

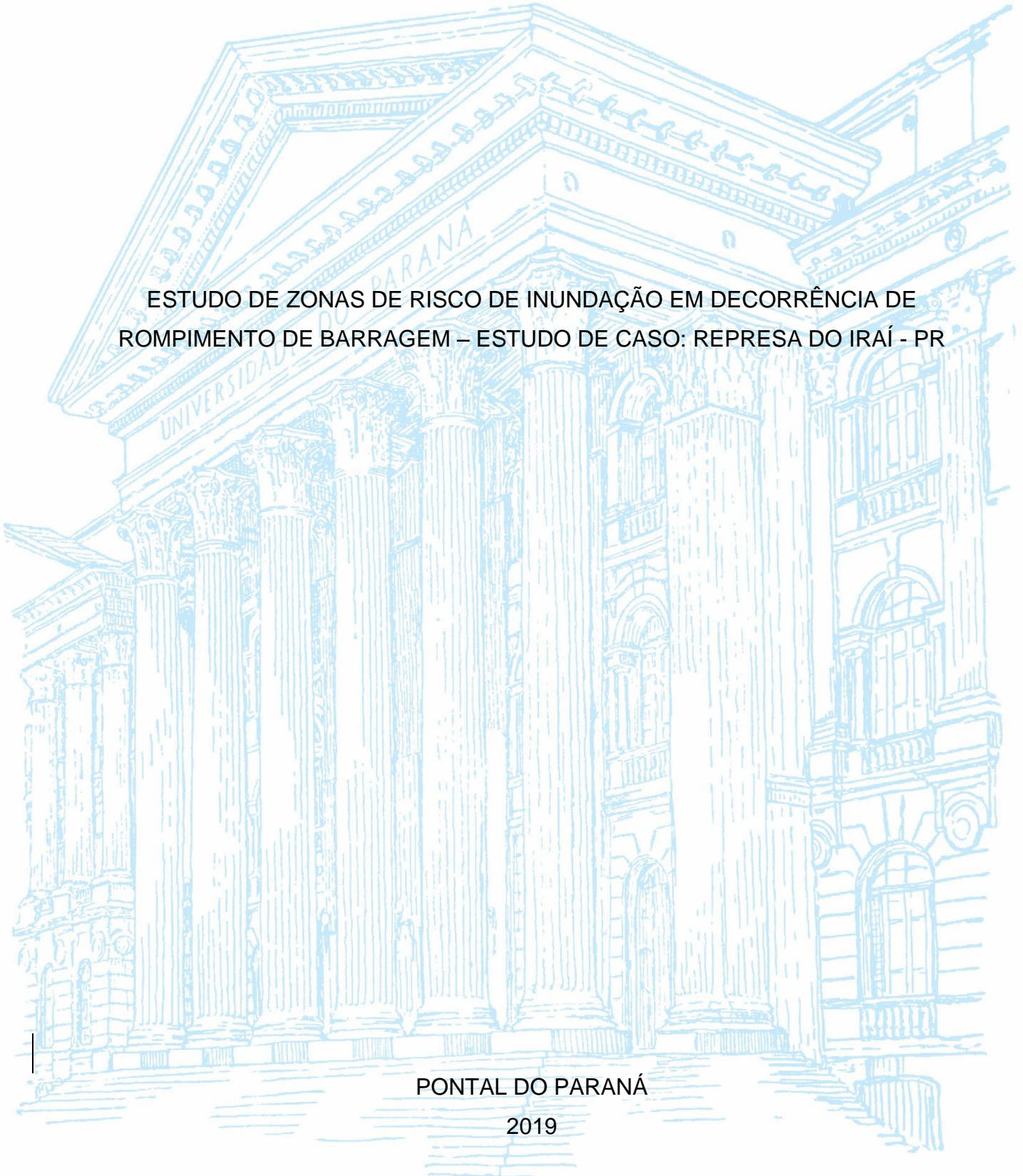
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THAIS AVAIP NUNES

ESTUDO DE ZONAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO EM DECORRÊNCIA DE
ROMPIMENTO DE BARRAGEM – ESTUDO DE CASO: REPRESA DO IRAÍ - PR

PONTAL DO PARANÁ

2019



THAIS AVAIP NUNES

ESTUDO DE ZONAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO EM DECORRÊNCIA DE
ROMPIMENTO DE BARRAGEM – ESTUDO DE CASO: REPRESA DO IRAÍ - PR

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil, Campus Pontal do Paraná, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Roberta Brondani Minussi

PONTAL DO PARANÁ

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE:
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar
Fernanda Pigozzi- CRB-9/1151

Nunes, Thais Avaip
N972e Estudo de zonas de risco de inundação em decorrência de rompimento de barragem –
Estudo de caso: Represa do Iraí - Pr. / Thais Avaip Nunes. – Pontal do Paraná, 2019.
66 f.: il., 29 cm.

Orientadora: Profª. Dra. Roberta Brondani Minussi.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Estudos do Mar, Setor
Reitoria, Universidade Federal do Paraná.

1. Engenharia Civil – represas. 2. Barragens. I. Título. II. Minussi, Roberta Brondani. III.
Universidade Federal do Paraná.

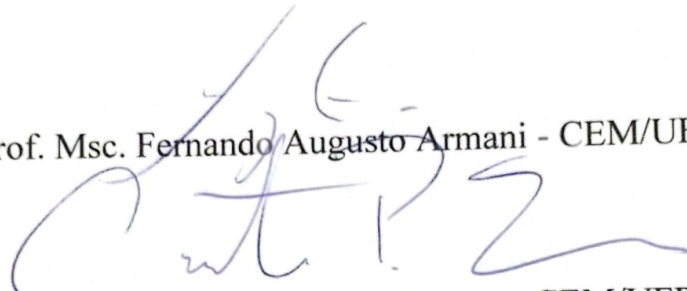
CDD 627.8

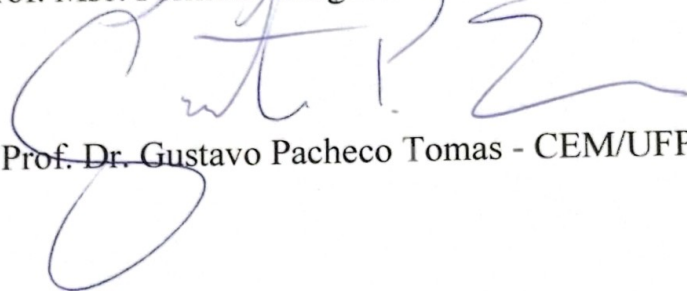
TERMO DE APROVAÇÃO

Thais Avaip Nunes

“ESTUDO DE ZONAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO EM DECORRÊNCIA DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM - ESTUDO DE CASO: REPRESA DO IRAÍ-PR”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:


Prof. Msc. Fernando Augusto Armani - CEM/UFPR


Prof. Dr. Gustavo Pacheco Tomas - CEM/UFPR



Prof. Dra. Enga. Roberta Brondani Minussi - CEM/UFPR
Presidente

Pontal do Paraná, 12 de Dezembro de 2019.

Dedico esse trabalho à Deus, à minha família e aos meus amigos, que me apoiaram na realização desse projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por sempre ter me acompanhado em todos os meus passos até aqui, colocando pessoas maravilhosas em meu caminho para continuar em frente.

Agradeço imensamente ao meu pai, Jorge, e à minha mãe, Rosimere, por todo seu apoio, compreensão, paciência e seu amor incondicional por mim.

Ao meu irmão, Rafael, à minha cunhada Simone, e à minha sobrinha, Isadora, por sempre estarem ao meu lado.

Às minhas avós, Dona Liegy e Dona Rosa, e à minha madrinha, Elizete, por todos os “puxões de orelha” e todo o amor direcionados a mim.

Aos meus amigos da Universidade Federal do Paraná, por toda a ajuda, por todas as noites de estudo que me fizeram chegar até aqui, e por tornarem a faculdade um ambiente muito mais leve.

À minha professora orientadora, Roberta, por todo o ensinamento repassado a mim, por todo o auxílio a qualquer horário, e por sua paciência e compreensão.

Agradeço, por fim, a todos os professores, por todo o conhecimento repassado tanto dentro, quanto fora das salas de aula.

“Noventa por cento do sucesso se baseia simplesmente em insistir”.

(WOODY ALLEN)

RESUMO

Barragens são grandes estruturas que tem como objetivo o acúmulo de água ou de rejeitos de minério. A ruptura desse tipo de estrutura é rara, porém, dependendo de sua localização e da ocupação do solo à jusante, seu dano potencial associado faz com que seja necessário o estudo referente as zonas inundáveis em consequência do seu rompimento hipotético, para auxiliar no planejamento em situações de emergência. O presente trabalho tem como objetivo o estudo inicial das zonas com risco de inundação decorrentes da ruptura hipotética da Barragem do Rio Iraí, localizada no estado do Paraná. Sua geometria, adquirida por meio de modelos digitais de elevação e criada no software QGIS, foi ajustada no AutoCAD Civil3D, para logo em seguida ser inserida no programa HEC-RAS. A geometria foi finalizada, e foram inseridas as informações finais, como as condições de contorno e condições iniciais consideradas na situação da ruptura da barragem. Foram estudados seis diferentes cenários de ruptura, alterando o tempo de formação e as dimensões da brecha, para a realização do teste de sensibilidade. Ao analisar os resultados das simulações, foi escolhido um dos cenários para ser considerado representativo. Com o cenário escolhido, foram obtidos que a inundação decorrente da ruptura da barragem afetaria grandes áreas com alta densidade demográfica, como o Bairro Boqueirão, de Curitiba, e de grande importância turística, como o Zoológico Municipal de Curitiba, além de se aproximar do Aeroporto Internacional Afonso Pena, um dos principais do Estado, necessitando assim, realizar estudos para confeccionar meios de alertar a população efetivos.

Palavras-chave: Ruptura de barragem, Represa do Iraí, modelagem hidrodinâmica, mapa de inundação, HEC-RAS, AutoCAD Civil 3D.

