

**VINICIUS ARIMATEIA RIBEIRO OLIVEIRA**

**SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA INDUZIDA PELA  
RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGEM: ESTUDO DE CASO UHE  
PEDRA DO CAVALO, SALVADOR-BA.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em  
Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais,  
Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Orientadora: Prof. Dra. Cássia Juliana Fernandes Torres

Salvador  
2024

**SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA INDUZIDA PELA  
RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGEM: ESTUDO DE CASO UHE  
PEDRA DO CAVALO, SALVADOR-BA.**

**Vinicius Arimateia Ribeiro Oliveira**

## **Resumo**

O presente artigo tem como objetivo avaliar a propagação da onda de cheia mediante a simulação de um cenário hipotético de ruptura da Barragem Pedra do Cavalo, localizada no Estado da Bahia. Este enfoque visa proporcionar uma compreensão aprofundada dos potenciais efeitos associados a eventos de ruptura, fornecendo subsídios relevantes para a formulação de estratégias preventivas e planos de resposta em situações emergenciais. A metodologia adotada para este estudo envolveu a execução de quatro etapas bem definidas, cada uma contribuindo para a compreensão abrangente dos cenários de ruptura considerados. Inicialmente, foi realizado o cálculo da vazão de pico por meio de formulações empíricas, proporcionando uma estimativa precisa das vazões máximas associadas aos eventos de ruptura. Em seguida, desenvolveu-se um hidrograma de ruptura. Posteriormente, foram realizados os cálculos das áreas parciais sob o hidrograma de ruptura, empregando o método dos trapézios. Todas essas etapas foram executadas por meio do desenvolvimento de um código em Python, garantindo uma abordagem sistemática e eficiente na análise dos cenários de ruptura. Como resultado, foram gerados mapas de inundação e velocidade máxima por meio da simulação de uma ruptura hipotética utilizando o software HEC-RAS 2D.

**Palavras-chave:** Segurança de barragem, HEC-RAS 2D, Ruptura hipotética.

## **Abstract**

The objective of this paper is to assess flood wave propagation by modeling a hypothetical scenario of the Pedra do Cavalo Dam, situated in Bahia state, breaking. This methodology aims to offer a thorough comprehension of potential impacts linked with rupture incidents, thereby supplying pertinent insights for the development of preventive measures and emergency response plans. The methodology implemented in this study encompassed four distinct phases, each contributing to a comprehensive understanding of the rupture scenarios under consideration. Initially, peak flow was computed using empirical formulations, yielding precise estimations of maximum flows associated with rupture occurrences. Following this, a breach hydrograph was constructed. Subsequently, partial areas under the breach hydrograph were determined utilizing the trapezoidal method. All these procedures were executed using Python code, ensuring a methodical and effective approach to scrutinizing rupture scenarios. Consequently, flood and maximum velocity maps were generated through simulation of a hypothetical breach employing HEC-RAS 2D software.

**Keywords:** Dam safety, HEC-RAS 2D, Hypothetical failure.

# 1. INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas de barragem emerge como um método altamente eficaz para viabilizar a implementação dos múltiplos usos da água. Dentre esses usos, destacam-se o abastecimento sustentável de água, operação do reservatório para liberação de fluxo para jusante e o efeito de sua presença para desenvolvimento regional. Este enfoque demonstra-se capaz de proporcionar uma série de benefícios (Ana, 2017).

Entretanto, a implementação dessas estruturas não está isenta de impactos significativos. Conforme elucidado por Luz *et al.* (2005), tais interferências têm início durante a fase construtiva da barragem, a qual se caracteriza pelo desvio do curso fluvial, desmatamento para a preparação do terreno e subsequente formação do reservatório artificial a montante. Um outro aspecto crítico de análise está associado à possibilidade de ruptura da estrutura, uma vez que a falha em uma barragem implica em um considerável risco para a população que reside no vale a jusante, devido ao potencial de propagação de extensas ondas de inundação, a exemplo, as inundações resultantes do transbordamento nas porções superiores do Rio Paraguaçu-BA e seus afluentes que foram abordadas por Silva (2016).

Contudo, diante da necessidade de prevenir e mitigar os riscos associados a deficiências estruturais e ao aumento do passivo de barragens em condições de segurança precárias, foi promulgada a Política Nacional de Segurança de Barragens. (PNSB) por meio da Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 alterada pela Lei 14.066 que tem, entre seus objetivos, o de garantir a observância de padrões mínimos de segurança de barragens de maneira a reduzir as possibilidades de acidentes e suas consequências, visando à proteção da população e do meio-ambiente.

Com a criação da Lei nº 14.066 os dispositivos da Lei nº 12.334/2010 são alterados, dentre elas, as obrigações e as responsabilidades dos empreendedores e dos órgãos fiscalizadores de barragens quais foram claramente definidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Os empreendedores assumem a responsabilidade pela segurança das barragens, enquanto os órgãos fiscalizadores têm o dever de cadastrar e classificar as barragens de acordo com a Categoria de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA), utilizando critérios estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Entre as atribuições dos órgãos fiscalizadores destacam-se exigir do empreendedor a anotação de responsabilidade técnica, por profissional habilitado pelo Sistema Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (Confea) / Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (Crea), dos estudos, planos, projetos, construção, inspeção e demais relatórios.

Entre as diversas obrigações atribuídas pela Lei 14.066 ao empreendedor, destaca-se a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido, e sua implementação em coordenação com o órgão de proteção e defesa civil. O PAE é um documento elaborado com objetivo de minimizar um desastre obrigatório para todas as barragens classificadas DPA (dano potencial associado) médio e alto ou CRI (classificação de risco) alto. Esse processo de classificação de barragens envolve etapas: levantamento das informações necessária as quais consistem em MDT (Modelo digital de terreno) ou MDE (Modelo digital de elevação), volume do reservatório, altura da barragem; definição da área potencialmente afetada.

A definição da área afetada envolve determinar a distância máxima a jusante em que uma onda de cheia resultante do rompimento de uma barragem é amortecida, empregando critérios baseados no volume e na altura da barragem. Isso pode ser limitado pelo ponto do rio em que a onda de cheia se restringe à calha natural do rio, sem adicionar danos além dos provocados pela cheia natural. Modelos simplificados de simulação ou estudos de rompimento de barragem (dam break) podem auxiliar nessa definição.

Esses modelos possibilitam a avaliação do risco de inundação, determinando a magnitude da onda de cheia resultante de possíveis falhas no barramento. A partir desses modelos, é factível elaborar um PAE que inclua estimativas da profundidade e velocidade da água, bem como o tempo estimado para a chegada da onda de cheia a jusante do barramento (BHARTI *et al.*, 2020). Essas ferramentas representam recursos que facilitam a avaliação do potencial impacto resultante do eventual rompimento da barragem sobre a população e a infraestrutura situadas a jusante.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo avaliar a propagação da onda de cheia mediante a simulação de um cenário hipotético de ruptura da Barragem Pedra do Cavalo, localizada no Estado da Bahia. Este enfoque visa proporcionar uma compreensão aprofundada dos potenciais efeitos associados a eventos de ruptura, fornecendo subsídios relevantes para a formulação de estratégias preventivas e planos de resposta em situações emergenciais.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

A segurança das barragens é importante e necessária para proteger vidas humanas, infraestruturas e o meio ambiente de potenciais acidentes e/ou incidentes que podem ocorrer associadas a essas estruturas. A implementação eficaz da PNSB visa garantir que as barragens sejam construídas, operadas e mantidas de maneira segura, reduzindo assim os riscos de rompimento e os impactos negativos associados a esses eventos. Para isso, é necessária uma correta classificação das barragens quanto ao seu potencial de risco e dano potencial. Tal avaliação possibilita a implementação de medidas de mitigação adequadas, contribuindo para assegurar a segurança das comunidades residentes nas proximidades dessas obras e para a preservação do meio ambiente circundante. Este item aborda os aspectos relevantes para a compreensão do tema em estudo, destacando-se a segurança de barragens, a análise conceitual de risco, as causas comuns de ruptura de barragens e, por fim, oferece um breve contexto sobre a modelagem hidrodinâmica com HEC-RAS aplicada ao rompimento de barragens.

### **2.1 Segurança de barragens**

As estruturas de represamento de cursos d'água, de origem antropogênica, têm desempenhado um papel fundamental na adaptação das sociedades ao ambiente natural e na promoção da melhoria da qualidade de vida das populações desde os primórdios. Ao longo de um período histórico abrangente de 5.000 anos, as barragens têm sido empregadas para a acumulação estratégica de água durante períodos de disponibilidade, viabilizando sua distribuição em momentos de escassez nos cursos d'água. Além disso, tais estruturas contribuem para mitigar os efeitos adversos decorrentes de eventos extremos, como secas e cheias, exercendo um papel significativo na gestão hídrica e no equilíbrio ambiental (BRASIL, 2010; ANA, 2017).

No contexto brasileiro, as barragens desempenham uma função primordial na garantia do acesso à água em conformidade com padrões adequados, os quais abarcam aspectos como quantidade, qualidade, localização e disponibilidade temporal. Esta dependência confere às barragens um estatuto de infraestrutura crucial para o fomento do desenvolvimento sustentável. Dentre as principais aplicações atribuídas a essas estruturas, destacam-se: abastecimento de água, irrigação, controle de cheias, dessedentação animal, aquicultura, navegação interior, recreação, paisagismo, disposição de rejeitos de mineração e acumulação de resíduos industriais líquidos. Adicionalmente, a geração hidrelétrica, apresentando elevada importância no contexto nacional (ANA, 2017).

Uma das legislações mais relevantes nesse contexto é a Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a primeira regulamentação no ordenamento jurídico pátrio que tratou, especificamente, da segurança de barragens. Esta lei estabelece os princípios, diretrizes e instrumentos para a segurança de barragens destinadas à acumulação de água para

quaisquer usos, bem como à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Além disso, a PNSB criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), responsável pelo registro, acompanhamento e divulgação de informações sobre a segurança das barragens no país.

Os objetivos específicos delineados pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estão dispostos no artigo 3º da Lei nº 12.334/2010, nos quais se destacam:

- a) Assegurar a conformidade com os padrões de segurança estabelecidos para barragens, visando promover a prevenção e reduzir a possibilidade de acidentes ou desastres, bem como suas consequências;
- b) Estimular o monitoramento e a supervisão das medidas de segurança implementadas pelos responsáveis pelas barragens;
- c) Proporcionar condições para a ampliação do escopo de controle das barragens pelo poder público, por meio da realização de atividades de fiscalização, orientação e correção das práticas relacionadas à segurança;
- d) Coletar informações que subsidiem a gestão da segurança das barragens por parte das autoridades governamentais;
- e) Promover a disseminação da cultura de segurança de barragens e a prática de gestão de riscos;
- f) Estabelecer protocolos emergenciais e incentivar a cooperação entre empreendedores, órgãos fiscalizadores e entidades de proteção civil em situações de incidentes, acidentes ou desastres.

No entanto, foi promulgada em 24 de setembro de 2020 a Lei 14.066. Essa lei alterou a Lei nº 12.334/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e trouxe importantes atualizações e aprimoramentos nas normas e diretrizes para o setor de segurança de barragens no país. Entre as principais mudanças introduzidas pela Lei 14.066, destacam-se a definição de novos critérios e procedimentos para classificação de barragens, aprimoramento das responsabilidades dos empreendedores e órgãos fiscalizadores, reforço das exigências para o Plano de Segurança de Barragens (PSB) e a criação do Cadastro Nacional de Barragens.

A legislação também incorpora à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) uma série de obrigações atribuídas ao empreendedor responsável pela gestão dessas estruturas. Dentre essas obrigações, destaca-se a exigência de comunicação imediata ao órgão fiscalizador, ao órgão ambiental e à defesa civil sobre quaisquer alterações nas condições de segurança da barragem que possam acarretar acidentes ou desastres. Além disso, visa fortalecer a segurança das barragens e reduzir os riscos associados a essas estruturas, estabelecendo padrões mais rigorosos de monitoramento, fiscalização e prevenção de acidentes. Além disso, a Lei 14.066 busca promover uma maior transparência e participação da sociedade no processo de gestão e segurança de barragens, contribuindo para a proteção das comunidades e do meio ambiente.

