 |               | 23239,3                          | 744,3         | 21082,9        |
| 01jan.2025   | 01:07 |               | 21966,8                          | 743,8         | 21318,4        |
| 01jan.2025   | 01:08 |               | 20682,1                          | 743,3         | 21502,5        |
| 01jan.2025   | 01:09 |               | 19387,4                          | 742,7         | 21639,5        |
| 01jan.2025   | 01:10 |               | 18086,2                          | 742,1         | 21730,6        |
| 01jan.2025   | 01:11 |               | 16781,4                          | 741,4         | 21752,3        |
| 01jan.2025   | 01:12 |               | 15476,5                          | 740,8         | 21727,9        |
| 01jan.2025   | 01:13 |               | 14175,3                          | 740,1         | 21644,7        |
| 01jan.2025   | 01:14 |               | 12859,1                          | 739,3         | 21466,9        |
| 01jan.2025   | 01:15 |               | 11601,8                          | 738,5         | 20433,7        |
| 01jan.2025   | 01:16 |               | 10406,2                          | 737,7         | 19410,9        |

Fonte: A autora (2025).

## 5.2 Resultados obtidos através das equações empíricas

Os valores dos parâmetros de brecha obtidos através das fórmulas empíricas variaram bastante entre si (Tabela 5.1), apesar de terem sido utilizados os mesmos dados de entrada. As equações de Von Thun e Gillette, Froehlich (1995) e Froehlich (2008) apresentaram resultados mais próximos tanto para a largura média quanto para o tempo de ruptura. A equação do Bureau of Reclamation forneceu valores muito elevados para ambos os parâmetros e a equação de Xu e Zhang apresentaram valores muito baixos.

**Tabela 5.1** - Largura média e tempo de ruptura da brecha obtidas por fórmulas empíricas.

| Autor                        | Largura média da brecha (m) | Tempo de ruptura (h) |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Bureau of Reclamation (1988) | 2280,0                      | 25.08                |
| Von Thun e Gillette (1990)   | 160.20                      | 1.19                 |
| Froehlich (1995)             | 133,0                       | 1.33                 |
| Froehlich (2008)             | 111.04                      | 1.15                 |
| Xu e Zhang (2009)            | 29.53                       | 0,048                |

Fonte: A autora (2025).

As vazões de pico resultado das fórmulas empíricas também variaram muito (Tabela 5.2), apresentando um coeficiente de variação de 95,2%, embora tenham sido utilizados os mesmos dados e parâmetros de entrada. Portanto, estas equações geram dúvidas no tomador de decisões, uma vez que, devido à expressiva variação nas vazões de pico, torna-se difícil determinar a equação mais adequada para utilizar em estudos de segurança de barragem.

**Tabela 5.1** - Vazões de pico obtidas por fórmulas empíricas.

| Autor                        | Qmax (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------------|--------------------------|
| Lou (1981)                   | 11.955                   |
| Saint-Venant -               | 36.830                   |
| Singh (1996)                 | 175.594                  |
| Wetmore and Fread (1981)     | 247.055                  |
| Schoklistch (1917)           | 30.814                   |
| Bureau of Reclamation (1982) | 23.682                   |
| Hagen (1982)                 | 47.982                   |

Fonte: A autora (2025).

### 5.3 Comparação entre as vazões de pico

Ao se comparar os resultados obtidos pelas equações empíricas e pela modelagem computacional, observou-se que a equação do *Bureau of Reclamation* proporcionou a vazão de pico de 23.682 m<sup>3</sup>/s, embora um pouco superior, mais próxima à vazão obtida no HEC-HMS, de 21.921 m<sup>3</sup>/s, com uma diferença percentual de 7,4%. As outras equações forneceram valores muito divergentes para mais ou para menos. O HEC-HMS é amplamente

aceito e muito utilizado em estudos hidrológicos, por ser eficiente nas simulações de eventos de ruptura e outros. Portanto, considerou-se que o resultado obtido pela simulação computacional representa melhor a realidade do evento do que as equações.