ABSTRACT

Dams are large structures that aim to accumulate water or ore tailings. Rupture of this type of structure is rare, however, depending on its location and downstream land occupation, it is associated potential damage makes it necessary to study flooded areas because of their hypothetical disruption to assist in the planning of such areas on emergency situations. The present study has as objective the initial study of the flood risk areas resulting from the hypothetical rupture of the Iraí River Dam, located in the state of Paraná, Brazil. Its geometry, acquired through digital elevation models, and created in QGIS, in AutoCAD Civil 3D, be inserted into the HEC-RAS software. The geometry was finalized, and the final information was entered, such as the boundary conditions and initial conditions considered in the situation. Six different rupture scenarios were studied, altering the formation time and the breach dimensions to perform the sensitivity test. When analyzing the results of the simulations, one of the scenarios was chosen to be considered representative. With the chosen scenario, the effects of a flood resulting from the rupture affected areas of high demographic density, such as Bairro Boqueirão, of Curitiba, and the great tourist importance, such as the Municipal Zoo of Curitiba, in addition to approaching the International Airport Afonso Pena, one of the main in the State, therefore needing to carry out studies to alerting the population.

Keywords: Dam break, Iraí Dam, hydrodynamic modeling, flood map, HEC-RAS, AutoCAD Civil 3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação de brecha por galgamento: a) início da brecha no ponto mais fraco; b) brecha em forma de “v”; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão.	24
Figura 2 – Formação de brecha por piping.	25
Figura 3 - Seção transversal da barragem no HEC-RAS.	30
Figura 4 - Resultados da seção transversal logo após a montante da barragem.....	31
Figura 5 - Resultados na seção transversal logo a jusante da barragem.....	31
Figura 6 - Mapa de inundação da região de interesse.	32
Figura 7 - Comparação entre resolução de 90 e de 30 metros.	36
Figura 8 - Abrangência do projeto TOPODATA.	37
Figura 9 - Localização da APA e da Represa do Iraí	43
Figura 10 - Vista aérea da barragem e de parte de seu reservatório.	44
Figura 11 - Croqui da área escolhida para o estudo.	45
Figura 12 - Exemplo de posicionamento do <i>levee</i>	47
Figura 13 - Geometria finalizada no HEC-RAS.	50
Figura 14 - <i>Stage and Flow Hydrograph</i> da seção 36649,54 no cenário 6.	51
Figura 15 - <i>Stage and Flow Hydrograph</i> da seção 17000 no cenário 6.	52
Figura 16 - <i>Stage and Flow Hydrograph</i> da seção 213,32 no cenário 6.	52
Figura 17 - Evolução da inundação logo após a formação da brecha (1), às 6h (2), às 12h (3) e às 24h (4), no cenário 6.	53
Figura 18 - Mapa de inundação gerado a partir dos dados do sexto cenário.....	54
Figura 19 – Antes e depois da ruptura da Barragem de Malpasset.	62
Figura 20 - Vista do maciço da barragem antes e depois do processo de formação da brecha.	63
Figura 21 – Na primeira imagem é possível ver o orifício formado pela falha na fundação. Na segunda, a situação 11 dias após o surgimento do orifício.	64
Figura 22 – Danos causados pela ruptura da Barragem de Apertadinho.....	65
Figura 23 – Barragem de Algodões I rompida.....	65
Figura 24 – Aldeia alagada em decorrência da ruptura da represa.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espaçamento recomendado entre seções transversais.....	35
Tabela 2 - Coeficiente de Manning considerados no projeto.	47
Tabela 3 - Cenários de ruptura simulados.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de barragens e suas falhas mais recorrentes.....	23
Quadro 2 - Variação dos possíveis valores para as características da brecha.	27
Quadro 3 - Modelos de simulação para ruptura de barragens disponíveis mundialmente.....	29
Quadro 4 - Coeficientes de Manning para canais naturais.....	38
Quadro 5 - Coeficientes de Manning para canais artificiais.	38
Quadro 6 - Coeficientes de Manning para planícies de inundação.	39
Quadro 7 - Número esperado de vítimas em função do tempo de aviso.	41
Quadro 8 - Definição das consequências do Risco Hidrodinâmico.	42

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
SNISB	- Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
CNRH	- Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DNPM	- Departamento Nacional de Produção Mineral
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	- Plano de Segurança de Barragem
PAE	- Plano de Ação de Emergência
CRI	- Categoria de Risco
DPA	- Dano Potencial Associado
MDE	- Modelo Digital de Elevação
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
INPE	- Instituto de Pesquisas Espaciais
USBR	- <i>United States Bureau of Reclamation</i>
APA	- Área de Preservação Ambiental
SNIRH	- Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS	18
2.1.1 Legislação brasileira para segurança de barragens.....	18
2.1.2 Análise de risco	20
2.1.2.1 Classificação das barragens quanto ao risco	21
2.2 RUPTURA DE BARRAGENS.....	22
2.2.1 Impactos causados em decorrência da ruptura de barragens.....	22
2.2.2 Formas de ruptura de barragens.....	23
2.2.2.1 Galgamento (<i>overtopping</i>)	24
2.2.2.2 Erosão interna (<i>piping</i>)	24
2.2.2.3 Falhas na fundação	25
2.2.2.4 Falhas no projeto, na construção ou na operação.....	25
2.3 CENÁRIOS DE RUPTURA	26
2.4 FORMAÇÃO DE BRECHA.....	27
2.5 MODELAGEM DA ONDA DE RUPTURA.....	28
2.5.1 Software HEC-RAS	32
2.6 DADOS NECESSÁRIOS PARA A SIMULAÇÃO.....	34
2.6.1 Dados topográficos	34
2.6.1.1 Modelos digitais de elevação gratuitos	35
2.6.1.2 Coeficiente de Manning	37
2.6.2 Dados hidráulicos	40
2.7 MAPA DE INUNDAÇÃO	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.2 PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA SIMULAÇÃO	45
3.2.1 Cenário de ruptura	48
3.3 CONSTRUÇÃO DO MAPA DE INUNDAÇÃO	49

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	50
4.1 VAZÕES E ALTURAS DO NÍVEL D'ÁGUA.....	51
4.2 EVOLUÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA.....	53
4.3 MAPA DE INUNDAÇÃO.....	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	58
ANEXO 1 – CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGEM	62

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2016), barragens são estruturas físicas que represam um curso d'água e, com essa construção, são criados os reservatórios, onde um volume de água permanece acumulado. As barragens podem apresentar diversas finalidades, como o acúmulo de água para a irrigação de plantios em fazendas; para geração de energia hidroelétrica; para disposição permanente ou temporária de rejeitos minerais; e também para disposição de resíduos industriais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Barragens são construções complexas, apresentando risco e potencial de dano elevados, dependendo de sua alocação. Portanto, em caso de acidentes, as consequências são custosas e com danos significativos. No caso de barragens que reservam água, o maior impacto decorre da propagação da onda de ruptura, podendo danificar residências, estradas, pontes, e ocasionar a morte de pessoas e animais localizados a jusante da barragem, caso não haja a devida evacuação. Já estruturas que armazenam rejeitos de minério, como o caso da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, além do impacto sofrido pela onda, o material armazenado altera a qualidade do solo, da água, conseqüentemente, os prejuízos ambientais podem ser muito maiores do que o rompimento de uma barragem de água.

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), de um total de cerca de 24 mil barragens no Brasil, somente 780 foram efetivamente vistoriadas recentemente por algum órgão fiscalizador, dos quais 4 são federais e 39 estaduais. Estes dados são preocupantes, pois boa parte das barragens brasileiras tem sua localização próxima a regiões povoadas. Por esse motivo, é importante que, em qualquer que seja a estrutura, deve-se realizar um estudo para o desenvolvimento do mapa de inundação, decorrente da ruptura hipotética da barragem. A partir desse mapeamento, pode-se criar sistemas de alerta por meio de sirenes e planos de evacuação para zonas seguras. A partir da criação da Portaria nº 70.389 em maio de 2017, o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) publicou a obrigação da apresentação do mapa de inundação para barragens de mineração, porém, ainda não existe nada relacionado a barragens de água.

O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) divulga quais barragens possuem danos potenciais baixos, médios e altos. No Paraná, pode-se citar como uma barragem de dano potencial alto a Represa do Iraí. Situada em região de grande densidade demográfica. Por esse motivo, neste trabalho será realizada a simulação da ruptura hipotética de tal represa.

É importante ressaltar, no entanto, que embora o dano potencial associado seja alto, o risco de rompimento é baixo. (SNISB, 2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a análise da inundabilidade devido a ruptura hipotética da Represa do Iraí, a qual está localizada entre as cidades de Piraquara, Quatro Barras e Pinhais, no Estado do Paraná, elaborando um mapa de inundação da área com auxílio de softwares de simulação hidráulica e de sistemas de informações geográficas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar o levantamento dos dados da barragem a ser estudada, sua geometria, dados de escoamento e as condições de contorno da mesma;
- Construir a geometria da barragem no software AutoCAD Civil 3D;
- Ajustar essa geometria no HEC-RAS;
- Realizar a simulação e a análise dos resultados gerados pelo HEC-RAS;
- Criar o mapa de inundação da região.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

As barragens, em conjunto com reservatório e as estruturas associadas a elas, são obras necessárias para uma gestão correta de recursos hídricos, contenção de rejeitos de minérios e resíduos industriais. Porém, a construção da estrutura em si e sua operação pode envolver danos potenciais para populações, bens materiais e ambientais localizadas próximas à obra. Por esse motivo, um ponto extremamente importante é a segurança destas obras.

Para garantir as condições necessárias para o seu correto funcionamento ao longo de sua vida útil, é preciso adotar medidas de prevenção e controle. Se implementadas de acordo com as normas e leis, asseguram uma probabilidade baixa de ocorrência de acidentes, ou, se ocorre algum incidente, minimiza-se o prejuízo em sua decorrência.

2.1.1 Legislação Brasileira para Segurança de Barragens

Até pouco tempo não existia uma legislação específica em relação à segurança de barragens. Porém, em 2010, foi aprovada e publicada a Lei N^o 12.334 de 20 de setembro de 2010, onde se estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens de obras para acúmulo de água, rejeitos de mineração e de resíduos industriais. Também foi criado o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, que tem como intuito o registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o Brasil, disponibilizado para a população.

Em seu parágrafo único do Art. 1^o, estipula-se que essa lei é destinada às barragens com pelo menos uma das seguintes características:

- a) Quando a altura do maciço, medida do ponto mais baixo de sua fundação, até a crista, é maior ou igual a 15 metros;
- b) Quando a capacidade total do reservatório for maior ou igual a 3.000.000 m³;
- c) Reservatórios que contenham resíduos perigosos;
- d) Ser categorizado com dano potencial associado médio ou alto.