No entanto, as barragens necessitam de um conjunto de medidas e procedimentos destinados a garantir a integridade e estabilidade de suas estruturas, bem como a prevenção de acidentes que possam ocorrer em decorrência de seu funcionamento. No Brasil, a segurança de barragens é trabalhada por meio de diversas legislações e normativas que estabelecem diretrizes, critérios e procedimentos para o planejamento, construção, operação, manutenção, monitoramento e fiscalização dessas estruturas.

## **2.2 Risco nos vales a jusante de barragens: uma análise conceitual**

A discussão acerca dos riscos, especialmente os relacionados a desastres, tem recebido cada vez mais atenção no cenário social contemporâneo. Este tema representa um dos conceitos fundamentais no âmbito da Proteção e Defesa Civil, exigindo uma análise profunda das medidas que podem ser implementadas antes da ocorrência de eventos catastróficos. O risco é um indicador de segurança que está associado à probabilidade de ocorrência de eventos disruptivos capazes de modificar o estado

atual ou esperado de uma estrutura, resultando em danos. Conforme destacado por Almeida (2001), da mesma forma que em outros sistemas tecnológicos, a segurança absoluta das barragens não pode ser assegurada. Portanto, é crucial realizar um acompanhamento contínuo da segurança das barragens para reduzir e/ou controlar os riscos existentes, incluindo o risco de ruptura.

A pesquisa conduzida por Almeida (2001) analisou os registros históricos de ruptura em diversos tipos de barragens. Os resultados demonstram que as estruturas mais suscetíveis a rompimentos são aquelas de menor porte, uma vez que 70% dos acidentes ocorrem em barragens com altura inferior a 30 metros. Segundo o Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1995), 38% das rupturas ocorrem durante a fase inicial de enchimento, um momento crítico em que a estrutura é submetida à carga e testada. A ruptura de barragens pode ocorrer devido a várias causas, incluindo galgamento, erosão interna, deslizamento, entre outras. Uma análise estatística apresentada no Boletim 99 do ICOLD (1995) concluiu que as barragens de terra são mais suscetíveis à ruptura por galgamento, enquanto as barragens de concreto têm maior tendência a sofrer ruptura por erosão interna (MENEZES, 2016).

A ruptura de uma barragem tem uma série de consequências adversas para as áreas situadas a jusante, destacando-se, entre elas a possibilidade de uma inundação súbita e catastrófica. Isso não apenas causa danos materiais significativos, mas também resulta em perda de vidas humanas. Além disso, o rompimento da barragem pode levar ao arrastamento de sedimentos do reservatório, causando erosão do solo e obstrução dos cursos d'água, prejudicando o meio ambiente e a qualidade da água. A liberação rápida de água e sedimentos também pode danificar a infraestrutura existente a jusante, como estradas, pontes e sistemas de água e esgoto, afetando a mobilidade e o acesso a serviços essenciais. O impacto socioeconômico de um rompimento de barragem pode ser significativo, com as comunidades ao seu entorno resultando em perdas de moradias e meios de subsistência. Há também preocupações com a saúde pública, uma vez que a inundação de áreas habitadas pode aumentar o risco de doenças transmitidas pela água e exposição a contaminantes.

No caso do Brasil pode-se citar os seguintes acidentes com barragens: Barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015, na região de Mariana, no estado de Minas Gerais. Esse evento resultou na disseminação de grandes volumes de rejeitos ao longo do vale a jusante, ocasionando danos consideráveis à localidade de Bento Rodrigues, bem como ao ecossistema ao longo do curso do Rio Doce, estendendo-se até sua desembocadura em Regência, no estado do Espírito Santo (ALMEIDA *et al.*, 2021). Em menos de três anos após este ocorrido, janeiro em 2019, ainda em território brasileiro, a barragem de contenção de rejeitos “Barragem I”, no município de Brumadinho, estado de Minas Gerais, foi registrado o rompimento que ocasionou o vazamento estimado de 11,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos. Esse evento resultou em um grande número de desabrigados e causou mais de 300 mortes, conforme relatado por Rezende e Silva (2019).

Em 17 de junho de 2004, ocorreu uma ruptura em uma seção da Barragem do Camará. Esse incidente suscitou questionamentos na sociedade sobre os procedimentos relacionados à construção da barragem e as circunstâncias que levaram ao acidente. Onze dias após o evento inicial, a porção a jusante da barragem encontrava-se posicionada sobre o ponto de falha geológica, o qual resultou no rápido esvaziamento da estrutura (NETO *et al.*, 2017).

Em 9 de maio de 1985, houve o rompimento da barragem Santa Helena, localizada no estado da Bahia, resultando na completa destruição da ombreira esquerda e deixando apenas 160 metros da ombreira direita intactos. Após investigação conduzida pela Junta de Consultores, concluiu-se que a ruptura foi causada pelo mau comportamento hidráulico da obra, iniciado pelo deslocamento ou destruição das lajes do canal sangradouro devido ao aumento do nível do rio a jusante da barragem, excedendo o previsto em projeto e causando maior subpressão na laje afetada (Menezes, 2016).

A existência desses eventos em várias partes do mundo ressaltou a necessidade crucial de gerenciar o risco de ruptura de barragens, visando mitigar a probabilidade de acidentes e seus impactos associados. Por conseguinte, torna-se imprescindível implementar medidas de gestão de riscos de ruptura de barragens mais eficazes, incluindo o monitoramento constante das condições das estruturas, a manutenção preventiva e a elaboração de planos de emergência abrangentes. A avaliação contínua dos riscos é essencial para garantir a segurança das comunidades e do meio ambiente nas áreas a jusante das barragens.

### **2.2.1 Anomalias comuns em barragens**

As deteriorações, agora referidas como anomalias de barragem conforme a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), englobam qualquer alteração que afete negativamente o comportamento da estrutura, seja ela visível ou não. Segundo a Resolução ANA 742/2011, uma anomalia é definida como qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa comprometer a segurança da barragem, tanto a curto quanto a longo prazo. A anomalia representa a observação de um comportamento anormal na estrutura, indicando a necessidade de ação para restaurar a operação normal e determinar o nível de intervenção exigido.

As barragens devem ser estruturas estáveis e impermeáveis, ou pelo menos controladamente permeáveis. As principais formas de deterioração estão relacionadas a esses dois aspectos. Além disso, algumas anomalias podem afetar o funcionamento de estruturas adjacentes, como vertedouros e condutos. As deteriorações em barragens de concreto podem ser classificadas de acordo com sua natureza em diferentes tipos distintos que são agrupados em três categorias principais (NEVILLE, 2011):

- Deterioração físico-mecânica, que está relacionada à ação mecânica do ambiente sobre a estrutura, incluindo fissuração e erosão;
- Deterioração físico-química, que se refere à ação físico-química do meio sobre a estrutura, como expansão por sulfatos, lixiviação e reações químicas nos componentes do concreto;
- Corrosão da Armadura, que está associada a fenômenos eletroquímicos.

Além dessas categorias, existem também as deteriorações construtivas, originadas durante a fase de construção, e as deficiências resultantes de anomalias no concreto, como deslocamentos e vazamentos. Por fim, há as deteriorações causadas por acidentes durante a operação da estrutura, como manchas e danos por impacto.

As barragens de aterro são classificadas em duas categorias principais: superficiais e profundas ou internas. As superficiais são aquelas que surgem na superfície externa ou em uma pequena profundidade abaixo da camada superficial do solo. Em alguns casos, essas anomalias podem ser simples e ter pouca importância. No entanto, em outros casos, elas podem indicar uma ameaça significativa à segurança da barragem. Já as anomalias profundas ou internas ocorrem em profundidade, abaixo da camada superficial do solo. Em alguns casos, essas anomalias podem se estender até a superfície ou apresentar ramificações. Identificar e diferenciar essas anomalias pode ser desafiador, especialmente quando representam problemas mais complexos e graves do que aparentam inicialmente.

A classificação das anomalias que comprometem a segurança de barragens em modos de falha, os quais representam os mecanismos pelos quais uma barragem pode se romper. Esses modos de falha incluem Movimentação de Massa (Instabilidade Estrutural), Falhas Hidráulicas e Erosão Interna. Historicamente, a grande maioria desses modos de falhas em barragens tem sido atribuída a fenômenos como galgamento, piping e falha na fundação, resistência insuficiente dos materiais, especialmente por superfícies de descontinuidade pela fundação, trincas e fissuras devidas a recalques

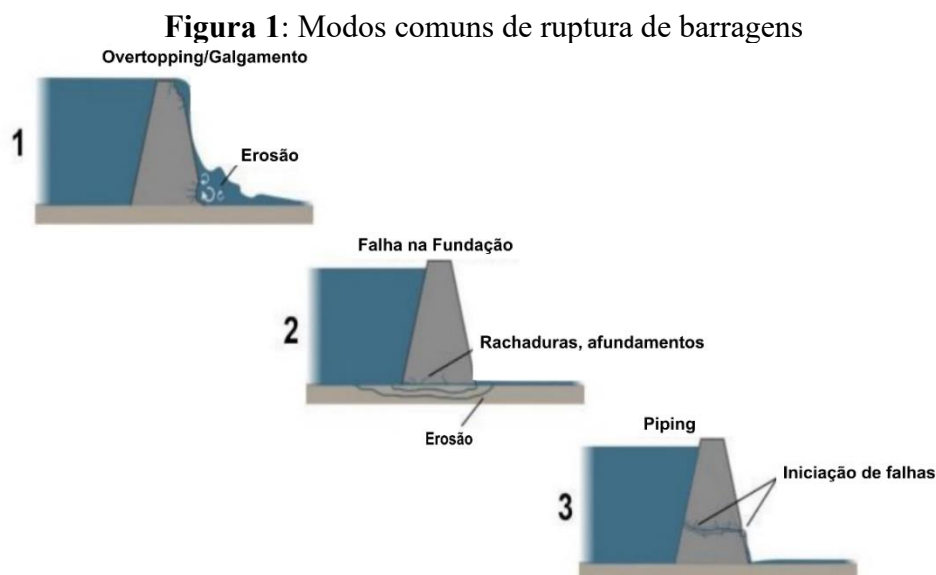


e/ou ressecamento dos solos, com os efeitos resultantes de erosão interna, conforme Figura 1 (ICOLD,1995; SHAHRIM e ROS, 2020; RONG et al., 2020; BHARTI et al. 2020).

O galgamento/overtopping, por exemplo, ocorre quando o vertedouro da barragem não é capaz de escoar completamente a vazão de água proveniente da cheia que atinge o reservatório. Esse fenômeno ocorre quando parte da vazão proveniente das águas afluentes passa sobre a barragem em áreas não destinadas à saída de água, desencadeando um processo de ruptura do maciço da estrutura. Essa situação pode ser ocasionada por diversos fatores, como a operação inadequada do reservatório, quando o vertedouro não consegue escoar a quantidade de água além de sua capacidade de descarga, ou pela formação de uma onda de cheia dentro do reservatório, seja por origem sísmica ou devido ao deslizamento de terra das encostas. Quando o galgamento persiste por tempo e intensidade suficientes, pode dar início ao processo de formação de brecha no ponto mais vulnerável do coroamento. Esse processo evolui ao longo do tempo por meio de erosão, cuja velocidade de formação depende das características da barragem e do material envolvido (COLLISCHONN, 1997).

Quando os aterros e suas fundações estão sujeitos à influência da água de percolação proveniente do reservatório. É crucial controlar a percolação da água no aterro, fundações e ombreiras, a fim de mitigar o risco de fenômenos de erosão interna/piping. Fenômeno conhecido como falha por piping é caracterizado pela erosão regressiva, na qual um tubo é formado a partir do transporte de grãos do maciço da barragem, indo de jusante para montante (LADEIRA *et al.*, 2007). Quando a água de percolação emerge de forma descontrolada na região inferior do talude de jusante da barragem, o fenômeno de erosão interna geralmente se combina com um aumento excessivo da poropressão no corpo da barragem ou na fundação, acompanhado pela redução da resistência dos materiais do aterro devido à sua saturação correspondente. Esses fenômenos podem resultar na ruptura da barragem.