Taveira et al. (2018) analisaram 140 barragens de pequeno, médio e grande porte, do estado do Ceará sob a perspectiva de rupturas hipotéticas. Para tanto, utilizaram como referência modelos empíricos, comparando os resultados das diferentes equações de vazão de pico utilizadas nas simulações. Observaram-se que as vazões de pico das barragens de grande porte apresentaram valores semelhantes, enquanto as barragens de pequeno e médio porte apresentaram vazões bastante distintas. A equação de Froehlich (1995) forneceu resultados mais próximos da média, porém as equações que dependem apenas do volume do reservatório tiveram resultados mais variados em relação à Froehlich (1995).

Silva e Ribeiro (2018) realizaram uma simulação de ruptura da barragem Chapéu d'Uvas, para os cenários de galgamento e *piping*, através de equações empíricas. Como parâmetro de referência foi utilizada a metodologia apresentada por Wahl (1988), para calcular as vazões de pico para ambos os cenários, encontrando-se a vazão máxima de aproximadamente 20.000 m<sup>3</sup>/s em caso de galgamento e 9.000 m<sup>3</sup>/s em caso de *piping*. Em seguida foram utilizadas outras metodologias para calcular as vazões de pico e estipulou-se que os valores a serem aceitos seriam os imediatamente inferiores aos obtidos pela metodologia de Wahl (1988). Considerando o galgamento a equação do Bureau of Reclamation (1982) forneceu a vazão mais próxima do valor de referência 17.480,93 m<sup>3</sup>/s. No cenário de *piping*, a equação de Lou (1981) apresentou o valor mais próximo 8.735,99 m<sup>3</sup>/s.

Faria et al. (2019) observaram que as vazões de pico obtidas pelas equações empíricas, para os mesmos parâmetros de entrada, variaram bastante, sendo a menor vazão igual a 37.050 m<sup>3</sup>/s e a maior 394.422 m<sup>3</sup>/s. As vazões cujos valores mais se aproximaram entre si foram as de Saint Venant e Schoklistch.

Conceição e Fontes (2013) selecionaram oito barragens localizadas na Bahia para estimar a largura da brecha, o tempo de ruptura, a vazão de pico e o hidrograma de ruptura através de equações empíricas e comparar os resultados, verificando grande variação nos valores obtidos, com coeficiente de variação superior a 90%, próximo ao valor encontrado no presente trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

O conhecimento da vazão de pico é de extrema importância na elaboração de planos de segurança de barragens, pois permite, por meio de modelagem hidrodinâmica e geotecnologias, mapear as áreas de risco e definir medidas de evacuação e alerta, além de ser base para o dimensionamento das estruturas de controle como vertedouros, permitindo prever os impactos da ruptura a jusante do barramento. Ao adotar uma vazão muito abaixo da vazão real, as medidas de prevenção e mitigação são elaboradas aquém do que seria necessário em caso de acidente, ocasionando prejuízos socioambientais e econômicos que poderiam ser evitados. Por outro lado, ao se adotar uma vazão acima do valor ideal, a infraestrutura e os planos de mitigação ficam superdimensionados, elevando os custos, o que pode torná-los economicamente ou mesmo tecnicamente inviáveis.

A grande variedade de equações e metodologias para calcular os parâmetros de brecha e a vazão de pico disponibiliza resultados muito distintos para os mesmos dados de entrada, gerando hidrogramas de ruptura diferentes, o que gera incerteza para escolher a equação mais adequada ao simular uma ruptura de barragem. Por ser uma etapa básica nos estudos de segurança de barragens, o hidrograma de ruptura do reservatório Serra Azul pode servir como subsídio para trabalhos futuros, uma vez que o entorno da barragem é bastante ocupado e conta com duas vias importantes de tráfego, sendo relevante gerar a mancha de inundação à jusante para identificar as áreas mais vulneráveis, estimar os possíveis prejuízos sociais e ambientais na região e criar medidas de alerta e evacuação, dentre outras.