A Lei também estabelece quais são os objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). São elas: garantir os padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências regularmente; regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento; operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o Brasil; monitorar e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis pela barragem; criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, baseada na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; agrupar as informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragem pelo governo; estabelecer conformidades técnicas que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público; e por fim, potencializar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

A Lei Nº12.334/2010 também atribui aos empreendedores e aos responsáveis técnicos por eles escolhidos a responsabilidade de desenvolver e executar o Plano de Segurança de Barragem (PSB). O PSB deve conter:

- “ - Identificação do empreendedor;
- Dados técnicos referentes à implantação da obra;
- Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;
- Manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- Indicação da área de entorno das instalações e seus acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da obra;
- Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;
- Relatórios de inspeção de segurança;
- Revisões periódicas de segurança. ”

Pela lei, somente para barragens com dano potencial associado alto é obrigatória a confecção do PAE, que deve conter diversas informações sobre as possíveis situações de emergência, como quais seriam as ações preventivas e corretivas a serem tomadas nesses casos, possíveis responsáveis e causas da

ruptura, e, principalmente, quais as estratégias de divulgação para alertar as comunidades potencialmente afetadas pela decorrência da ruptura da barragem.

2.1.2 Análise de risco

Entende-se por análise de risco o conjunto de procedimentos relativos à identificação de acontecimentos indesejáveis, que conduzem à materialização dos riscos, à análise dos mecanismos que desencadeiam essas situações e à determinação das respostas da estrutura e das respectivas consequências (estimativa da extensão, da amplitude e da probabilidade da ocorrência de perdas). Em uma análise de risco, levam-se em conta três elementos: um acontecimento; uma probabilidade associada à ocorrência desse acontecimento e um dano potencial em decorrência ao acontecimento (3º SIMPÓSIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS E RISCOS ASSOCIADOS, 2008).

Segundo Viseu (2006), os riscos a que a sociedade está sujeita podem ser divididos em:

- a) Riscos naturais: considerados não evitáveis, como doenças e ocorrências de relâmpagos, muitas vezes estes são riscos inconscientes ou riscos desconhecidos;
- b) Riscos involuntários ou impostos: que são tecnicamente evitáveis, porém inerentes à vida quotidiana da sociedade moderna, como acidentes de trânsito;
- c) Riscos voluntários: os chamados evitáveis, aqueles que o indivíduo aceita incorrer, desde que os benefícios se sobressaiam sobre os malefícios.

Ainda segundo Viseu (2006), os riscos no que se diz respeito aos serviços de proteção civil são classificados em dois tipos:

- a) Tecnológicos: ou seja, que envolvem a falha de elementos feitos pelo homem, como a emissões nucleares e a rotura de estruturas;
- b) Naturais: provocados por eventos meteorológicos, geofísicos ou ambientais.

No caso das barragens, pode-se considerar que os tipos de risco seriam o imposto e o tecnológico. Imposto, pois a população à jusante não controla a construção e, muitas vezes, não obtém nenhum benefício da mesma; e tecnológico pois é uma estrutura feita pelo homem.

Os danos provocados por uma ruptura hipotética de barragem estão associados ao risco potencial que o vale a jusante está sujeito. Já os riscos efetivos dependem da probabilidade de ocorrer um evento que coloque em risco a segurança da estrutura, como atividades hidrológicas, sísmicas e deslizamentos de terra a montante; a probabilidade de o acidente efetivamente ocorrer; e as consequências desse acontecimento, que depende de três fatores: grau de perigo, vulnerabilidade e exposição, considerando como sendo a porcentagem do valor exposto ao risco (VISEU, 2006). Com isso, temos a seguinte equação (1):

$$R_{ef} = P_1 \cdot P_2 \cdot Consequência \quad (1)$$

Onde, P1 é a probabilidade de acontecer o evento e P2 é a probabilidade de acontecer a ruptura.

Em casos voltados à segurança de barragens, é impossível sua estrutura estar 100% segura. Por esse motivo, sempre é necessário realizar a avaliação de risco. Esta pode ser realizada em duas etapas: a primeira é a análise de risco, e a outra é a apreciação do mesmo.

2.1.2.1 Classificação das barragens quanto ao risco

Segundo a Lei Nº 12.334/2010, a classificação das barragens presentes no Brasil é realizada pelos agentes fiscalizadores, por categorias de risco, dano associado e por seu volume, baseando-se nos critérios gerais estabelecidos pelo CNRH. Para classificação da categoria de risco (CRI), são levadas em consideração as características técnicas, o estado de conservação da construção e o atendimento ao Plano de Segurança de Barragem.

O CRI pode ser calculado a partir da soma dos três componentes citados acima e, com o resultado, pode ser classificado em: alto ($CRI \geq 60$), médio ($35 < CRI < 60$) e baixo ($CRI \leq 35$) (BRASIL, 2012).

A categoria de dano potencial associado (DPA) é classificado quanto ao potencial de perda de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura hipotética da barragem.

Com o resultado da soma dos componentes acima, a obra pode ser classificada em: alto ($DPA \geq 16$), médio ($10 < DPA < 16$) e baixo ($DPA \leq 10$). (BRASIL, 2012).

2.2 RUPTURA DE BARRAGENS

2.2.1 Impactos causados em decorrência da ruptura de barragens

As consequências da ruptura de uma barragem podem ser enormes. Os sinistros podem incluir danos a propriedades, perdas de vidas humanas, interrupção de atividades econômicas, destruição ao meio ambiente, e prejuízos intangíveis. A maior diferença entre a ruptura de uma barragem e a enchente em decorrência da precipitação é que há maior concentração de perda de vidas humanas e prejuízos econômicos em um menor espaço de tempo no primeiro caso (COLLISCHONN, 1997).

Ellingwood *et al.* (1993) dividem os impactos de um rompimento de barragem em:

- a) Prejuízos à propriedade: esse tipo de prejuízo tem início na perda da própria barragem, e barragens à jusante, se estas forem atingidas. Usinas e casas de máquinas também devem ser consideradas, se forem afetadas. Após isso, tem-se as perdas de estruturas privadas como residências, automóveis, prédios comerciais e estoque de produtos. É preciso considerar também estruturas do governo, como estradas, pontes, bem como terrenos em áreas urbanas ou rurais profundamente alterados pela cheia.
- b) Interrupção de atividades: interrupção em processos de manufatura, serviços, fornecimento de água, transportes, atividades agrícolas e de extrativismo, geração hidrelétrica e atividades recreacionais.
- c) Atividades de emergência: operações de busca e resgate, assistência médica no local, evacuação e custos de hospedagem temporária dos desabrigados.
- d) Mortalidade e danos à saúde: podem ser considerados diretos, mortes causadas efetivamente pelo rompimento da barragem, e os danos indiretos, como doenças desenvolvidas em consequência do evento, tanto doenças físicas, como emocionais e mentais.

- e) Danos ambientais: alteração do habitat, destruição da fauna e flora, modificações morfológicas de cursos d'água, desmatamento e deterioração visual.
- f) Prejuízos culturais: ocorre se a cheia atinge locais históricos ou objetos de valor cultural.

2.2.2 Formas de ruptura de barragens

Falhas em barragens podem ser provocadas por forças externas ou internas. Segundo Xiong (2011), o fracasso da barragem pode ocorrer por razões diferentes, que variam entre infiltração, erosão interna, galgamento, liquidação devido ao escorregamento de taludes e liquefação devido a terremotos.

Santos, França e Almeida (2007) construíram um quadro onde descrevem o tipo de barragem e o tipo mais frequente de falha da respectiva estrutura.

Quadro 1 - Tipos de barragens e suas falhas mais recorrentes.

TIPO DE BARRAGEM	FORMA DE RUPTURA
Aterro	Galgamento
	Erosão interna
	Escorregamento de fundação
	Ação de ondas da albufeira
	Erosão da fundação a jusante da barragem
Concreto gravidade	Deterioração dos materiais
	Falha na fundação
	Falta de estabilidade do corpo da barragem
	Erosão da fundação a jusante da barragem
	Atos de guerra
Concreto em arco	Falha dos encontros laterais do vale da fundação
	Saturação das fundações rochosas
	Carga excessiva resultante de um excessivo enchimento da albufeira
	Deslizamento do corpo da barragem
	Erosão da fundação a jusante da barragem

Fonte: Santos, França e Almeida, 2007

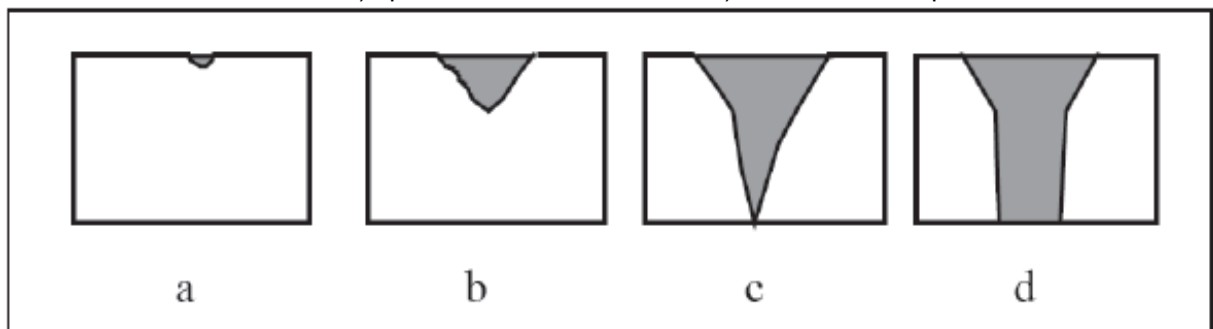
Dentre todas as falhas, o enfoque no referencial será dado ao galgamento; erosão interna (também conhecida como *piping*); falhas nas fundações; e falhas no projeto, construção ou operação.

2.2.2.1 Galgamento (*overtopping*)

O galgamento é o resultado da incapacidade do vertedouro da barragem, fazendo com que o material contido na mesma extravase. Essa situação pode fazer com que se desencadeie um processo de ruptura do maciço da barragem, o que normalmente acontece mais em barragens de terra. Isso pode ocorrer, segundo Collischonn (1991) por: má operação do reservatório durante a cheia; pelo acontecimento de uma cheia extraordinária, não planejada, e por formação de ondas dentro do reservatório, seja por atividades sísmicas ou deslizamentos de grandes quantidades de terra a montante.

Dependendo do tempo e da intensidade desse galgamento, inicia-se a formação de uma brecha no ponto mais frágil da crista. Com o tempo, a brecha aumenta, dependendo do material da barragem e da velocidade do galgamento. A seguir, a Figura 1 apresenta uma representação da formação da brecha por galgamento.