As falhas nas fundações de uma barragem representam uma preocupação significativa em termos de segurança e estabilidade da estrutura. Essas falhas podem ocorrer devido a uma variedade de fatores, incluindo características geológicas desfavoráveis do terreno, deficiências na concepção ou execução da fundação, e ações externas como sismos ou erosão. As acomodações geológicas resultantes do enchimento do reservatório ou da saturação do material da fundação por infiltração podem levar ao deslizamento do terreno sobre o qual a barragem está assentada. Adicionalmente, as cheias extraordinárias representam uma ameaça às fundações, especialmente quando ocorre o fenômeno de galgamento, no qual a água que passa sobre a barragem provoca a erosão da base da estrutura, conforme mencionado por COLLISCHONN (1997).



Fonte: Adaptado de Bharti et al.,2020.

### **2.2.2 Gestão do risco de ruptura de barragens**

A gestão do risco de ruptura de barragens compreende um conjunto de práticas e procedimentos voltados para a identificação, avaliação, mitigação e controle dos riscos associados à possibilidade de rompimento dessas estruturas. Seu propósito é assegurar a segurança das barragens e das comunidades situadas a jusante delas. Embora se reconheça a baixa probabilidade de ruptura de uma barragem, conforme evidenciado por análises estatísticas realizadas pelo ICOLD (1995), essa frequência reduzida de eventos é atribuída aos avanços nas técnicas de investigação e ao aprimoramento do conhecimento sobre os riscos envolvidos.

Para minimizar a possibilidade de ocorrência de acidentes em todas as fases (projeto, obra e operação) dessas estruturas, é necessário um conjunto de ações que visem à prevenção e mitigação dos riscos. Para isso, é fundamental garantir diversos aspectos, como a segurança estrutural, o monitoramento da barragem e do reservatório, e o planejamento de emergências. A segurança estrutural está intrinsecamente ligada a projetos e construções adequadas, refletindo o investimento financeiro realizado nas fases de projeto e obra. Por outro lado, o monitoramento e o planejamento de emergência visam controlar o risco remanescente, o qual deve ser reduzido ao mínimo possível, respeitando as exigências técnicas e as limitações financeiras ( BIEDERMANN ,1997 citado por MEDEIROS ,2013).

O processo de gestão do risco de ruptura de barragens envolve duas etapas essenciais: avaliação e mitigação. Na fase de avaliação, são realizadas análises para compreender o risco de ruptura e suas consequências, seguida pela apreciação do risco, que inclui a comparação do risco estimado com critérios de aceitabilidade. A mitigação do risco é alcançada por meio de procedimentos de prevenção, que buscam reduzir a probabilidade de acidentes, e de preparação, que visa minimizar os danos caso ocorra um acidente (VISEU & ALMEIDA, 2011).

Durante a fase de avaliação do risco de ruptura de uma barragem, são analisados os possíveis modos de falha da estrutura, juntamente com os eventos que poderiam desencadear uma ruptura e as potenciais consequências dessa ocorrência. Esse processo desempenha um papel crucial ao permitir a classificação dos danos conforme as normas e diretrizes internacionais sobre a tolerância aos riscos. Tal abordagem não apenas oferece uma base para comparar diversos sistemas de barragens e vales de forma uniforme, mas também facilita a alocação eficiente de recursos para reduzir o risco, seguindo critérios de priorização estabelecidos ( FUSARO, 2003; MENEZES,2016).

A etapa final da gestão do risco é a mitigação, que envolve medidas para reduzir tanto o risco associado à própria estrutura da barragem quanto ao território situado a jusante. Isso abrange a prevenção de incidentes por meio do reforço da segurança da barragem e do planejamento do uso do solo para minimizar a vulnerabilidade do vale adjacente. Estas ações têm como objetivo proteger as comunidades locais e o meio ambiente contra possíveis impactos negativos. Dentre as principais medidas mitigadoras do risco, que visam reduzir significativamente o potencial número de vítimas, estão a implementação de um sistema de alerta à população conectado à equipe responsável pelo controle e operação da barragem, a elaboração de um plano de evacuação com base no mapa de inundação fornecido pelo proprietário da barragem e a preparação de um plano de emergência para gerenciamento de possíveis crises. Esse plano inclui diretrizes para ações de resgate, recuperação e a realização de treinamentos, exercícios e simulações dos sistemas de alerta e aviso (VISEU & ALMEIDA, 2011; ALMEIDA, 2015).

O Plano de Ação de Emergência (PAE) é uma ferramenta fundamental na preparação para emergências, estabelecendo responsabilidades, procedimentos e estratégias de resposta. É uma medida essencial de mitigação do risco, visando a redução de danos e perdas de vidas em situações críticas. As recomendações da Eletrobrás (2003) estabelecem os elementos essenciais para o Plano de Ação de Emergência (PAE) em barragens no Brasil, incluindo a identificação de emergências,

ações preventivas, procedimentos de notificação, sistemas de comunicação, acesso ao local, resposta em situações adversas, disponibilidade de recursos, mapas de inundação e sistemas de advertência. O PAE deve ser implementado, testado e atualizado pelo proprietário da barragem, que é responsável por envolver as instituições e indivíduos necessários para uma resposta eficaz em caso de emergência.

### **2.3 Modelagem Hidrodinâmica com HEC-RAS aplicada para rompimento de barragem**

O HEC-RAS (2010) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) com o propósito de gerenciar e controlar rios, canais, portos e outras obras públicas. Este *software* realiza simulações abrangendo fluxo estável unidimensional, fluxo instável unidimensional e bidimensional, transporte de sedimentos, cálculos de leito e modelagem da temperatura/qualidade da água (VOJTEK *et al.*, 2019).

Conforme mencionado por Lauriano (2009), o usuário tem a capacidade de configurar uma modelagem com escoamento permanente ou não permanente, simulada por meio do algoritmo UNET (*Unsteady NETWORK model*) presente no *software*. Os resultados obtidos com o algoritmo UNET são posteriormente importados de volta para o HEC-RAS, onde podem ser visualizados por meio de simulações. Os resultados do modelo hidráulico são então representados por meio de um Modelo Digital do Terreno (MDT). Isso é realizado utilizando o *software* HEC-GeoRAS, que se integra ao *software* de geoprocessamento ArcView, possibilitando a criação de mapas de inundação.

Conforme apontado por Brunner (2015), o HEC-RAS representa um pacote de *software* hidráulico fluvial amplamente difundido globalmente. Inicialmente, o modelo estava restrito a cálculos hidráulicos unidimensionais de rios. Entretanto, nos últimos anos, a equipe técnica responsável pelo desenvolvimento do programa tem se dedicado à realização de análises de segurança de barragens, as quais demandam modelagens hidráulicas detalhadas e análises de risco e incerteza. Em resposta à significativa demanda e necessidade do setor, a ferramenta foi aprimorada para possibilitar a execução rápida e robusta de hidrodinâmica combinada 1D e 2D. Devido às exigências inerentes à análise de segurança de barragens e diques, o HEC-RAS evoluiu e incorporou a hidrodinâmica bidimensional em seu mecanismo computacional de fluxo instável. Consequentemente, atualmente o *software* dispõe da capacidade de realizar modelagem hidrodinâmica 1D, 2D e 1D/2D de maneira integrada.

Trabalhos como de Mulongo (2012) utilizou os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para analisar inundações na bacia hidrográfica do Campus da UFSC, após uma enchente significativa em 1995. O objetivo foi monitorar mudanças recentes e preparar-se para futuros eventos. O HEC-HMS determinou a vazão a partir de dados pluviométricos, enquanto o HEC-RAS estimou os níveis d'água, contribuindo para a construção de um sistema de suporte à decisão eficaz. Esse estudo destaca a eficácia dos modelos hidrodinâmicos na prevenção e mitigação de desastres.

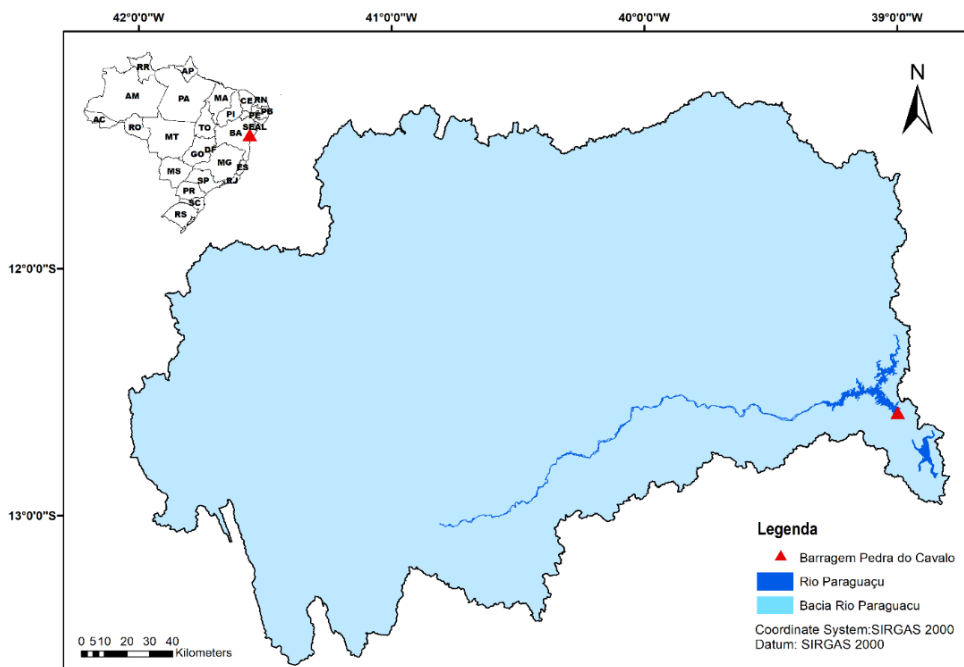
## **3. MATERIAS E MÉTODOS**

A metodologia adotada neste estudo foi organizada em cinco etapas distintas. Inicialmente, procedeu-se à delimitação e caracterização da área de estudo. Em seguida, foram estabelecidos os cenários de ruptura, abrangendo uma perspectiva otimista e outra pessimista. Posteriormente, foram conduzidas análises das vazões de pico utilizando diferentes formulações matemáticas. Com base nos resultados das vazões de pico, tempo de pico e tempo de base, elaborou-se o hidrograma de ruptura por meio de um código desenvolvido em linguagem Python. Após a seleção da vazão de pico mais adequada, que correspondesse ao volume do reservatório, utilizando a técnica de somatório de áreas parciais, em linguagem Python. Com o hidrograma selecionado, procedeu-se à simulação da propagação da onda de cheia na região de interesse, resultando na elaboração de um mapa de inundação

## **CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO**

A Usina Hidrelétrica (UHE) de Pedra do Cavalo encontra-se localizada nas coordenadas 12°35'11.3"S e 38°59'50.9"W situada às margens do rio Paraguaçu, conforme Figura 2, cuja nascente provém da região da Chapada Diamantina. A referida usina está aproximadamente a 2 km das sedes municipais dos municípios de Cachoeira e São Félix, a uma distância de 120 km da capital do Estado da Bahia, Salvador. O curso d'água do rio Paraguaçu culmina em sua desembocadura no estuário da Baía do Iguape, localizado no município de Maragogipe. Esse trecho apresenta um relevo bastante acidentado, formado por depressões e bancos arenosos. Diante desse cenário, a estrutura vigente desempenha um papel crucial no fornecimento de água para a cidade de Salvador, enquanto a região a jusante deste barramento compreende um município dotado de relevância histórica e social para o Estado da Bahia.

**Figura 2:** Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Própria do autor.

A Barragem de Pedra do Cavalo é uma estrutura de considerável magnitude, composta por um barramento principal, dois diques auxiliares e um vertedouro controlado por comportas. Esta obra constitui-se como uma barragem de terra com núcleo argiloso e face revestida com enrocamento (Votorantim, 2022). Além disso, possui um vertedor equipado com cinco comportas setoriais, com uma extensão total de 297 metros, uma tomada d'água composta por quatro condutos forçados e uma casa de força projetada para alojar quatro turbinas, cada uma com capacidade de 150 MW, conforme a Figura 3 e o Quadro 1.

**Figura 3:** Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.



Fonte: Votorantim Energia (2022).