Em futuros trabalhos, podem ser realizadas simulações considerando a ruptura da barragem por galgamento, bem como geração de manchas de inundações por meio de modelos hidráulicos, como o software HEC-HAS para fornecer as vazões nas áreas de inundação e o software QGis que gera os mapas a partir das informações obtidas pelo HEC-HMS, HEC-HAS ou outras metodologias e modelos hidrológicos.

## REFERÊNCIAS

ALFANO, Bruno. **Com 115 anos, primeiro acude para combater seca no país volta a ter água após seis meses.** 2022. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Foglobo.globo.com%2Fbrasil%2Fn oticia%2F2022%2F05%2Fcom-115-anos-primeiro-acude-para-combater-seca-no-pais-volta-a -ter-agua-apos-seis-meses.ghhtml&psig=AOvVaw31Z9GnxPXsqpbYqF6pGRZx&ust=174889 6359660000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhxqFwoTCOiEneal0Y 0DFQAAAAAdAAAAABAE>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ALMEIDA, Pedro Maia Tavares de; FAIS, Laura Maria Canno Ferreira; MARTIM, André Luís Sotero Salustiano. Estudo comparativo das equações de formação de brecha em barragens de terra. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UNICAMP, 31., 2023, Campinas. **Artigo.** Campinas: Unicamp, 2023. p. 1-5. Disponível em: <https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2023P21180A780O2841.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ALVES, Luciana Medeiros; FELTRAN-BARBIERI, Rafael; BARBOSA, Leonardo; CACCIA, Lara Schmitt; LEITE, Maíra Fares; STRACK, Clara. **Infraestrutura Natural para Água na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais:** soluções integrando campo e cidade e gerando benefícios para toda a sociedade. São Paulo: Wri Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/infraestrutura-natural-agua-belo-horizonte-mg>. Acesso em: 01 abr. 2025.

AMARAL, Geovana Luz. **Análise das diferentes formulações de parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem:** avaliação das variações nos hidrogramas de ruptura. 2019. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, 2019. Disponível em: <https://portal.ifba.edu.br/conquista/ensino/GeovanaLuzAmaral.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2025.

AMORIM, Júlio César Pereira. **Estudo hipotético de propagação de onda ruptura da barragem do reservatório bom jardim em Uberlândia - mg.** 2021. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/33287/1/EstudoHipot%C3%A9ticoPropaga%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Guia para elaboração de projetos de barragens.** 2014. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/publicacoes/ArquivosPNSB\\_Docs\\_Estruturantes/produto-08-manual-de-orientacao-aos-empresendedores-guia-para-a-elaboracao-de-projetos-de-barragens.pdf](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ArquivosPNSB_Docs_Estruturantes/produto-08-manual-de-orientacao-aos-empresendedores-guia-para-a-elaboracao-de-projetos-de-barragens.pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

ANA, Agência Nacional de Água e Saneamento Básico. **Guia rápido sobre Planos de Segurança de Barragens.** 2025. Disponível em: <https://progestao.ana.gov.br/destaque-superior/eventos/oficinas-de-intercambio-1/seguranca-d-e-barragens/curso-de-seguranca-de-barragens-joao-pessoa-pb/guias/guia-rapido-sobre-planos-para-sb.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas: estudos de ruptura de barragens.** Brasília, 2012. Disponível em: [http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo\\_I\\_Texto.pdf](http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo_I_Texto.pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: guia prático de pequenas barragens.** Brasília: Ana, 2016. 8 v. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/api/file/download/195/4/volume-viii-guia-pratico-de-pequenas-barragens.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório Anual de Segurança de Barragens.** Brasília: Ana, 2023. 126 p. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ASDSO, Association Of State Dam Safety Officials. **Dam failures and incidents.** 2025. Disponível em: <https://damsafety.org/dam-failures>. Acesso em: 01 abr. 2025.