Figura 1 – Formação de brecha por galgamento: a) início da brecha no ponto mais fraco; b) brecha em forma de “v”; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão.



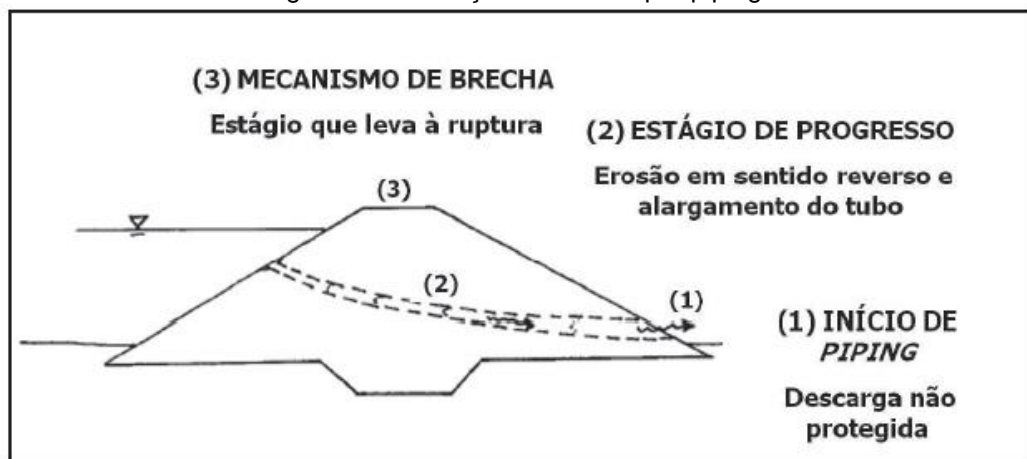
Fonte: COLLISCHON, 1997

2.2.2.2 Erosão interna (*piping*)

Esse tipo de falha ocorre por erosão regressiva, formando um tubo, originado do carregamento de partículas, de jusante para a montante no maciço de terra

compactada de uma barragem. Esse tubo tende a aumentar gradativamente, até o colapso da estrutura. Acontece majoritariamente em barragens de terra. O grau de compactação do solo, o dimensionamento do sistema de drenagem interna do maciço e o monitoramento de parâmetros geotécnicos são fatores determinantes para que esse processo ocorra ou não. A Figura 2 mostra a formação da brecha por *piping* em barragem sem filtro interno.

Figura 2 – Formação de brecha por piping.



Fonte: LADEIRA, 2007.

2.2.2.3 Falhas na fundação

O terreno na qual está apoiada a barragem e sua ligação podem deslizar sob o efeito das acomodações geológicas, ocasionando o enchimento do reservatório ou da saturação do material da fundação por infiltração. Também podem acontecer por meio das cheias extraordinárias, pois quando a água passa sobre a barragem, há uma erosão na base da estrutura, podendo leva-la ao colapso (COLLISCHONN, 1997).

2.2.2.4 Falhas no projeto, na construção ou na operação

Por ser uma obra de grande porte e complexa, barragens exigem critérios de segurança bem rígidos durante todas as fases, sendo de projeto, de construção ou operação. Dentre as falhas dessa natureza, segundo Lauriano (2009), pode-se citar:

- a) Projetos de vertedouros com capacidade inferior às cheias de maior magnitude;
- b) Falhas nos procedimentos de sondagem;
- c) Utilização de materiais de má qualidade;

- d) Execução inadequada de drenagem, ancoragem, compactação, limpeza e tratamento da fundação;
- e) Desobediência às regras de manutenção;
- f) Falta de manutenção correta; e
- g) Falhas na instalação e registro da instrumentação.

Alguns casos de rompimento de barragem e suas consequências podem ser vistas no Anexo I, na página 62.

2.3 CENÁRIOS DE RUPTURA

Segundo Balbi (2008), cenário de ruptura pode ser caracterizado como uma combinação de situações no momento em que a barragem se rompe. Dentre as circunstâncias, pode-se citar: evento iniciador, nível de água no reservatório, modo de ruptura, tipo de brecha e a presença de pessoas à jusante da barragem no momento da ruptura. Com isso, pode-se afirmar que cada barragem pode ter inúmeros cenários de ruptura e, para realização de estudos sobre o assunto, é necessário escolher situações que tornem a análise representativa, que sejam potencialmente graves à área à jusante da barragem.

Viseu e Martins (1997) sugerem que o estudo apresente três cenários, sendo dois deles relacionados à ruptura hipotética da barragem e o último prevendo a operação em situações extremas, associando a uma cheia natural. Também recomendam mais de um cenário de ruptura, onde se consideraria a onda de cheia associada somente à ruptura da barragem, também chamada de “ruptura em dia seco”.

Para os estudos de uma ruptura de barragem, ICOLD (1998) recomenda seguir 4 etapas, as quais são:

- 1) Definição e simulação do evento de ruptura de barragem, com a elaboração do hidrograma de ruptura;
- 2) Propagação da onda de ruptura no vale a jusante da barragem por meio de modelos físicos e matemáticos;
- 3) Elaboração de mapas de inundação; e
- 4) Análise de risco e elaboração dos planos emergenciais.

2.4 FORMAÇÃO DE BRECHA

Segundo Collinschon (1997), a formação da brecha depende basicamente de três fatores: o seu tamanho, o seu tempo de formação e sua forma geométrica. Esses parâmetros, no entanto, dependem do tipo de ruptura e do material utilizado na construção da barragem. Por exemplo, pode-se citar que rupturas de barragem de terra ocorrem de forma mais lenta e a ruptura pode não ser completa. Já barragens de concreto em arco têm maior tendência de se romper em menos tempo e completamente.

Quando se relaciona a formação da brecha com o esvaziamento do reservatório, o tempo de formação dessa brecha é de grande importância. Ainda segundo Collinschon (1997), uma brecha formada rapidamente não proporciona uma grande alteração no nível d'água até que a brecha chegue ao seu tamanho final. Como consequência, tem-se uma grande vazão pois dois efeitos são sobrepostos: o grande nível d'água e o máximo tamanho da passagem. Quando a brecha se forma lentamente, o nível d'água no reservatório será mais baixo quando a brecha atingir seu tamanho máximo.

Para a escolha dos parâmetros da brecha, pode-se utilizar a Quadro 2.

Quadro 2 - Variação dos possíveis valores para as características da brecha.

Tipo de barragem	Comprimento da brecha	Componente horizontal da declividade dos taludes da brecha	Tempo de ruptura (h)	Referência
Concreto gravidade	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)
Concreto em arco	L	Declividade do vale	<0,1	USACE (1980)
	L	Entre 0 e a declividade do vale	<0,1	FERC (1988)
	0,8L 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)
Terra	(0,5 a 3,0) x H	Entre 0 a 1	0,5 a 4,0	USACE (1980)
	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0 a 1	0,1 a 1,0	FERC (1988)
	(2,0 a 5,0) x H	Entre 0 a 1	0,1 a 1,0	Fread (2006)
	(2,0 a 4,0) x H	Entre 0,25 a 1	0,1 a 1,0	ELETROBRÁS (2003)

Fonte: Lauriano, 2009.

Nota: L é a largura da crista da barragem (m) e H é a altura da barragem (m).

2.5 MODELAGEM DA ONDA DE RUPTURA

O escoamento da água após a ruptura de uma barragem envolve fenômenos hidráulicos muito complexos e de difícil caracterização matemática, pois esse escoamento é tridimensional, com as grandezas hidráulicas variando amplamente no tempo e no espaço (MONTE-MOR, 2004).

O objetivo da utilização de modelos hidrodinâmicos de propagação de uma onda de ruptura é simular o movimento da onda ao longo do vale a jusante da barragem. As principais informações para qualquer ponto de interesse da inundação são: o tempo de chegada da onda de ruptura; o tempo de chegada do nível de água máximo atingido; as profundidades e velocidades da onda de ruptura nos pontos de interesse; e a duração da inundação. Porém, como qualquer simulação, esta pode ser influenciada por diversos fatores, como: hipóteses adotadas, esquemas numéricos de resolução, condições de simulação (iniciais e de contorno) e dados de entrada (LAURIANO, 2009).

Ainda segundo Lauriano (2009), modelos de simulação do escoamento podem ser divididos em cinco tipos, por ordem crescente de precisão:

- a) Modelos simplificados;
- b) Modelos hidrológicos;
- c) Modelos hidrodinâmicos unidimensionais (1D);
- d) Modelos hidrodinâmicos bidimensionais (2D); e
- e) Modelos físicos tridimensionais (3D).

Existem, atualmente, diversos softwares que são capazes de realizar esse tipo de simulação. Na Quadro 3 estão alguns dos mais conhecidos softwares de simulação de ruptura de barragem.

Quadro 3 - Modelos de simulação para ruptura de barragens disponíveis mundialmente.

	Modelo	Organização/Suporte
1D	HEC-RAS	USACE
	MIKE 11	DHI
	DAMBRK	NWS
	SMPDBK	NWS
	FLDWAV	NWS
	Hydro 1D	Mott MacDonald
	InfoWorks RS	Wallingford Software
	ISIS	Wallingford Software
	BOSS DAMBRK	Boss International
	SOBEK	WL/Delft Hydraulics
	DBK 1	IWHR, China
	Cliv PLUS	EPUSP
	HAESTED DAMBRK	HAESTED METHODS
	LATIS	Tams
	RUPTURE	EDF - Laboratoire National Hydraulique
DAMBRK-UK	Binnie & Partners	
2D	MIKE 21	DHI
	JFLOW	Jeremy Benn Associates
	Hydro 2D	Mott MacDonald
	DIVAST	Cardiff University
	DelftFLS	Delft Hydraulics
	SMS	USACE, EMRL e FHWA
	DBK 2	IWHR, China
	FLOOD 2D	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
3D	MIKE 3D	DHI
	Hydro 3D	Mott MacDonald
	Delft 3D	Delft Hydraulics

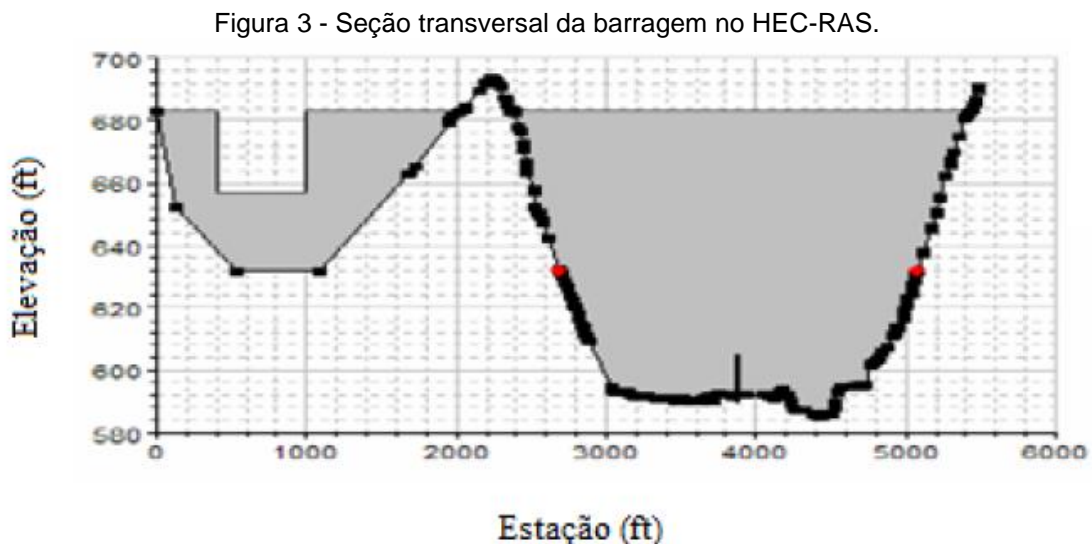
	FLUENT	FLUENT
	TRIVAST	Cardiff University
	TELEMAC-3D	EDF – Ladoratoire National Hydraulique

. Fonte: LAURIANO, 2009, Alterado.