Quanto às suas especificações hidráulicas, a Barragem possui um volume de armazenamento estimado em 4,631 km<sup>3</sup>, altura a partir da fundação igual a 142,0 m, comprimento da barragem principal de 470 m, vazão máxima diária 5.198 m<sup>3</sup>/s, capacidade máxima de vertimento de 12.000 m<sup>3</sup>/s, nível máximo normal de 114,5 m, cota máxima de operação igual a 120,0 m e vazão máxima de restrição de 1.500 m<sup>3</sup>/s por risco eminente de inundação de cidades próximas (ANEEL, 2022 citado por VIEIRA *et al.*, 2019). Essa estrutura foi inicialmente projetada visando atender aos usos múltiplos da água armazenada em seu reservatório. Desde sua concepção, destacam-se a captação de água para abastecimento urbano, abrangendo a região metropolitana de Salvador e outras cidades próximas à barragem, e o controle de enchentes a jusante, especialmente nas cidades de Cachoeira e São Félix. Esses propósitos foram efetivamente implementados até o ano de 2005, quando passou a ser explorada também para a geração de energia elétrica.

**Quadro 1:** Características Técnicas da UHE Pedra do Cavalo.

<b>UHE Pedra do Cavalo</b>	
Município	Cachoeira — BA
Nome de Curso de Água	Rio Paraguaçu
Área de Drenagem	53.108 km <sup>2</sup>
<b>Dados Técnicos da Barragem</b>	
Tipo	Terra
Altura mix. acima da fundação (m)	142
Extensão do coroamento (m)	470
Crista (m)	125,50
<b>Reservatório</b>	
Nível mínimo operacional (NMO) (m)	120
Nível máximo normal (NMN) (m)	114.5
Nível máximo maximorum (NMM) (m)	124
Área inundada (km <sup>2</sup> ) NMM	185,9
Volume (hm <sup>3</sup> ) (NMM)	4836
<b>Estrutura Extravasora — Vertedouro</b>	
Tipo	Concreto
Elevação Soleira Projeto (m)	106
Largura útil (m)	15
Número de comportas	5
Capacidade de descarga (m <sup>3</sup> /s)	106

Fonte: Aneel (2022); Embasa (2014) citado por Machado (2022) e Vieira (2019).

### 3.1 Determinação do hidrograma de ruptura

#### 3.1.1 Cenários de ruptura

Um cenário de ruptura consiste em uma conjunção singular de condições em um determinado ambiente, que incluem fatores como o evento inicial que desencadeia a ruptura, a velocidade do vento, o nível da água no reservatório, a posição das comportas, o modo pelo qual ocorre a ruptura, a onda de inundação resultante desse evento e os elementos que influenciam a presença de pessoas no vale a jusante da barragem no momento da ruptura, conforme descrito por Balbi (2008). Brasil (2005) recomenda a consideração de quatro cenários representativos em estudos de ruptura de barragens:

- Cenário 1 ou cenário extremo de ruptura, delimita a área de risco máxima a jusante sendo crucial para estabelecer sistemas de alerta e emergência;
- Cenário 2 ou cenário de ruptura mais provável, é mais adequado para situações realistas e pode ser utilizado para planejamento do uso e ocupação do solo na área afetada;
- Cenário 3, foca apenas na ruptura da barragem, desconsiderando a contribuição do hidrograma natural afluente ao reservatório;

- Cenário 4 ou cenário de operação sob condições extremas, considera um evento de cheia que leva o sistema extravasor da barragem a operar em condições críticas, sem, no entanto, resultar no colapso da estrutura.

Com o intuito de avaliar a propagação das cheias em cenários mais próximos da realidade, foram estabelecidos dois cenários, sendo admitido o nível máximo normal (NMN) (cenário otimista) e outro no nível máximo maximorum (NMM) (cenário pessimista). O Quadro 2 apresenta os detalhes dos cenários adotados neste estudo de rompimento.

**Quadro 2:** Cenários simulados

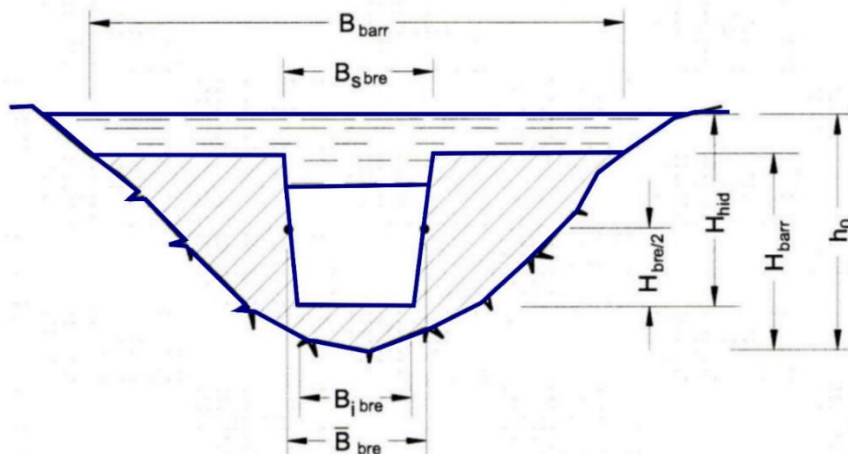
<b>Cenário Otimista (NMN)</b>	
<b>Cota (m)</b>	114.50
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	106.42
<b>Volume (hm<sup>3</sup>)</b>	2765.65
<b>Cenário Pessimista (NMN)</b>	
<b>Cota (m)</b>	124.00
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	185.90
<b>Volume (hm<sup>3</sup>)</b>	4836.00

Fonte: Própria do autor.

### 3.1.2 Caracterização e tempo de formação de brecha

O processo de ruptura e formação da brecha em barragens influencia significativamente o hidrograma de saída. No entanto, os mecanismos reais por trás desse processo não são totalmente compreendidos, tanto para barragens de concreto quanto para as de terra. Existem diferentes modelos, como os baseados em equações empíricas, físicos ou semi-físicos, estocásticos e paramétricos, que tentam explicar a formação da brecha (ALMEIDA *et al.*, 2003). As características geométricas da brecha, como sua largura, altura e inclinações laterais, juntamente com o tempo transcorrido desde o início do colapso, taxa de evolução da abertura são diretamente influenciadas pelo tipo (concreto ou de terra) e geometria da barragem, pelas propriedades dos materiais empregados em sua construção, pelo nível da água no reservatório e pelo volume armazenado no momento do rompimento (CHAUHAN *et al.*, 2004).

**Figura 4:** Ilustração típica da brecha em uma barragem de terra



Fonte: Adaptado de Viseu (2006).

Onde :

- $B_{ibre}$ : Largura final da base da brecha;
- $B_{sbre}$ : Largura final do topo da brecha;
- $B_{bre}$ : Largura média da brecha;



- $B_{bar}$ : Largura da Barragem;
- $H_{bre/2}$ : Altura média da brecha;
- $H_{barr}$ : Altura da barragem
- $H_{hid}$ : Carga hidráulica máxima sobre a brecha.

Uma abordagem comum para estimar o processo de formação da brecha em uma barragem envolve dois métodos principais: o uso de casos históricos semelhantes ao evento atual e a aplicação de formulações mais complexas que consideram os princípios da hidráulica, transporte de sedimentos e mecânica dos solos. No primeiro método, são utilizados dados de rupturas passadas, que apresentam semelhanças em termos de características da barragem, condições hidrológicas e geológicas. Já no segundo método, são empregados modelos matemáticos e computacionais mais sofisticados, que levam em conta uma variedade de variáveis e processos físicos envolvidos na formação da brecha. Ambos os métodos têm suas vantagens e limitações, e a escolha entre eles depende da disponibilidade de dados, da complexidade do problema e dos recursos disponíveis para análise (WAHL, 2001).

O Quadro 3 apresenta estimativas para o cálculo da geometria da brecha. Dentro do escopo deste estudo, adotou-se o modelo proposto pelo USACE (1980) no cenário otimista para determinar as características da brecha. Neste cenário, a premissa adotada foi que o comprimento da brecha corresponde a 0,5 vezes a altura (H), com um tempo de ruptura de 1 hora. Já no cenário pessimista, utilizou-se a referência de Fread (2006), que estabelece o comprimento da brecha como sendo duas vezes a altura ( $2,0 \times H$ ), com um tempo de ruptura de 0,5 hora. Essa escolha foi baseada no tipo de barragem e nos limites máximo e mínimo para o tempo de ruptura.

**Quadro 3:** Estimativa das características da brecha

Tipo de barragem	Comprimento da brecha $B_b$	Componente horizontal da declividade dos taludes da brecha (H) H:1V	Tempo de ruptura $t_r$ (horas)	Referência
<b>Concreto gravidade</b>	blocos monolíticos	Vertical	0,1 a 0,5	USACE (1980)
	Usualmente $< 0,5 L$	Vertical	0,1 a 0,3	FERC (1988)
	Usualmente $< 0,5 L$	Vertical	0,1 a 0,2	Fread (2006)
	Usualmente $< 0,5 L$	Vertical	0,1 a 0,3	ELETROBRÁS (2003)
<b>Concreto em arco</b>	L	Declividade do vale	$< 0,1$	USACE (1980)
	L	Entre 0 e a declividade do vale	$< 0,1$	FERC (1988)
	$0,8 L$ a $L$	Entre 0 e a declividade do vale	$< 0,1$	Fread (2006)
	L	Entre 0 e a declividade do vale	$< 0,1$	ELETROBRÁS (2003)
<b>Terra / Enrocamento</b>	$(0,5 \text{ a } 3,0) \times H$	Entre 0 e 1	0,5 a 4,0	USACE (1980)
	$(1,0 \text{ a } 5,0) \times H$	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	FERC (1988)
	$(2,0 \text{ a } 5,0) \times H$	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	Fread (2006)
	$(2,0 \text{ a } 4,0) \times H$	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	ELETROBRÁS (2003)
Onde:				
H - altura da barragem (m)				
L - Comprimento da crista da barragem (m)				

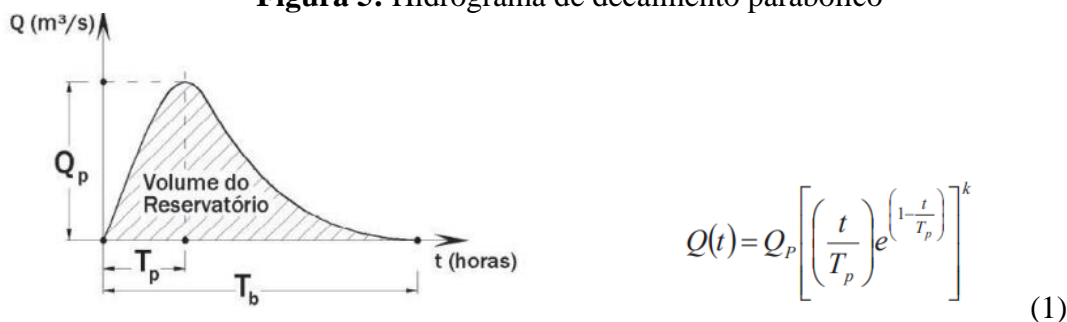
Fonte: USACE, 1980 citado por GEE e BRUNNER, 2007; Lariano, 2016.

### 3.1.3 Determinação do hidrograma de ruptura

Para simular o evento de ruptura de uma barragem, é crucial inicialmente identificar a vazão de pico e desenvolver o hidrograma que representa a vazão defluente no momento da ruptura, conforme a figura 5. Essa análise requer a determinação das características essenciais da formação da brecha, incluindo sua geometria e o tempo necessário para sua formação completa. Esses parâmetros são

fundamentais para compreender e modelar adequadamente o processo de ruptura, permitindo uma simulação precisa dos eventos hidrológicos associados à falha da estrutura da barragem.

**Figura 5:** Hidrograma de decaimento parabólico



Onde:

$Q_p$ = Vazão de pico;

$T_p$ = tempo de pico;

$k$ : Fator de ponderação. Sendo calibrado de tal modo que o volume do hidrograma de ruptura seja igual ao volume do reservatório no momento do rompimento (valores entre 0,1 a 0,5).

Fonte: BARFILD et al., 1990.

Para representar o tempo de esvaziamento do reservatório utiliza tanto o hidrograma triangular simplificado (Mascarenhas, 1990) quanto o hidrograma parabólico (Walther, 2000). Esses métodos fornecem uma abordagem eficaz para estimar a evolução do esvaziamento do reservatório ao longo do tempo, o que é crucial para a compreensão do comportamento hidrológico e para orientar as decisões relacionadas à gestão da água. Para este estudo específico, optou-se desenvolver em linguagem Python um código para a construção do hidrograma com decaimento parabólico para representar o comportamento das vazões em cada instante de tempo tendo diferentes formulações matemáticas para determinação da vazão de pico, conforme a tabela 1.