BHARATH, A.; SHIVAPUR, Anand V.; HIREMATH, C. G.; MADDAMSETTY, Ramesh. **Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India: environmental challenges.** Elsevier. Karnataka, p. 1-14. dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021003759>. Acesso em: 01 abr. 2025.

BIBLIOGRAFIA TEMÁTICA. Brasília: ANEEL, v. 3, n. 2, fev. 2021. Disponível em: [file:///C:/Users/Dell/Downloads/Bib\\_Seguran%C3%A7a%20de%20barragens,%20v.%203,%20n.%202,%20fev..pdf](file:///C:/Users/Dell/Downloads/Bib_Seguran%C3%A7a%20de%20barragens,%20v.%203,%20n.%202,%20fev..pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

ARSAE-MG. Relatório de fiscalização. **Sistema integrado de abastecimento da RMBH: Bacia Paraopeba.** Belo Horizonte, 2013. Disponível em: [https://arsae.mg.gov.br/images/documentos/rf\\_tec\\_op\\_saa\\_sistema\\_bacia\\_paraopeba.pdf](https://arsae.mg.gov.br/images/documentos/rf_tec_op_saa_sistema_bacia_paraopeba.pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.. Lei. Brasília, Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/585331#:~:text=Estabelece%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,altera%20a%20reda%C3%A7%C3%A3o%20do%20art..> Acesso em: 01 abr. 2025.

BRASIL. **Outros sistemas hídricos:** Paraopeba. 2025. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba>. Acesso em: 01 abr. 2025.

CARVALHO, Cleide. **Barragem que rompeu no Piauí recebia injeções de cimento há pelo menos um ano.** 2009. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/politica/barragem-que-rompeu-no-piaui-recebia-injecoes-de-cimento-ha-pelo-menos-um-ano-3114283>. Acesso em: 01 abr. 2025.

CARVALHO, Milena Cristina de Paula; SILVA, Luís Gustavo Vilela; CÂNDIDO, Eduardo Souza; LEÃO, Luísa de Moura; FIA, Fátima Resende Luíz; RIBEIRO, André Geraldo Cornélio. **Análise de ruptura hipotética para barragens em cascata.** Revista Ciência Et

Praxis, Lavras, v. 19, n. 34, p. 64-82, jul. 2024. Semestral. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/praxys/article/view/8062/5603>. Acesso em: 01 abr. 2025.

COELHO, Ricardo Motta Pinto; FERNANDES, Denise Pires; RESENDE, Mariana; CAIRES, Tarcísio Brasil. **Estudos morfométricos e batimétricos no reservatório Serra Azul - COPASA**. Belo Horizonte. 2013. 50 p.

CONCEICAO, Murilo Pereira da Silva; FONTES, Andrea Sousa. **Análise das dificuldades para definição da vazão de pico resultante de estudos de ruptura de barragem de aterro**. In: SBRH, 22, 2017, Florianópolis. Artigo. Florianópolis: Abrh, 2017. p. 1-9. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022369.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

CORDEIRO, Lorena. **Fiscalização ambiental verifica rompimento de barragem na Lagoa do Nado**. 2024. Disponível em: [https://semad.mg.gov.br/w/fiscalizacao-ambiental-verifica-rompimento-de-barragem-na-lagoa-do-nado?p\\_1\\_back\\_url=%2Fnoticias](https://semad.mg.gov.br/w/fiscalizacao-ambiental-verifica-rompimento-de-barragem-na-lagoa-do-nado?p_1_back_url=%2Fnoticias). Acesso em: 01 abr. 2025.

EUA, Corpo de Engenheiros do Exército dos. **HEC-HMS**. 2025. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 01 abr. 2025.