Xiong (2011) e Anckerman e Brunner (2016) publicaram artigos que se tornaram importantes nesse ramo da pesquisa. Eles modelaram a ruptura da mesma barragem, a Foster Joseph na Pensilvânia (EUA), porém, apresentaram resultados de formas diferentes. Xiong (2011) realizou a modelagem com três condições diferentes: sem a barragem, com a ruptura da barragem e sem a ruptura. Considerou o *piping* como forma de ruptura, que se iniciou na cota 660 e que o regime seria permanente variado.

Já Anckerman e Brunner (2016) realizaram a modelagem do rio que aflui para a barragem. O software utilizado foi o HEC-GeoRAS (interface do HEC-RAS no ArcGIS) e o exportou os dados para o HEC-RAS para realizar a modelagem e obter os resultados.

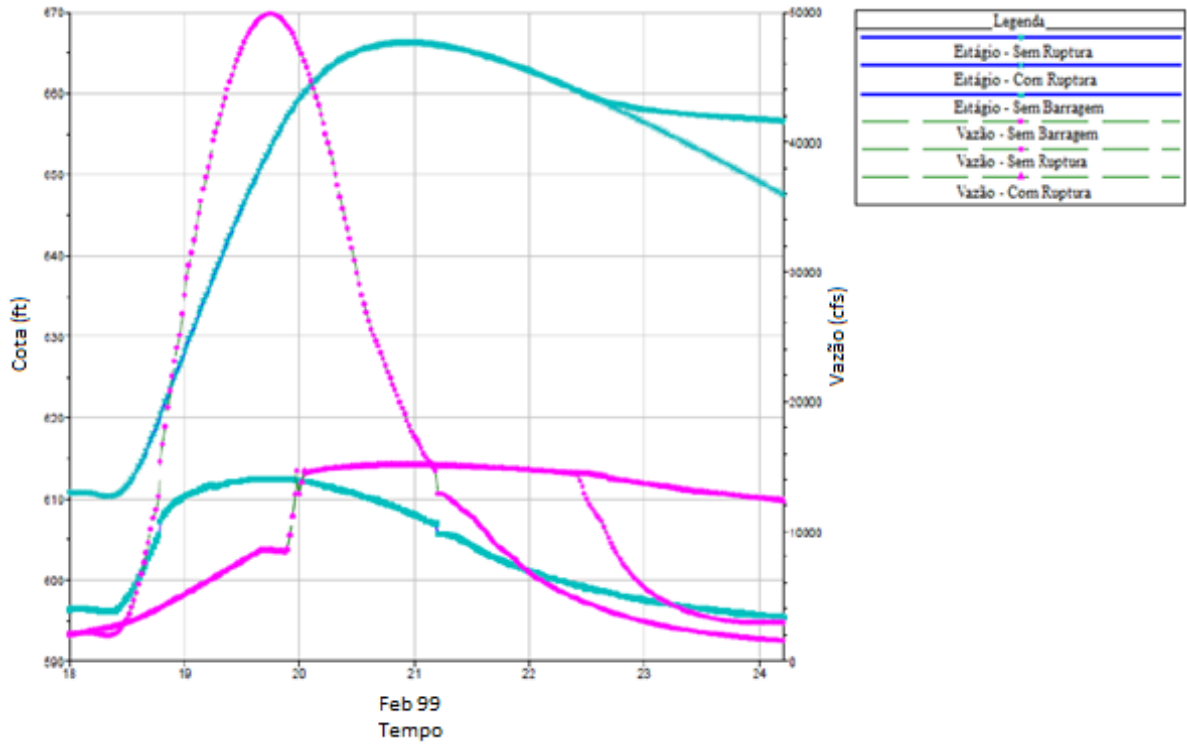
A seguir, a Figura 3 mostra a seção transversal da barragem modelada.



Fonte: Adaptado de XIONG, 2011 e ANCKERMAN E BRUNNER, 2016.

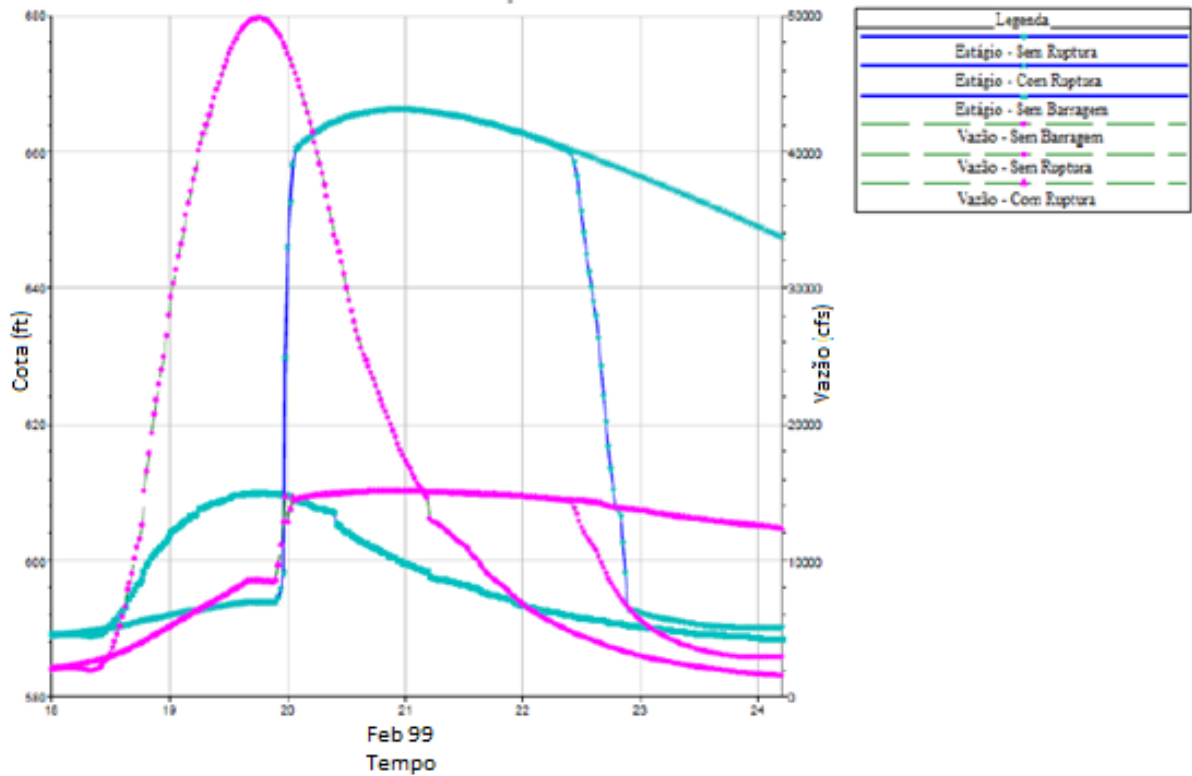
A Figura 4 e a Figura 5 apresentam os resultados de Xiong (2011) em dois locais diferentes.

Figura 4 - Resultados da seção transversal logo após a montante da barragem.



Fonte: Adaptado de XIONG, 2011.

Figura 5 - Resultados na seção transversal logo a jusante da barragem.

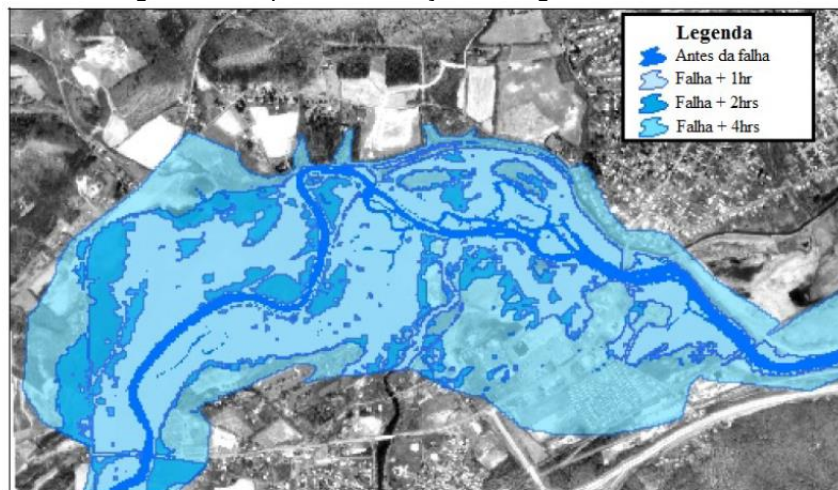


Fonte: Adaptado de XIONG, 2011.

A Figura 4 indica as condições do reservatório, onde pode ser notado que a vazão de pico é maior nos cenários “sem ruptura” e “com ruptura”, enquanto que no cenário “sem barragem” é reduzido. Na Figura 5 é possível perceber que o cenário “com ruptura” apresenta uma maior cota por mais tempo, enfraquecendo a resistência da barragem e aumentando a brecha, causando a ruptura da barragem (XIONG, 2011).