**Tabela 1:** Equações empíricas para determinação da vazão de pico

Ano	Autores	Vazão de pico	Características
1917	Schoklistch (1917)	$Q_P = 8/27 (B_d/B_b)^{1/2} \sqrt{g Y_{\text{médio}}^{3/2}}$	Equação considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem
1977	Kirkpatrick (1977)	$Q_P = 1.268 (H_{\text{hid}} + 0,3)^{2,5}$	Equação considerando 13 casos de ruptura histórica de barragem de terra e 6 casos hipotéticos.
1981	Lou (1981)	$Q_P = 7,683 H_{\text{hid}}^{1,909}$	Fórmula baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa.
1981	Soil Conservation Service (1981)	$Q_P = 16,6 H_{\text{hid}}^{1,85}$	Equação considerando 13 casos históricos de ruptura de barragem utilizados por Kirkpatrick (1977).
1981	Wetmore e Fread (1981)	$Q_P = 1,7 B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[ \frac{1,94 A_s}{(B_b \sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$	Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t)
1982	Hagen (1982)	$Q_P = 1,205 (H_{\text{hid}} V_{\text{res}})^{0,48}$	Desenvolvida com base em 6 casos históricos



1984	Singh e Snorrason (1984)	$Q_P = 13,4H_{barr}^{1,89}$	Baseada na análise de 20 casos de ruptura de barragens de terra e 8 rupturas hipotéticas
1985	Costa (1985)	$Q_P = 0,763(H_{bar}V_{res})^{0,42}$	Equação baseada na amostragem de 31 barragens com características diversas
1986	Evans (1986)	$Q_P = 0,72V_{hid}^{0,53}$	Equação considerando falhas naturais em barragens provocadas pelo homem.
1987	USBR (1982)	$Q_P = 19H_{hid}^{1,85}$	Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina de água no reservatório no momento da ruptura. Foi desenvolvida considerando em média 21 casos de falhas em barragens de concreto em arco e por gravidade.
1989	USBR (1989)	$Q_P = 6,14h_0^{1,81} V_{res}^{0,061}$	Equação melhorada após a apresentação da primeira equação. em 1983, que foi baseada na análise de 21 casos de ruptura de naturezas diversas
1995	Froehlich (1995)	$Q_P = 0,607H_{hid}^{1,24}k_0V_{hid}^{0,295}$	Desenvolvida com base em 22 casos de ruptura
1996	Singh (1996)	$Q_P = 1,7B_{bre}H_{bre}^{3/2}$	Considera que o escoamento que passa pela brecha é similar ao que passa por um vertedouro retangular de soleira espessa
1996	Institution of Civil Enineers (1996)	$Q_P = 1,3H_{barr}^{2,5}$	Leva em conta diferentes casos de ruptura de naturezas diversas
1996	Webby (1996)	$Q_P = 0,0443g^{0,5}H_{hid}^{1,4}V_{hid}^{0,367}$	Utilizou técnicas de análise dimensional
1996	Lemperièrre (1996)	$Q_P = H_{hid}^{0,5}(H_{hid}^2 + kV_{res}^{0,5})$	Indicada para barragens extensas, sendo $k = 0,1$ para argilas bem compactadas e 1 para materiais de menor coesão e uma dimensão
1997	Saint-Venant (1997)	$Q_P = 8/27 B_d \sqrt{g} Y_{médio}^{3/2}$	Fórmula desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
1998	Espanha (1998)	$Q_P = k(H_{barr}V_{res})^{0,5}$	Baseada na equação de Hagen (1982), onde $k = 0,78$ para barragens de concreto e $k = 0,55$ para barragens de terra e

Fonte: USACE, 1980 citado por BRUNNER, 2007; LARIANO, 2016.

O hidrograma representado na figura 5 é elaborado com base na determinação da vazão de pico ( $Q_P$ ) em diferentes formulações matemáticas (tabela 3.3), medida em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), é calculada em função de diversos parâmetros. Esses parâmetros incluem o volume do reservatório ( $V$ ), expresso em metros cúbicos ( $m^3$ ), o tempo de pico do hidrograma ( $T_P$ ) e o tempo de base do

hidrograma ( $T_b$ ), ambos medidos em segundos (s). Na equação que descreve o hidrograma, a variável independente do tempo ( $t$ ) é considerada, assim como o fator de ponderação ( $k$ ), cujo ajuste é realizado para assegurar que o volume do hidrograma de ruptura corresponda ao volume do reservatório. Esse processo permite uma representação adequada do comportamento hidrológico durante o evento de ruptura da barragem.

Segundo o hidrograma com decaimento parabólico, a área sob a curva do gráfico deve corresponder ao volume total do reservatório. Em outras palavras, a integral definida da função  $Q(t)$  no intervalo de zero até o final do tempo de base deve ser igual ao volume do reservatório, conforme a equação 2. A função  $Q(t)$  é exponencial e atinge seu valor máximo quando  $t = t_p$ , independentemente do valor de  $k$ .

$$V = \int_0^{t_b} Q(t) = \int_0^{t_b} Q_p \left[ \left( \frac{t}{t_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (2)$$

De acordo com a formulação matemática para a elaboração do hidrograma, representada pela equação 1, o parâmetro  $k$  é geralmente ajustado dentro da faixa entre 0,1 e 0,5 para adequar a área sob o gráfico ao volume do reservatório. É observado que, para um volume de reservatório específico e um tempo de pico fixo, a maior vazão de pico é alcançada quando o valor de  $k$  é igual a 0,5 (FARIA et al., 2017).

Considerando o contexto apresentado, propõe-se a fixação um tempo de pico ( $T_p$ ) e um valor para o parâmetro  $k$ , visando determinar a vazão de pico ( $Q_p$ ). Varie-se a vazão de pico até que a área sob o gráfico corresponda ao volume do reservatório. Destaca-se que o volume do reservatório é uma informação crucial relacionada à barragem, pois representa a quantidade que será propagada total ou parcialmente jusante abaixo em caso de ruptura. Essa abordagem proporciona uma estimativa mais precisa da vazão de pico resultante do evento de ruptura.

Para determinar a área total do gráfico foi realizado automaticamente pela soma das áreas parciais. A vazão de pico ajustado automaticamente de forma a garantir que a área total do gráfico seja igual ao volume total. Na equação (2) a função  $Q(t)$  corresponde à vazão em função do tempo, e as áreas parciais são as integrais definidas de cada intervalo. As áreas foram determinadas empregando o método dos trapézios, para o qual foi desenvolvido um código em Python 3.0. Esse código permitiu calcular de maneira rápida e precisa as áreas parciais em cada intervalo de tempo. No entanto, para determinar o valor de  $Q_p$ , foram empregadas equações empíricas listadas na Tabela 3.4, as quais foram construídas utilizando o software Excel.

### 3.1.4 Mapeamento das áreas inundáveis

A avaliação da propagação da onda de cheia e a elaboração dos mapas de inundação foram conduzidas utilizando o modelo hidrodinâmico HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) - versão 6.0, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, reconhecido e amplamente utilizado em estudos dessa natureza. Esse software possibilita a obtenção do perfil da linha d'água por meio de uma abordagem unidimensional, bidimensional ou a combinação dessas metodologias.

Para os estudos da UHE Pedra do Cavalo, optou-se pela modelagem bidimensional, na qual a propagação da onda de ruptura no vale a jusante é calculada a partir de uma área delimitada por uma malha de elementos finitos. Nos estudos em questão, o modelo hidrodinâmico adotado foi o HEC-RAS® na sua versão 6.0, empregando uma abordagem bidimensional que abrangeu aproximadamente 20 km do trecho do reservatório até o final do leito do rio Paraguaçu.

Para representar a situação de operação extrema, utilizou-se o hidrograma de ruptura no cenário pessimista. Nesse cenário, o trecho bidimensional foi representado por uma malha ortogonal base, com detalhamento específico em áreas selecionadas com células de 20 m x 20 m.

Para esta etapa, é imprescindível dispor de dados relativos ao reservatório, à estrutura da barragem e à topografia do terreno. Os detalhes referentes ao reservatório e à estrutura da barragem foram previamente abordados no quadro 3.1. A representação topográfica adotada foi o Modelo Digital de Elevação (MDE). Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) derivados do PALSAR estão disponíveis de forma gratuita, já corrigidos e projetados no sistema UTM WGS84, apresentando resoluções de 30m e 12,5m para baixa e alta definição, respectivamente. O sensor PALSAR, integrante do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), foi lançado em 2006 pela agência japonesa de exploração aeroespacial (Japan Aerospace Exploration Agency-JAXA). Esse equipamento foi concebido com o propósito de cartografar a topografia terrestre, monitorar a cobertura vegetal, identificar desastres e realizar levantamentos de recursos naturais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1.1 Vazões de pico

De acordo com a metodologia delineada no item 3.2.3, foram determinadas as vazões de pico ( $Q_p$ ) para os cenários mencionados anteriormente. A Tabela 2 apresenta os dados de entrada utilizados nos cálculos de  $Q_p$  para a UHE Pedra do Cavalo. As vazões de pico resultantes são detalhadas na figura 6.

**Tabela 2:** Parâmetros utilizados

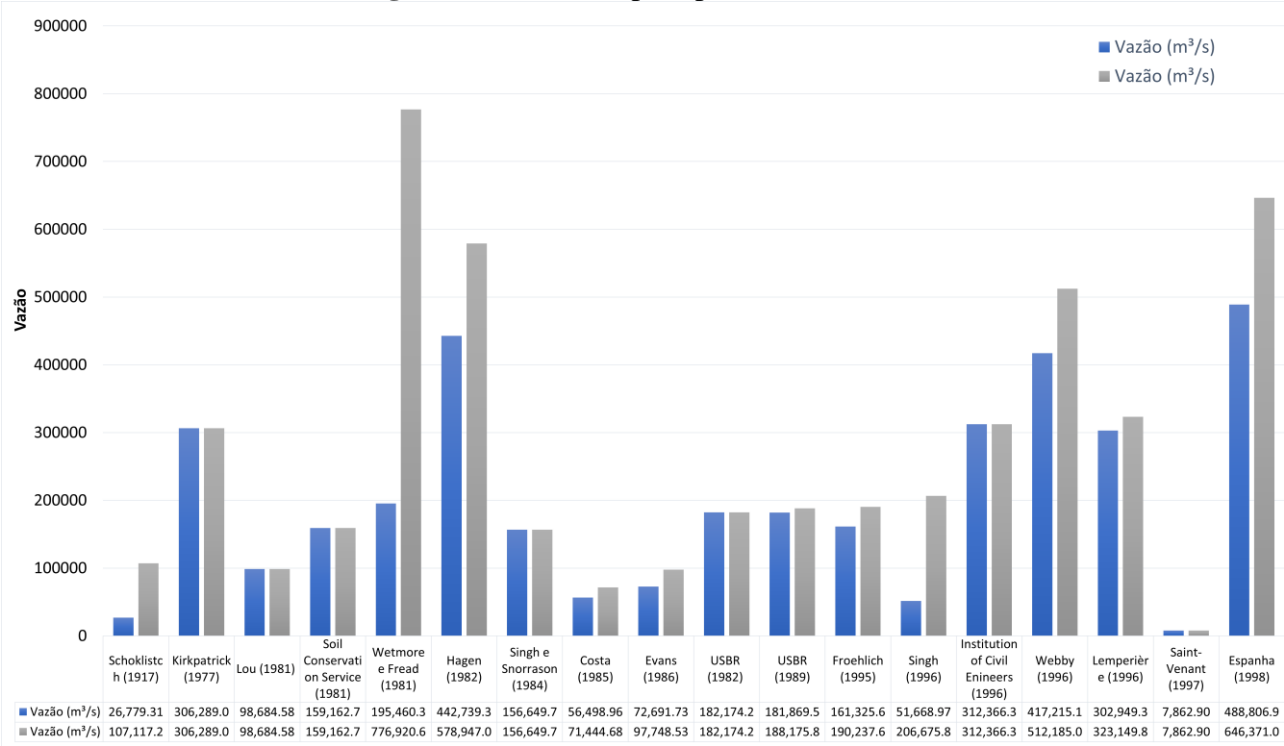
Cenário Otimista-Nível Máximo Normal (NMN)				
	Volume do reservatorio	V	2765.65	hm³
	Área do reservatorio	AS	106.42	km²
	Largura da barragem	Bd	470.00	m
	Altura da barragem	Hd	142.00	m
USACE(1980)	Largura da brecha	Bb	71.00	m
	Altura da brecha	Hb	56.80	m
	Profundidade média	Ymed	47.30	m
	Tempo da brecha	T <sub>P</sub>	1.00	h
	k- fator de ponderação	0.1- 0.5		
Cenário Pessimista-Nível Máximo Maximorum (NMM)				
	Volume do reservatorio	V	4836.00	hm³
	Área do reservatorio	As	185.90	km²
	Largura	Bd	470.00	m
	Altura da barragem	Hd	142.00	m
Fread (2006)	Largura da brecha	Bb	284.00	m
	Altura da brecha	Hb	56.80	m
	Profundidade média	Ymed	47.30	m
	Tempo da brecha	T <sub>P</sub>	0.50	h

Fonte: Própria do autor.