FARIA, Fábio Luis França de; REIS, Marcelo de Miranda. **Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens**. In: SBRH, 22, 2017, Florianópolis. Artigo. Florianópolis: Abrh, 2017. p. 1-9. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP023015.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

FARIA, Fábio L. F.; SILVA, Matheus B.; REIS, Marcelo de M.; AMORIM, José C. C. Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, p. 31-37, out. 2019. Disponível em: <https://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/CT/article/download/3246/2614>. Acesso em: 01 abr. 2025.

FEITOSA, Liana. **Chuva que destruiu balneário causou prejuízo de R\$ 7 milhões em cidade**. 2015. Disponível em: <https://www.campograndenews.com.br/cidades/interior/chuva-que-destruiu-balneario-causou-prejuizos-de-rs-7-milhoes-em-cidade>. Acesso em: 01 abr. 2025.

FREITAS, Marcelo. **Chuvas aceleram recuperação dos reservatórios da Copasa.** 2018. Disponível em: <https://bhaz.com.br/noticias/bh/chuvas-aceleram-recuperacao-reservatorios-copasa/>. Acesso em: 01 abr. 2025.

G1, **Veja como ficou parque de BH após rompimento de barragem de água.** 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2024/11/14/veja-como-ficou-a-barragem-de-agua-que-se-rompeu-no-parque-lagoa-do-nado-em-bh-videos.ghtml>. Acesso em: 01 abr. 2025.

GOMES, Francisco Hiago de Siqueira. **Quantificação de risco de *piping* em barragens de terra via abordagens probabilística e fuzzy.** 2019. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/41784/3/2019\\_dis\\_fhsgomes.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/41784/3/2019_dis_fhsgomes.pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

IBGE. **Cidades e estados: mateus leme.** Mateus Leme. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/mateus-leme.html>. Acesso em: 01 abr. 2025.

IMBROGNO, David F. **Analysis of Dam Failures and Development of a Dam Safety Evaluation Program.** 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Program In Civil Engineering, The Ohio State University, Ohio, 2014. Disponível em: [https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb\\_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10\\_accession\\_num=osu1406168902](https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=osu1406168902). Acesso em: 01 abr. 2025.

JESUS, Michele Bispo de. **Aspectos de gestão frente à Política Nacional de Segurança de Barragens.** 2021. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-07102021-161152/publico/MicheleBispoJesusCorr21.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

LIMA, Izabella. **Governo do Piauí anuncia construção da Barragem Nova Algodões, em Cocal, 15 anos após rompimento.** 2024. Disponível em:

<https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2024/11/08/governo-do-piaui-anuncia-construcao-da-barragem-nova-algodoes-em-cocal-15-anos-apos-rompimento.ghtml>. Acesso em: 01 abr. 2025.

MARQUES, Eloiza. **Segurança em barragens de terra: orientações gerais e práticas recomendadas**. 2023. 1. ed. Curitiba. Appris, 2023. 51 p. 21 cm. Disponível em: <https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2023/10/Seguranca-em-Barragens-de-Terra.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

MASCARENHAS, Flávio Cesar Borba. **Modelação matemática de ondas provocadas por rupturas de barragens**. 1990. 302 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/134-1990/742-flavio-cesar-borba-mascarenhas>. Acesso em: 01 abr. 2025.

MINAS GERAIS. Define área de proteção especial, situada nos Municípios de Mateus Leme, Igarapé e Itaúna, para fins de preservação de mananciais. **Decreto Nº 20.792: Lei Estadual**. Belo Horizonte, MG, Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/20792/1980/#:~:text=Define%20%C3%A1rea%20de%20prote%C3%A7%C3%A3o%20especial,fins%20de%20preserva%C3%A7%C3%A3o%20de%20mananciais>. Acesso em: 01 abr. 2025.

PHYO, Aung; RICHARDS, Delmaria; FRIEDRICH, Yabar Helmut. **Managing dam breach and flood inundation by HEC-RAS modeling and GIS mapping for disaster risk management**. 2023. Tsukuba. Disponível em: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4485246](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4485246). Acesso em: 01 abr. 2025.