Já Anckerman e Brunner (2016) apresentam o mesmo resultado, porém, em forma de mapa de inundação, mostrando as áreas afetadas pela ruptura hipotética. (Figura 6).

Figura 6 - Mapa de inundação da região de interesse.



Fonte: Adaptado de ACKERMAN E BUNNER, 2016.

Os dois autores citados no exemplo deixam clara a importância da avaliação da ruptura por meio do software HEC-RAS, obtendo a modelagem hidráulica do rio, da barragem e, com o uso de softwares GIS associado a esses resultados, pode-se obter informações das consequências da ruptura da barragem, antecipando a criação de ações de mitigação

2.5.1 Software HEC-RAS

O software a ser utilizado nesse estudo é denominado HEC-RAS, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center*) do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*U. S. Army Corps of Engineers – USACE*).

O modelo era inicialmente utilizado para simulações de perfis de linhas d'água para escoamentos unidimensionais estacionários (de fluxo permanente). Desde o ano 2000, com a atualização para a versão 3.0, foi incorporado ao software um módulo, permitindo que o HEC-RAS realize simulações com escoamento não permanente. (LAURIANO, 2009).

As equações que regem a modelagem no software são as ditas equações unidimensionais originais de fluxo não permanente em leitos fluviais, desenvolvidas por Adhémar Jean Claude Barre de Saint-Venant. Ainda de acordo com Lauriano (2009), as equações de Saint-Venant, quando trabalhadas sob forma unidimensional, estas podem ser descritas pelas equações de Conservação de Massa (2) e Conservação da Quantidade de Movimento (3), escritas abaixo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_o - S_f) \quad (3)$$

Onde:

t – variável independente relativa ao tempo (s);

x – variável independente relativa à direção do escoamento (m);

u – velocidade média do escoamento (m/s);

g – aceleração da gravidade (m²/s);

h – espessura da lâmina líquida (m);

S_o – declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

S_f – declividade média da linha de energia (m/m), equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito.

Segundo Rocha (2015), na aplicação do programa em estudos de ruptura de barragem, algumas hipóteses são obrigatoriamente adotadas:

- o escoamento é unidimensional, que pode ser representado pela velocidade média da seção transversal, e a linha d'água é horizontal em todas as seções do canal;
- o escoamento ocorre predominantemente na longitudinal e, por esse motivo, não é possível representar nenhuma interação complexa entre o canal e a planície de inundação e nem escoamentos complexos ao longo da planície de inundação;

- o escoamento é gradualmente variado considerando-se válida a hipótese da distribuição hidrostática de pressões na vertical e desprezando-se efeitos de componentes de aceleração vertical;
- o fluido é incompressível;
- as condições de contorno do canal são fixas e, portanto, não são simuladas erosões e deposições na calha; e
- a resistência ao escoamento pode ser aproximada por fórmulas empíricas como as propostas por Manning ou Chezy.

2.6 DADOS NECESSÁRIOS PARA A SIMULAÇÃO

Os dados para a realização de uma modelagem de ruptura de barragem e o mapeamento de áreas inundáveis podem ser divididos em: dados topográficos e dados hidráulicos. Os dados topográficos retratam a geometria dos cursos d'água modelados, o que pode ser feito a partir de levantamentos de seções topobatimétricas do vale a jusante da barragem, dados da configuração do solo tanto na calha do rio quanto nas regiões inundáveis, por meio da cartografia existente, imagens de satélite, entre outros. Os dados hidráulicos são compostos por fluviogramas e hidrogramas, dados de medições de vazão e velocidade, curvas cota-descarga, volume do reservatório, área superficial do reservatório, coeficientes de rugosidade, entre outras características. (CUNGE *et al.*, 1980 *apud* LAURIANO, 2009).

2.6.1 Dados topográficos

Os dados topográficos podem ser divididos em dados quantitativos e qualitativos. Segundo Brasil (2005), os dados qualitativos referem-se à identificação de elementos dos cursos d'água que influenciam sobre a cheia, como diques, encabeçamento de pontes e obstáculos nas planícies de inundação. Esse tipo de informação pode ser obtido a partir de mapas, fotografias aéreas, imagens de satélite, entre outros. Já os chamados dados quantitativos, de acordo com Lauriano (2009), são os que fazem a representação do curso d'água e das planícies de inundação no modelo, como a capacidade de armazenamento do sistema e as direções preferenciais do escoamento. Sabendo disso, para a representação da região, são

necessários os perfis longitudinais e seções transversais do curso d'água, indicando a presença de planícies de inundação e a delimitação de áreas rurais e urbanas.

Em relação ao espaçamento entre as seções transversais, o Departamento de Minas e Recursos Naturais do Estado de Queensland (NRM), da Austrália, recomenda a escolha desses valores em função do comprimento do curso d'água e do volume do reservatório (LAURIANO, 2009) (Tabela 1):

Tabela 1 - Espaçamento recomendado entre seções transversais.

Volume do reservatório (hm³)	Distância recomendada entre as seções (km)	Comprimento do curso d'água principal a ser considerado (km)
20	$D > 1$	$L > 60$
2	$0,5 < D < 1$	$L > 20$
0,2	$D < 0,5$	$L > 5$

Fonte: NRM, 2002 *apud* Lauriano, 2009.

Sobre o comprimento do vale a jusante a ser estudado, a USBR (1999) sugere que a modelagem e o mapeamento sejam realizados nos primeiros 30 km de extensão após a barragem, pois considera que a vulnerabilidade da população em risco diminui a partir dessa distância, visto que os moradores são mais avisados, apresentando mais tempo para evacuação, e a capacidade destrutiva da onda de cheia diminui com a distância.

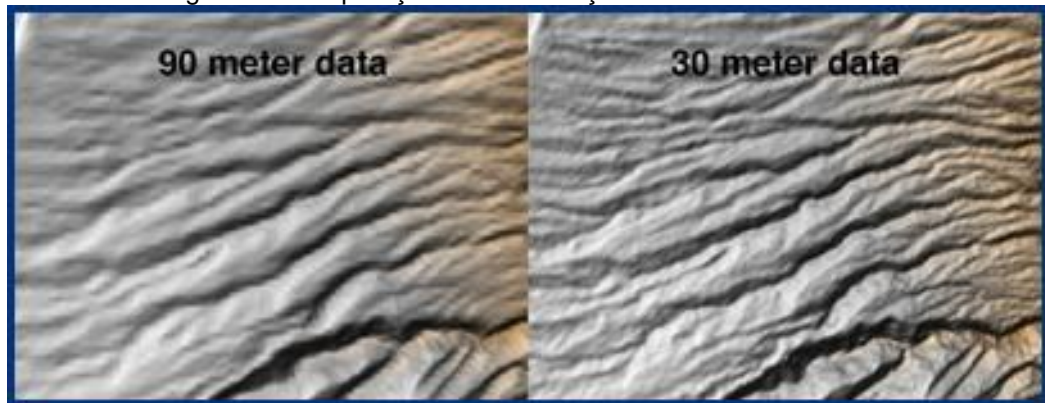
No presente trabalho, os dados topográficos (curvas de nível) foram obtidos a partir de MDEs (modelos digitais de elevação).

2.6.1.1 Modelos digitais de elevação gratuitos

Os MDEs são uma alternativa para a criação de base topográfica, onde utiliza as técnicas do sensoriamento remoto para sua construção. Nesse método, o imageador realiza seu deslocamento emitindo um sinal a partir de uma antena central e esse sinal, ao retornar, registra as informações por antenas auxiliares posicionadas em uma distância conhecida (ROCHA, 2015). Um exemplo é o projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), originado da cooperação entre a NASA e a *National Imagery and Mapping Agency*, do Departamento de Defesa dos Estados Unidos e das agências espaciais alemã (DLR) e italiana (ASI), sendo seu sobrevoo no ano 2000.

Até o começo do ano de 2015, os dados topográficos do projeto eram distribuídos gratuitamente com uma resolução de 90 metros, com exceção dos Estados Unidos, onde era disponibilizado com resolução de 30 metros. Porém, após a Cúpula do Clima realizada em Nova York, em setembro de 2014, a resolução de 30 metros passou ser disponibilizada gratuitamente em escala global. Abaixo, está uma demonstração comparando dados com 90 e 30 metros de resolução (Figura 7) (EMBRAPA, 2019).

Figura 7 - Comparação entre resolução de 90 e de 30 metros.

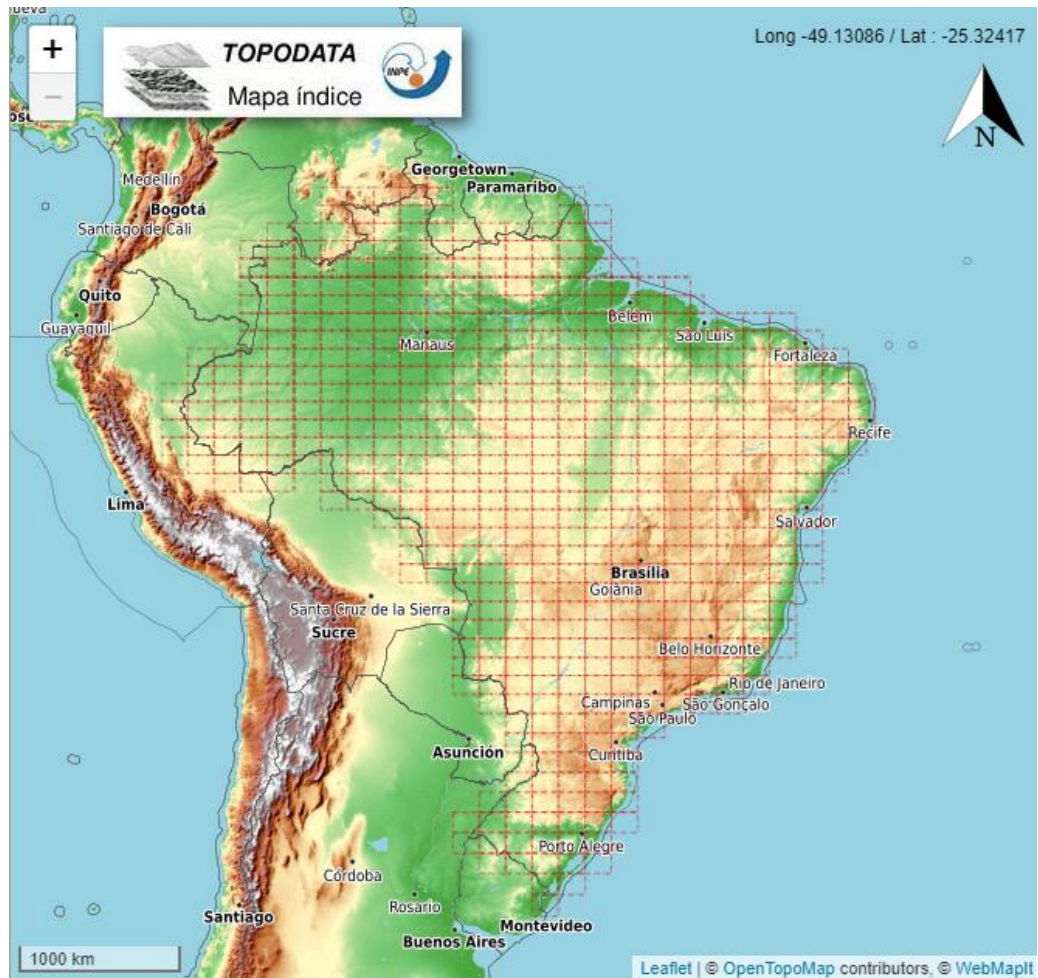


Fonte: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

O objetivo principal do projeto SRTM era obter dados topográficos plausíveis globalmente e com erro vertical absoluto e relativo inferior a 16 metros e a 10 metros, respectivamente. Após a validação global, o erro absoluto em todo o mundo variou entre 5,6 e 9,0 metros, com uma confiança de 90%, sendo que na América do Sul o erro vertical pode chegar a 6,2 metros (FARR *et al.*, 2007 *apud* ROCHA, 2015).