No cenário otimista, com uma largura de brecha de ruptura de 71,0 m e um tempo de desenvolvimento de 1 hora, houve uma notável variação nas vazões de pico, variando de 7,862.90 m<sup>3</sup>/s a 488,806.96 m<sup>3</sup>/s. Saint-Venant (1997) não demonstrou uma sensibilidade significativa, enquanto as formulações de Lou (1981) exibiram uma relação entre si de aproximadamente 52%. Por fim, a formulação de Espanha (1998) resultou na maior vazão de pico devido à consideração do volume total do reservatório e a altura do barramento.

No cenário pessimista, com uma largura de brecha de ruptura de 284,0 m e um tempo de desenvolvimento de 0,5 hora, houve uma notável variação nas vazões de pico, que variaram de 7,862.90 m³/s a 776,920.61 m³/s. A formulação de Watmore (1981) resultou na maior vazão de pico devido à inclusão de considerações sobre o volume total do reservatório, a altura do barramento e a área do reservatório. Por outro lado, na Figura 6, as vazões de pico para ambos os cenários, otimista e pessimista, mostraram valores semelhantes, conforme exemplificado por Kirkpatrick (1977), Lou (1981), USBR (1982), USBR (1989) e Saint-Venant (1997). Isso pode ser atribuído ao fato de que muitos desses autores consideram a carga hidráulica máxima sobre a base da brecha.

Figura 6: Vazões de pico para os cenários



	Otimista	Pessimista
Autores	Vazão (m³/s)	Vazão (m³/s)
Schoklistch (1917)	26,779.31	107,117.23
Kirkpatrick (1977)	306,289.07	306,289.07
Lou (1981)	98,684.58	98,684.58
Soil Conservation Service (1981)	159,162.78	159,162.78
Wetmore e Fread (1981)	195,460.39	776,920.61
Hagen (1982)	442,739.34	578,947.09
Singh e Snorrason (1984)	156,649.77	156,649.77
Costa (1985)	56,498.96	71,444.68
Evans (1986)	72,691.73	97,748.53
USBR (1982)	182,174.27	182,174.27
USBR (1989)	181,869.51	188,175.87
Froehlich (1995)	161,325.60	190,237.69
Singh (1996)	51,668.97	206,675.87
Institution of Civil Enineers (1996)	312,366.33	312,366.33
Webby (1996)	417,215.11	512,185.07
Lemperière (1996)	302,949.35	323,149.88
Saint-Venant (1997)	7,862.90	7,862.90
Espanha (1998)	488,806.96	646,371.09

Fonte: Própria do autor.

Por fim, observou-se que as vazões de pico do cenário otimista variaram em uma proporção menor do que no cenário pessimista, devido ao tempo de pico ser maior e o volume no reservatório ser menor. No cenário pessimista, as vazões demonstraram maiores variações, devido ao tempo de pico ser menor e o volume do reservatório ser maior.

No estudo realizado para a UHE Pedra do Cavalo, diversas formulações foram avaliadas quanto à sua adequação aos cenários propostos. Entre os autores analisados, Wetmore apresentou uma formulação que demonstrou uma relação mais significativa entre o tempo de pico e os parâmetros geométricos da brecha de ruptura. Especificamente, sua formulação foi a que melhor se adaptou aos cenários propostos para essa usina hidrelétrica.

Ao comparar as vazões de pico obtidas nas formulações empíricas, destaca-se que, para a mesma barragem, a formulação proposta por Wetmore, conforme Machado (2022), foi aquela que mais se aproximou do cenário de ruptura observado. No presente estudo, a escolha dessa formulação se deu em virtude da sua capacidade de calcular áreas parciais que se aproximam do volume do reservatório para o cenário analisado.

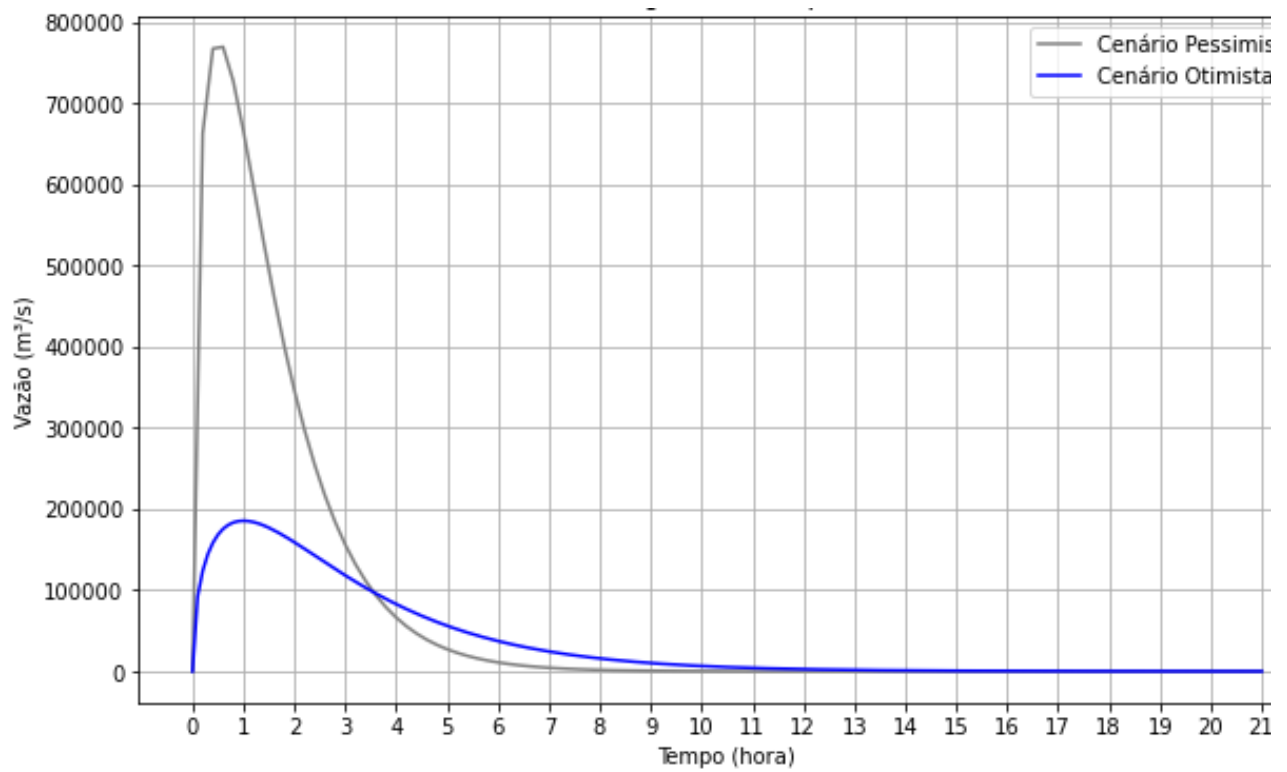
#### 4.1.2 Hidrograma de ruptura

A metodologia para a construção do hidrograma está delineada no item 3.2.3. A propagação do volume do reservatório, conforme o tempo de pico estipulado, pode variar em velocidade, dependendo da consideração do hidrograma de decaimento parabólico.

Conforme o hidrograma de decaimento parabólico, a soma das áreas parciais sob a curva deve ser igual ao volume total do reservatório. Diante dessa premissa, para determinar a vazão de pico ( $Q_p$ ), foi utilizado o teste de hipóteses no código desenvolvido na linguagem python. Os tempos de pico foram fixados em 1800 s ou 0,5 hora e 3600 s ou 1,0 hora, e então o campo da  $Q_p$  foi ajustado até que a área do gráfico coincidissem com o volume do reservatório para ambos os cenários.

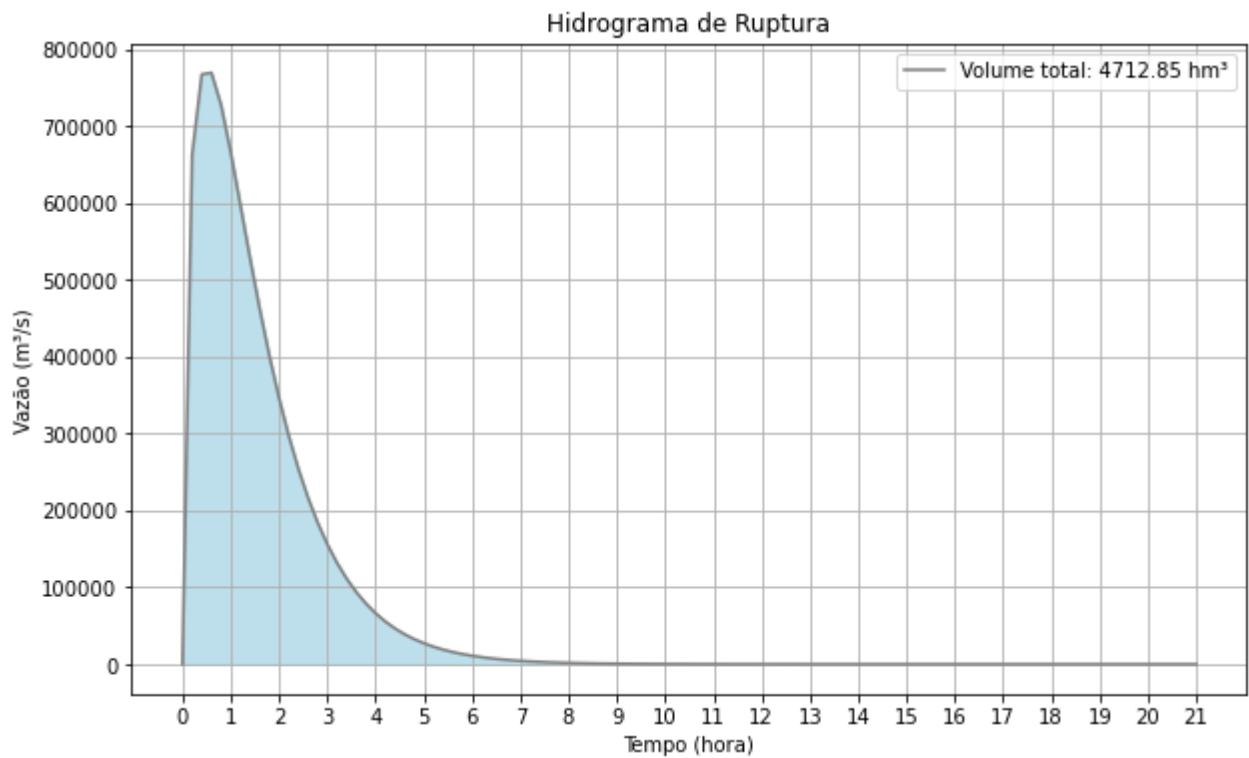
Identificou-se que o valor encontrado para a vazão de pico no cenário otimista, de 185.460,39 m<sup>3</sup>/s, é próximo aos valores obtidos nas formulações de USBR (1982), USBR (1889) e Wetmore (1981). Já no cenário pessimista, o valor encontrado para a vazão de pico, de 776.120,60 m<sup>3</sup>/s, está próximo aos valores encontrados nas formulações empíricas de Wetmore (1981) e Espanha (1998). Conforme discutido anteriormente, a formulação proposta por Wetmore demonstrou ser a mais adequada para representar os cenários de ruptura investigados neste estudo. Isso se deve ao fato de que a vazão de pico obtida por meio dessa formulação é consistente com o somatório das áreas parciais, resultando em uma aproximação próxima ao volume total do reservatório. Além disso, a equação de Wetmore leva em consideração tanto o tempo de pico quanto os parâmetros geométricos da brecha de ruptura, contribuindo para uma modelagem mais precisa do fenômeno. Os resultados detalhados dessa análise estão apresentados na Figura 7 e Figura 8.