REYNOLDS, Sonel. **Evaluating the decision criteria for the prioritisation of South African dams for rehabilitation in terms of risk to human lives**. 2013. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Civil Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2013. Disponível em: <https://scholar.sun.ac.za/server/api/core/bitstreams/3f7bd856-b588-4200-ae19-0b7ae1ae7732/content>. Acesso em: 01 abr. 2025.

RMBH, Agência. **Breve Histórico da Gestão Metropolitana da RMBH**. 2025. Disponível em: <http://www.rmbh.org.br/mzrmbh/pt-br/content/rmbh.htm>. Acesso em: 01 abr. 2025.

RMBH. Processo de revisão do Plano Diretor: mateus leme. Mateus Leme. 2017. Disponível em: [http://www.rmbh.org.br/plano/municipio.php?mun=mateus\\_leme](http://www.rmbh.org.br/plano/municipio.php?mun=mateus_leme). Acesso em: 01 abr. 2025.

SHAHRIM, M. F.; ROS F. C. Estimation of breach outflow hydrograph using selected regression breach equations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2., 2020, Najaf. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Najaf: 2020. p. 1-7. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/476/1/012129/pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SILVA, Alexandre Ângelo Carmo Luiz da. **Análise de incerteza dos parâmetros de brecha aplicada à modelagem probabilística do hidrograma de ruptura de barragens de terra**. 2021. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/55743>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SILVA, André Felipe Rocha da; RIBEIRO, Celso Bandeira de Melo. Estudo dos hidrogramas formados por *piping* e galgamento para propagação de onda de cheia proveniente de ruptura de barragem - estudo de caso: barragem de Chapéu D'Uvas MG. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO RIO PARAÍBA DO SUL, 3., 2018, Juiz de Fora. Artigo. Juiz de Fora: K, 2018. p. 1-10. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=3842>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SANTANA, Natalia Fernanda Jerônimo de; SILVA, Simone Rosa da. Simulação computacional hipotética de rompimento: um estudo de caso da barragem Chinelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 18, n. 4, p. 2849-2863, set. 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/262488/49625>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SNISB, Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens. **Definições Importantes Sobre Segurança de Barragens**. 2025. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/outros/definicoes-importantes-sobre-seguranca-de-barragem.pdf](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/outros/definicoes-importantes-sobre-seguranca-de-barragem.pdf). Acesso em: 01 abr. 2025.

SNISB, Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens. **Relatório de segurança de barragens 2023.** 2024. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TAVEIRA, Itamara Mary Leite de Menezes; OLIVEIRA, Luísa Ciríaco Silva de; FERNANDES, Thaiza Alves Fernandes; ASSIS, Daniel Afonso Nunes de Assis. **Aplicação e análise de equações empíricas no cálculo da vazão de pico resultante de um evento de ruptura de barragens.** In XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Artigo. Fortaleza. 2018. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4619>. Acesso em: 01 abr. 2025.

VACCARI, Glaucea. **Barragem rompe e destrói represa de balneário municipal.** 2015. Disponível em: <https://correiodoestado.com.br/cidades/barragem-rompe-e-destroi-represa-de-balneario-municipal/264894/#:~:text=A%20barragem%20da%20represa%20do,aos%20estragos%20causado%20pela%20chuva..> Acesso em: 01 abr. 2025.

VALLE, Mylanna Pereira do; JUNIOR, Pantene Oliveira Cassel; SANTOS, Gabriel Silvério Feltz dos, PATENTE, Fábio Almeida de Moraes. **Análise da propagação de onda ocasionada por rompimento de barragem:** simulação de ruptura de uma barragem de água. Revista Ibero- Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 1822-1842, abr. 2024.

VIEIRA, Luan Marcos da Silva; PALMIER, Luiz Rafael; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso. II Encontro Nacional de Desastres. **Avaliação de hidrogramas de ruptura para simulação da ruptura hipotética da barragem da pampulha - MG.** 2020. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/133/II-END0143-2-20201130-025231.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.