Anteriormente a decisão da Cúpula do Clima em 2014, o INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais) já vinha desenvolvendo o projeto TOPODATA (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), que tinha como objetivo refinar os dados do projeto SRTM com resolução de 90 metros, por meio de interpolação das grades de altitude, para que a resolução se tornasse de 30 metros. Esses dados estão disponíveis desde novembro de 2011 (INPE, 2019).

Figura 8 - Abrangência do projeto TOPODATA.



Fonte: INPE, 2019.

Rocha (2015) afirma que a utilização do MDE em modelagens hidráulicas, o maior impasse é o fato de que a interferometria por radar não possibilita a obtenção da geometria da calha do rio abaixo do nível d'água. E ainda, pelo tamanho do pixel ser de 30 metros, as elevações no entorno do curso d'água são representadas em conjunto com a elevação do rio em um único pixel, superestimando a elevação do fundo do curso d'água. Outra dificuldade é que esse tipo de modelo não desconsidera a elevação dos objetos, como árvores em regiões densamente florestadas.

2.6.1.2 Coeficiente de Manning

O coeficiente de Manning é o valor que descreve a resistência do fluxo devido rugosidade do canal ou da planície de inundação. Ele pode ser específico para cada seção ou para cada trecho do corpo d'água.

Abaixo estão quadros que apresentam alguns valores de coeficiente de rugosidade para canais naturais (Quadro 4), canais artificiais (Quadro 5) e para planícies de inundação (Quadro 6).

Quadro 4 - Coeficientes de Manning para canais naturais.

Tipo de canal		Tamanho médio das partículas (mm)	Coeficiente de Manning ($m^{1/3}s^{-1}$)	
			Jarrett (1985)	Chow (1959)
Leito móvel		0,2 até 0,4	0,012 até 0,020	-
		0,4 até 0,6	0,020 até 0,023	-
		0,6 até 1,0	0,023 até 0,026	-
Leito estável	Terra firme	-	0,025 até 0,032	0,020
	Areia grossa	1,0 até 2,0	0,025 até 0,032	-
	Cascalho	2,0 até 64,0	0,025 até 0,032	-
	Pedra arredondada	64,0 até 256,0	0,030 até 0,050	-
	Seixo	> 256,0	0,040 até 0,070	-

Fonte: Brasil, 2005.

Quadro 5 - Coeficientes de Manning para canais artificiais.

Tipo de canal e descrição			Coeficiente de Manning ($m^{1/3}s^{-1}$)		
			Mínimo	Médio	Máximo
Canais construídos	Em concreto	Com acabamento	0,011	0,015	0,016
		Sem acabamento	0,014	0,017	0,020
	Com leito em cascalho	Margens em concreto	0,017	0,020	0,025
		Margens em pedra, gabião ou enrocamento	0,023	0,033	0,036
	Revestimento com espécies vegetais		0,030	-	0,050
Canais escavados ou dragados	Em terra, reto e uniforme	Limpo	0,018	0,022	0,025
		Seção uniforme, com cascalho, limpo	0,022	0,025	0,030
		Gramado, com algumas plantas rasteiras	0,022	0,027	0,033

		Sem vegetação	0,023	0,025	0,030
	Em terra, curvilíneo, fluxo lento	Gramado, com algumas plantas rasteiras	0,025	0,030	0,033
		Com muitas plantas rasteiras ou aquáticas	0,030	0,035	0,033
		Leito em solo e margens em enrocamento	0,028	0,030	0,035
		Leito em cascalho e margens com plantas	0,025	0,035	0,040
		Leito com seixos e margens em solo	0,030	0,040	0,050

Fonte: Jarrett, 1985 *apud* Lauriano, 2009.

Quadro 6 - Coeficientes de Manning para planícies de inundação.

Tipo de planície de inundação		Coeficiente de Manning ($m^{1/3}s^{-1}$)		
		Mínimo	Médio	Máximo
Pastagem	Gramma baixa	0,025	0,030	0,035
	Gramma alta	0,030	0,035	0,050
Áreas cultivadas	Nenhum cultivo	0,020	0,030	0,040
	Colheita desenvolvida	0,030	0,040	0,050
Mato	Esparso, com muitas plantas rasteiras	0,035	0,050	0,070
	Ralo	0,040	0,060	0,080
	Mediano a denso	0,070	0,100	0,160
Árvores	Grande porte	0,110	0,150	0,200
	Terreno limpo, com tocos e com algumas plantas rasteiras	0,030	0,040	0,050
	Terreno limpo, com tocos e com muitas plantas rasteiras	0,050	0,060	0,080
	Fileira densa, com nível de inundação abaixo dos galhos	0,080	0,100	0,120
	Fileira densa, com nível de inundação acima dos galhos	0,100	0,120	0,160

Fonte: Chow, 1959.

2.6.2 Dados hidráulicos

Segundo Brasil (2005), os dados hidráulicos necessários para a realização de uma modelagem hidráulica são aqueles para definir as condições de contorno e condições iniciais da simulação, como a capacidade de transporte do curso d'água, a capacidade do reservatório, o nível d'água inicial da barragem, a vazão do fluxo d'água, entre outros.

2.7 MAPA DE INUNDAÇÃO

Mapas de inundação são ferramentas essenciais para estudos de rompimento de barragem, pois informam onde a onda de cheia irá atingir e qual será o nível de danos ao espaço à jusante do reservatório. Segundo Balbi (2008), o mapeamento das áreas de risco tem como principais objetivos auxiliar na classificação das barragens quanto ao risco potencial e na elaboração do Plano de Ações Emergenciais, mostrando a extensão e o tempo esperado para que a onda de cheia atinja a região à jusante.

Viseu e Ramos (1999) afirmam que a melhor escala para esse mapa seria a de 1:25.000, pois asseguram que é uma escala razoável para a estimativa do número de edificações, ferrovias, rodovias e da ocupação do solo à jusante atingidas pela onda de cheia. Brasil (2005) sugere que a escala e intervalo entre curvas de nível sejam de, no mínimo, 1:10.000 e 1 metro, respectivamente. Porém, para grandes áreas, esse tipo de mapa raramente existe, sendo mais comum mapas com escalas de 1:25.000, 1:50.000 e 1:100.000, com curvas de nível espaçadas em 5 metros, 10 metros e 20 metros, respectivamente.

Para a realização do zoneamento de risco, ou seja, para a classificação das áreas potencialmente inundáveis em função do impacto, é preciso levar em consideração as seguintes características hidrodinâmicas (ALMEIDA, 2001 e FLOODSITE, 2007 *apud* BALBI 2008):

- Áreas atingidas (definem quais elementos de risco podem ser atingidos, como no caso de aglomerados populacionais);
- As cotas máximas dos níveis d'água (característica que apresenta maior influência nos danos);

- O tempo de chegada da onda de cheia (relevante para os tempos de alerta e de evacuação);
- O tempo de chegada à altura máxima do nível d'água;
- O valor máximo do produto da velocidade (v) pela altura (h) (corresponde ao perigo que a água pode causar na população);
- Velocidade máxima do escoamento (característica importante na capacidade destrutiva da onda de cheia); e
- A duração das submersões (para avaliar os custos materiais e o tempo de recuperação).

Destas características, os tempos de chegada da onda de cheia, as profundidades máximas e as velocidades do escoamento são os principais parâmetros fornecidos pelos estudos de propagação da onda de inundação.

O tempo de chegada da onda de inundação está relacionado ao tempo de chegada ao nível máximo da água ou vazão máxima. O tempo entre a identificação de falha na estrutura e a chegada da onda de cheia em locais povoados é a primeira característica para classificar a área de risco, pois é o que permite que a população no vale a jusante consiga receber o aviso de perigo e evacuar a região que possa ser inundada. No ano de 1999, a USBR apresentou uma estimativa de perdas de vidas em função do tempo da ruptura da barragem à chegada da onda de cheia na população, também conhecido como tempo de aviso (Quadro 7).

Quadro 7 - Número esperado de vítimas em função do tempo de aviso.

Tempo de aviso	Perda de vidas	Número esperado de vítimas
0 a 15 minutos	Significante	50% no número de pessoas em risco
15 a 90 minutos	Potencialmente significativa	(Número de pessoas em risco) ^{0,6}
Mais que 90 minutos	Perda de vidas virtualmente eliminada	0,0002 x número de pessoas em risco

Fonte: USBR, 1999.

Já quanto à profundidade de cheia (H em m) e a velocidade do escoamento (V em m/s), se for realizada a multiplicação desses fatores, segundo Balbi (2008), será obtido o risco hidrodinâmico, que é a capacidade de uma cheia provocar danos às pessoas, danificar edificações e bens materiais. Sabendo disso, foram realizados

inúmeros estudos para definição de valores desse risco hidrodinâmico, e quais seriam os danos causados em consequência deste valor. No projeto RescDam (SYNAVEN, 2000 *apud* LAURIANO, 2009), foram realizados testes variados com modelos físicos de edificações para obter valores de referência para o risco hidrodinâmico, e os valores dispostos no Quadro 8 foram definidos.