**Figura 7:** Hidrograma com decaimento parabólico para os cenários



Fonte: Própria do autor.

**Figura 8:** Volume total obtido no cenário pessimista



Fonte: Própria do autor.



#### 4.1.3 Análise da modelagem hidrodinâmica

Como descrito no item 4.1.2, a equação que melhor se ajustou à vazão de pico representativa do reservatório da UHE Pedra do Cavalo foi a sugerida por Wetmore. Com base nisso, o hidrograma de ruptura do cenário pessimista, que representa a situação de operação extrema, foi aplicado ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS em sua versão 6.2, seguindo a metodologia delineada no item 3.2.4.

A delimitação da área inundada foi conduzida através da utilização de uma ferramenta conhecida como RAS-Mapper, a qual integra a tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ao HEC-RAS. Essa ferramenta permite a demarcação precisa da área alagada, alcançando níveis de detalhamento que seriam impraticáveis de serem obtidos por métodos manuais. A Figura 9 apresenta a localização dos municípios que compõem a área de estudo, juntamente com o resultado da delimitação da área inundada.

**Figura 9:** Mapa de localização dos municípios (a); Perímetro definido na modelagem (b)



(a)

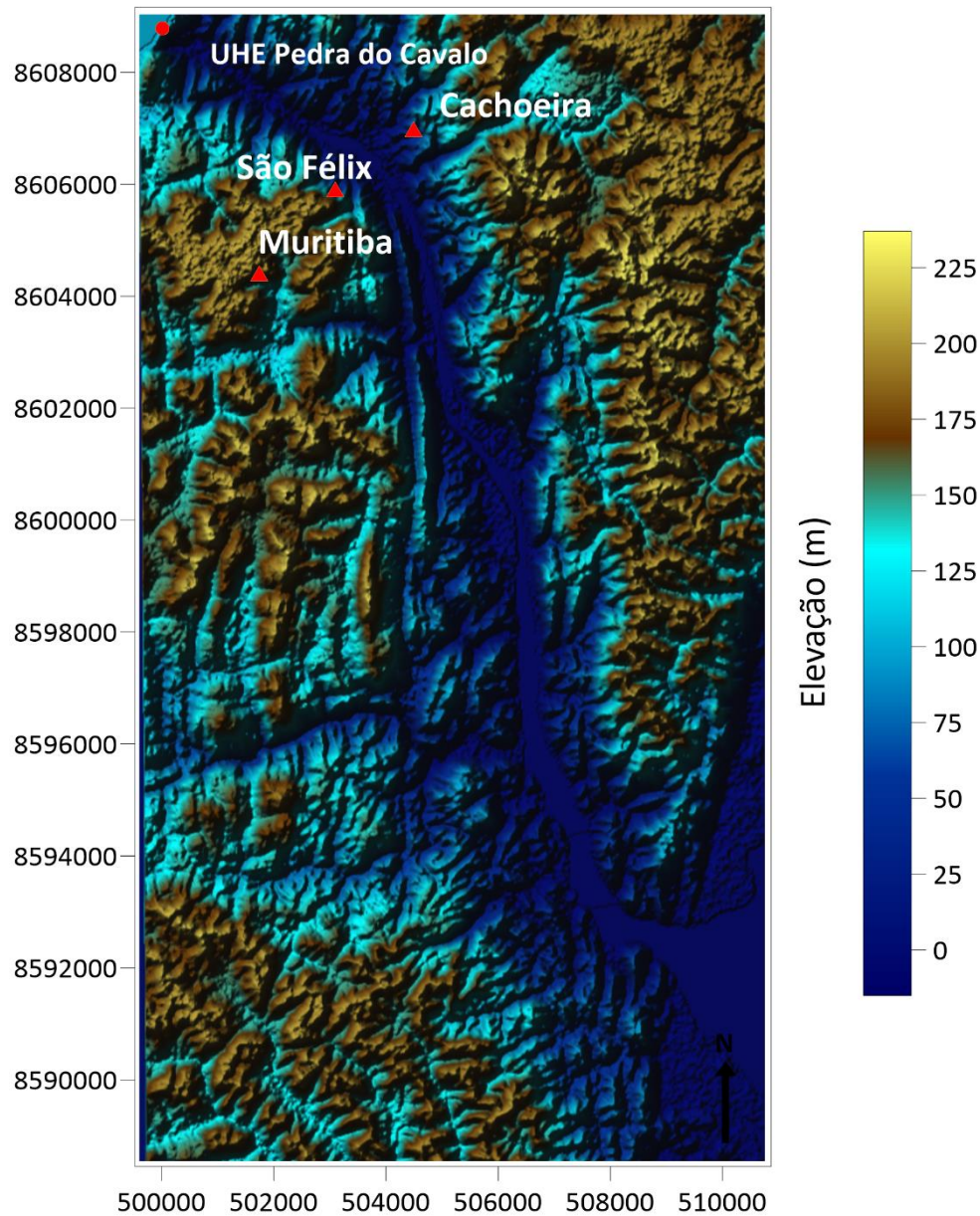
(b)

Fonte: Própria do autor.

A figura 10 ilustra a elevação da área de estudo, destacando que os municípios de Muritiba, São Felix e Cachoeira se encontram em uma cota de 200 metros. É importante ressaltar que esses municípios estão posicionados nas margens do rio Paraguaçu, o que requer atenção por parte do empreendedor da barragem, especialmente em caso de ruptura.

Essa atenção por parte do empreendedor é necessária devido ao contexto histórico significativo do município de Cachoeira para o estado da Bahia e para o país, ao longo de seu processo de independência. Além disso, no que diz respeito ao impacto social, observa-se que a área adjacente ao vale jusante da Barragem Pedra do Cavalo é habitada principalmente por famílias de baixa renda e comunidades quilombolas.

**Figura 10:** Mapa de elevação



Fonte: Própria do autor.

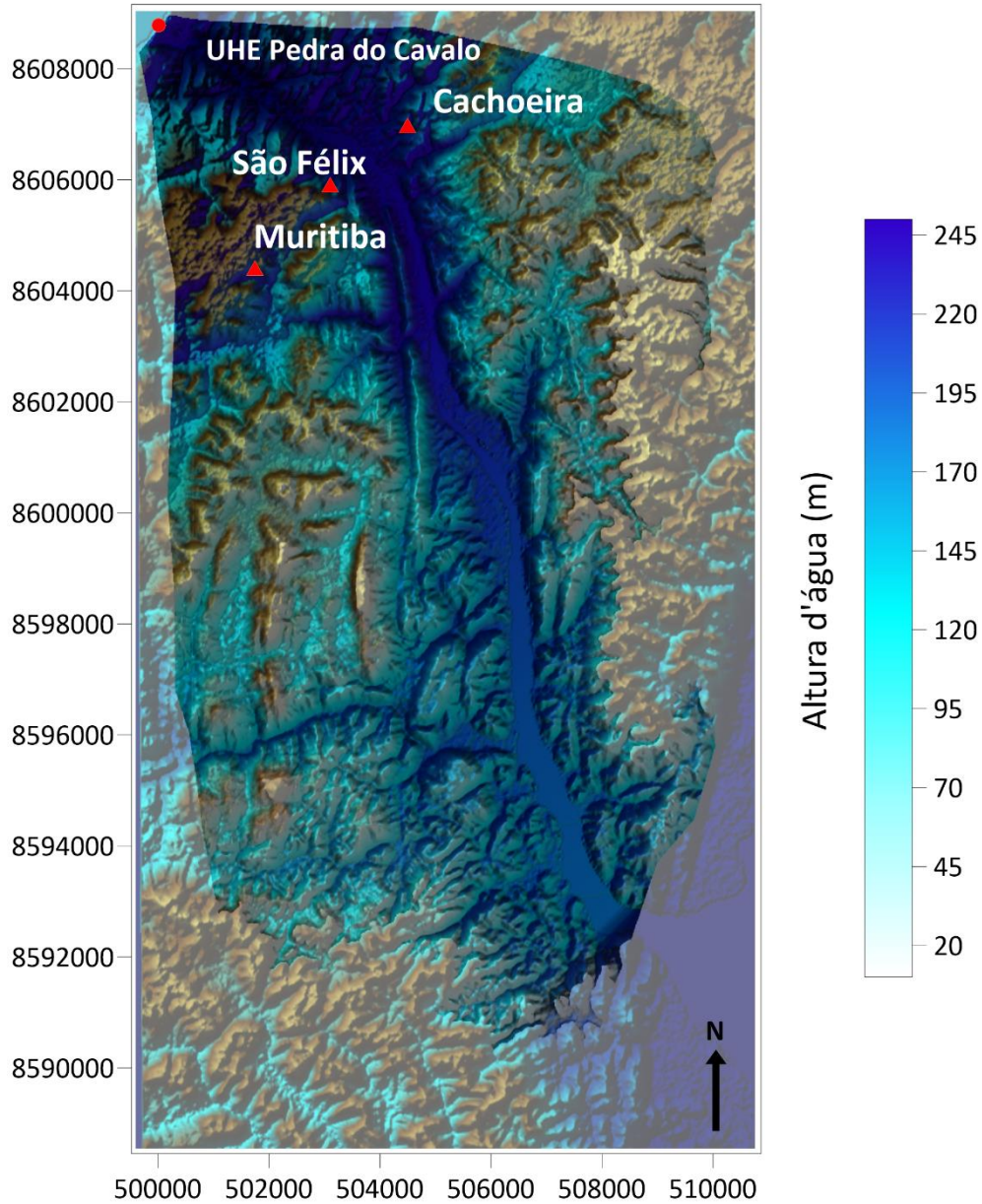
Os resultados foram representados em mapas que mostram as áreas inundadas, à profundidade máxima alcançada e à velocidade máxima ao longo dessas áreas (Figuras 11 a 12). Para a criação desses mapas, que exibem os resultados obtidos com a simulação hipotética de ruptura, foi escolhida uma escala de cores que varia do valor mínimo ao máximo apresentado. Essa abordagem foi priorizada devido à sua apresentação visual e facilidade de identificação dos padrões.

A primeira análise dos resultados obtidos por meio do Hec-Ras está relacionada a profundidade da mancha da área inundada (Figura 11). Esta figura representa o mapa de inundação para o tempo de 12:18 min após a ocorrência da ruptura da Barragem Pedra do Cavalo, evidenciando após o início da



inundação. A propagação da onda de cheia atinge os municípios de Muritiba, São Felix e Cachoeira no tempo de 05 h:24 min após a ruptura quando o nível d'água atinge sua elevação máxima de 300 metros.

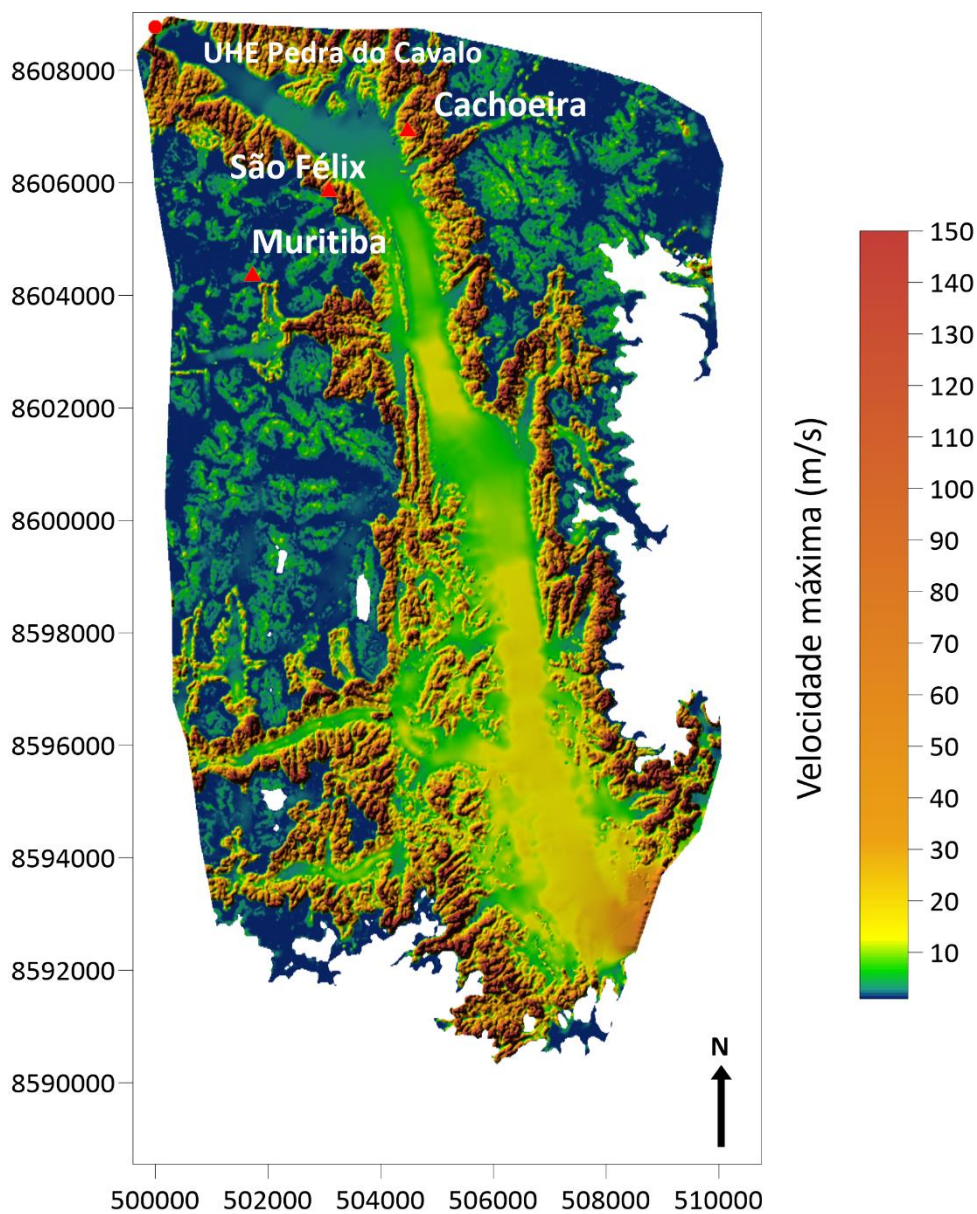
**Figura 11:** Mapa de inundação para o cenário pessimista para o tempo de 12h:18 min



Fonte: Própria do autor.

A propagação da onda de cheia causará um impacto significativo em uma vasta área de 22.500 km<sup>2</sup> no vale jusante, com implicações tanto ambientais quanto sociais. Há uma preocupação substancial com o deslocamento das espécies preservadas da mata atlântica e dos municípios mencionados anteriormente, devido à alta velocidade da inundação, que pode atingir até 150,0 m/s, conforme ilustrado na figura 12. Tais valores de velocidade e de altura d'água têm o potencial de cobrir e arrastar pessoas, pois ultrapassa a cota de elevação dos municípios.

**Figura 12:** Mapa de velocidade máxima para cenário pessimista



Fonte: Própria do autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo sobre o rompimento de barragens é um tema de ampla abrangência, que engloba várias áreas do conhecimento. A metodologia proposta neste artigo para determinar a vazão de pico e criar o hidrograma de ruptura faz parte de uma análise mais abrangente, que não se limita apenas ao rompimento da estrutura, mas também considera seus efeitos no vale a jusante e as medidas emergenciais necessárias. A análise da ruptura de barragens envolve diversas disciplinas do conhecimento, formando um campo interdisciplinar e vasto. A metodologia utilizada para calcular as vazões de pico e desenvolver o hidrograma de ruptura é apenas uma parte integrante de um estudo mais amplo. Este estudo não se concentra apenas no evento de ruptura em si, mas também avalia os impactos resultantes no vale a jusante em caso de uma ruptura hipotética.

Ao analisar a considerável variação nas vazões de pico para os mesmos dados de entrada, a escolha da equação que melhor se adequa a este estudo pode ser desafiadora, dificultando a seleção do modelo adequado para simular o rompimento. Diante disso, este estudo desenvolveu um código em linguagem Python para realizar simulações visando selecionar a vazão que melhor representasse o cenário de ruptura.

As simulações foram conduzidas utilizando o software HEC-RAS, um modelo de simulações hidrodinâmicas amplamente empregado para essa finalidade. A geometria do modelo foi estabelecida através da ferramenta RAS-Mapper, que utiliza um Modelo Digital de Elevação (MDE). A aplicação do modelo hidrodinâmico para simular a ruptura hipotética da UHE Pedra do Cavalo possibilitou a avaliação dos níveis de água no trecho a jusante, conforme as hipóteses de ruptura aos cenários propostos neste estudo.

O cenário pessimista resultou em uma vazão de pico de 776.920,60 m<sup>3</sup>/s . Os efeitos desse evento são perceptíveis até 13 horas e 48 minutos após o momento do colapso, quando, finalmente, a onda de inundação não apresenta mais riscos para a planície alagada. Dessa forma, a pesquisa permitiu o mapeamento da área de inundação para o cenário de operação extrema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B.; RAMOS, C. M.; SANTOS, M. A.; VISEU, T. **Risk Management of Dam Break Floods: Perspectives from Portugal**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisbon, 2003, 265 p.

ALMEIDA, B. A. **Riscos à jusante de barragens e legislação**. In: Jornada Técnica Legislação sobre segurança de barragens, Projeto NATO PO-FLOODRISK / LNEC, 2001, Lisboa: Portugal. 10 p.

ALMEIDA, B.C. **Estudo De Ruptura Hipotética De Barragens Através Do Modelo Numérico Histav. Caso Da Barragem De Fundão, Brasil\***,2021, (28). Doi: [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_28-1\\_2](https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_2).

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume V – Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens**. Brasília – DF, 2016.

ANA ( Agência Nacional de Águas). **Manual de políticas e práticas de segurança de barragens para entidades fiscalizadoras**. ANA- Agência Nacional de Águas, (2017). 18-216.

BAHIA, 1984. **Aproveitamento Pedra do Cavalo. Projeto Básico - Memorial Descritivo. Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu – DESENVALE**. Governo do Estado da Bahia. 123p.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti - MG**. Dissertação Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008, 337 p.

BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. **Hidrologia e Sedimentologia Aplicadas para Áreas Perturbadas**. Oklahoma Technical Press, 1981, pp. 104-108.

BHARATH, A., Anand, V.S., C G Hiremath., Ramesh Maddamsetty. **Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India**. Environmental Challenges, 5, 2021. 100401. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100401>.

BHARTI, M.K., Manish S., Dr. Nazrul I. **Study on the Dam & Reservoir, and Analysis of Dam Failures: A Data Base Approach**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7, 2020. Issue: 05.

BIEDERMANN, R. **Safety concept for dams: development of the Swiss concept since 1980**. Rev. Wasser Energie Luft, 89, p. 55-63. 1997. apud MEDEIROS, C. H. Curso de Segurança de Barragens: aspectos técnicos e legais. 2013. 769 p. Promoção: Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) – Núcleo regional da Bahia, Salvador.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005, 203 p.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 20 de Setembro de 2010.

BRUNNER, G. W. PIPER, S. S. JENSEN, M. R. CHACON, B. **Combined 1D and 2D hydraulic modeling within HEC-RAS**. World Environmental and Water Resources Congress. 2015.

CHAUHAN, S. S.; BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R. **Assessment of Current Techniques for Estimating Breach Parameters: Implications for Breach Modeling**. In: Proceedings of the Annual Conference of the Association of State Dam Safety Officials. Phoenix, Setembro 2004, 15 p.

CHOW, V. T. **Hidrologia aplicada**. Editora McGRAW-HILL, 1994. 265-268.

COLLISCHONN, W. **Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS**, (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IPHUFGRS, 1997.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Brasília, 279 p, 2003.

Elfalan, D. **Hawaii Dam break analysis follow-on actions**. In: Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, 316, 2008.1–8. doi:10.1061/40976(316)283.

Froehlich, D.C. **Embankment dam breach parameters and their uncertainties**. J. Hydraul. Eng. 134, 2008.1708–1721. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134.

FUSARO, T. C. **Metodologia de classificação de barragens baseada no risco**. In: XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Anais. Salvador: CBDB, 13 p., 2003

GEORGE, A.C., Nair, B.T. **Dam break analysis using BOSS DAMBRK**. Aquat. Procedia 4, 2015. 853–860. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.107.

HEC. Hydrologic Engineering Center. **HEC-RAS River Analysis System – User’s Manual**. US Army Corps of Engineers, 2010.

International Commission on Large Dams – ICOLD. **Dam Failures: Statistical Analysis**. Bulletin 99. Paris: 1995. 63 p.

LADEIRA, J. E. R.; ESPÓSITO, T.; NAGHETTINI, M. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico**, 2007, Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, 2007.



LAURIANO, A. W. **Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LUZ, L. D.; AMORIM, F. B.; LUZ, J. A. G. **Aspectos ecológicos associados a alterações hidrológicas observadas no baixo trecho do rio São Francisco**. In: VII Congresso de Ecologia do Brasil, 2005. Caxambu-MG.

MACHADO, W. P. R. **Utilização de metodologia simplificada para avaliação de ruptura hipotética de barragens - estudo de caso : UHE Pedra do Cavalo - (BA)**. Trabalho de graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Curso de Engenharia Hídrica, 2022.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelagem Matemática de Ondas Causadas por Ruptura de Barragens**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990, 291 p.

MENEZES, D.S.A.B. **Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água. Estudo de caso: barragem de Santa Helena - BA**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

MULONGO, H. **Estudo de inundação na bacia do campus da UFSC**. Florianópolis, Santa Catarina. 2012. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

NETO, B. M., da Silva, G. R., Cavalcante, M. B., & da Silva, M. A. P. **A Barragem Camará sob os impactos da destruição e reconstrução: um estudo espaço-tempo entre 2004/2014**. Revista De Geografia, 34(2), 2017. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2017.229226>.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2021.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Pearson Education. 2011

RONG, G., Wang, X., Xu, H., Xiao, B. **Multifactor regression analysis for predicting embankment dam breaching parameters**. J. Hydraul. Eng. 146. 2020. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001653.

SHAHNIM, M.F., Ros, F.C. **Dam break analysis of Temenggor Dam using HEC-RAS**. In: **Proceedings of the IOP Conference Series**. Earth and Environmental Science, 479, 2020. doi:10.1088/1755-1315/479/1/012041.

SILVA, A. A. R. **Formação Territorial de Cachoeira e São Félix-BA: A Geomorfologia como Processo Condicionante**. In: V Simpósio Cidades Médias e Pequenas da Bahia, Ilhéus-BA, 2016.

VIEIRA, L.M. S; ANDREA, S.F; CASSIA, J.F.T. **Avaliação da Propagação da Onda de Cheia a Jusante da Barragem de Pedra do Cavalo, Rio Paraguaçu-BA**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. Foz do Iguaçu: 2019.

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

WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. **Gestão do risco nos vales a jusante de barragens**. Revista Territorium, n. 18, p. 33-42, 2011.

Vojtek, M., Petroselli, A., Vojteková, J., Asgharinia, S. **Flood inundation mapping in small and ungauged basins: sensitivity analysis using the EBA4SUB and HEC-RAS modeling approach.** Hydrol. Res. 50, 2019. 1002–1019. doi:10.2166/NH.2019.163.

VOTORANTIM. **Relatório Consolidado dos Programas Ambientais UHE Pedra do Cavalo.** Salvador, 2022.

WAHL, T. L. **A Incerteza das Previsões de Parâmetros de Ruptura de Barragens de Aterro com Base em Estudos de Casos de Falhas de Barragens.** Workshop sobre Questões, Resoluções e Necessidades de Pesquisa Relacionadas à Análise de Falhas de Barragens do USDA/FEMA. Oklahoma, junho de 2001, 16 p.