Quadro 8 - Definição das consequências do Risco Hidrodinâmico.

Risco hidrodinâmico (m²/s)	Consequências
< 0,5	Crianças e deficientes são arrastados.
0,5 – 1	Adultos são arrastados.
1 – 3	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas.
3 – 7	Danos estruturais em edifícios e possível colapso.
> 7	Colapso de certos edifícios.

Fonte: SYNAVEN, 2000 *apud* LAURIANO, 2009.

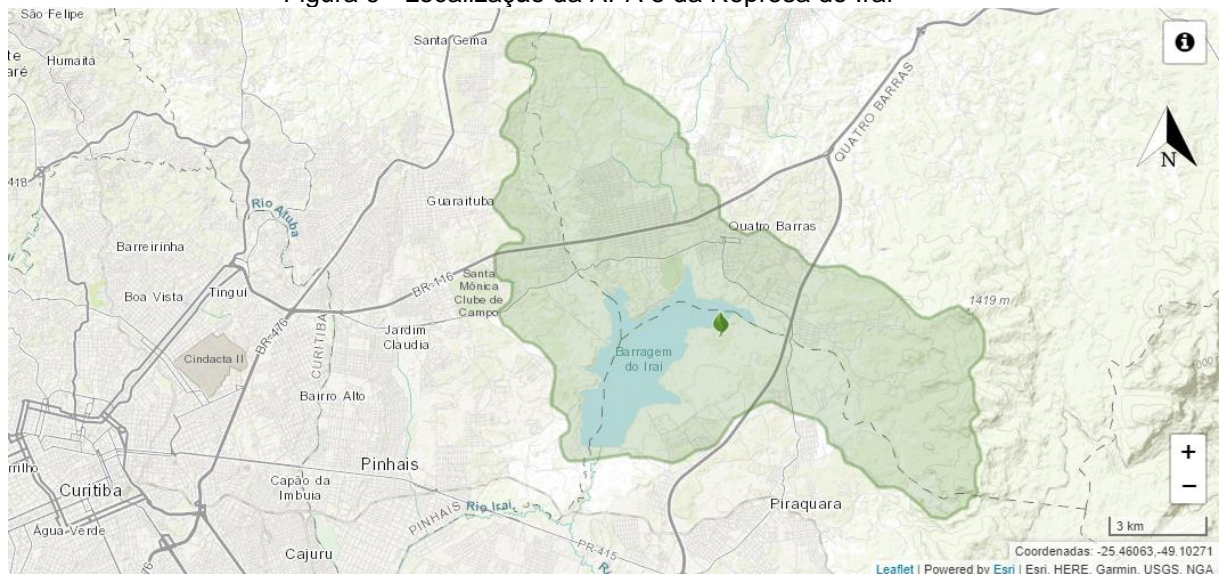
Para a construção dos chamados mapas de inundação, Lauriano (2009) afirma que existem diversos softwares de geoprocessamento no mercado, e cita: o ArcGis (ArcInfo e ArcView) da ESRI, o MapInfo, o GeoMedia (Intergraph), o MicroStation Geographics, o CIVIL 3D, o RAS Mapper, entre outros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A barragem estudada é a Represa do Rio Iraí, localizada entre os municípios de Pinhais, Piraquara e Quatro Barras, inaugurada no ano de 2000, onde atualmente faz parte da Área de Proteção Ambiental (APA) Iraí (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A Represa, segundo a Prefeitura Municipal de Pinhais, foi construída com o objetivo de abastecer cerca de 2,5 milhões de pessoas da Região Metropolitana de Curitiba, incluindo as cidades de Campina Grande do Sul, Colombo, Curitiba, Pinhais, Piraquara e Quatro Barras. Além disso, a represa também auxilia na redução de problemas de enchentes de diversos bairros em Pinhais e Piraquara. Nesta APA também nasce o Rio Iraí, um dos mais importantes da Bacia do Rio Iguaçu.

Figura 9 - Localização da APA e da Represa do Iraí



Fonte: Unidades de Conservação no Brasil, 2019.

A construção foi realizada pela empresa CESBE S.A. Engenharia e Empreendimentos. Segundo a empresa (CESBE, 2019), a barragem de terra foi construída com argila selecionada e foram utilizados cerca de 800.000 m³ de volume de aterro. Após finalização da construção, a obra apresenta 1.215 metros de extensão e 15 km² da área do reservatório.

Figura 10 - Vista aérea da barragem e de parte de seu reservatório.

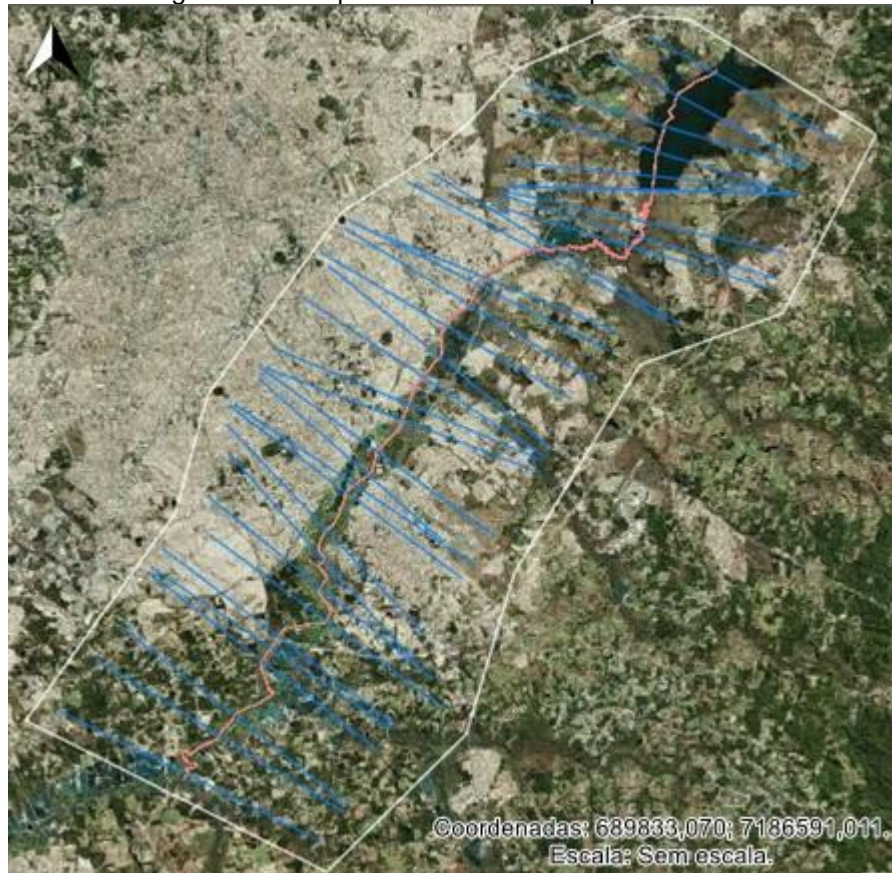


Fonte: CESBE, 2019.

A barragem (Figura 10) está presente no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens como regulada, com número de autorização 192/96, concedida no dia 07 de junho de 1996. A sua validade, segundo o SNISB, venceu no dia 07 do junho de 2016. A estrutura apresenta 19 metros de altura, aproximadamente 2 km de largura e uma capacidade do reservatório de 58 hm³. No Sistema, a barragem foi classificada como categoria de risco baixa, porém, com dano potencial associado alto, provavelmente pela grande população presente no vale à jusante da estrutura.

A área selecionada para o presente estudo será do início da Represa do Iraí, seguindo pelo Rio Iraí e pelo Rio Iguaçu até a região do Bairro Colônia do Rio Grande, localizado no município de São José dos Pinhais (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Portanto, a região de estudo abrange parcelas das cidades de Piraquara, Curitiba e São José dos Pinhais, sendo que a região mais alta corresponde à cota de 885 m e a região mais baixa à cota de 870 m, apresentando uma distância linear entre as duas de 25730 m, aproximadamente.

Figura 11 - Croqui da área escolhida para o estudo.



Fonte: Adaptado de imagem de satélite AutoCAD Civil 3D, 2019.

A partir do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), da Agência Nacional de Águas, foram obtidas a vazão média do rio de 17,35 m³/s, a partir dos dados do último ano de funcionamento da estação fluviométrica (2010). Outra informação importante obtida no SNIRH foi a profundidade média do rio de 2,07 m, sendo esta considerada por toda a extensão do curso d'água.

3.2 PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA SIMULAÇÃO

Para a realização da simulação da onda de ruptura foi utilizado o software HEC-RAS, que é disponibilizado gratuitamente, apresenta uma boa ferramenta visual e gráfica, e também possui uma interface com softwares de geoprocessamento, como o QGIS.

Para dar início à preparação dos dados, foi necessário primeiramente a criação e ajuste da geometria da região de interesse. As informações para a elaboração da geometria foram obtidas através do projeto TOPODATA. A partir do

site do INPE, foram obtidos os dados topográficos quanto à altitude da região necessária, a qual tem como código 25s495.

Com os dados adquiridos, foi necessário delimitar a área do estudo, para obter as curvas de nível com auxílio do software gratuito QGIS. O intervalo entre as curvas, de acordo com as características da área e com as informações presentes no item 2.7, foi definido em 5 m. Ao arquivo das curvas de nível, foi associado os dados referentes ao curso d'água de interesse, com cota zero. Com a geometria criada no QGIS, esta foi salva como arquivo com extensão .dxf para exportá-lo para o software AutoCAD Civil3D, para dar continuidade aos ajustes da geometria.

Com a geometria no AutoCAD Civil3D, após transformar o arquivo de extensão .dxf para .dwg, foram empregados os seguintes comandos (GeoEDUC, 2019):

- *Surface*: para criar uma superfície contendo informações de elevação da área para a realização da modelagem a partir das curvas de nível que foram exportadas para o Civil3D. Essa superfície foi criada a partir da definição *Contours*.
- *Alignments*: para determinar a localização da calha do rio e definir seu estaqueamento, no sentido contrário ao do sentido do rio.
- *Sample Lines*: para criar e ajustar as seções transversais. Foi realizada a geometria com seções espaçadas inicialmente em 1000 m (Tabela 1). O ajuste foi feito para evitar o cruzamento entre as mesmas, cobrir toda a região de inundação e se manter dentro da superfície criada.
- *Export to HEC-RAS*: para exportar os dados gerados (superfície, alinhamento e seções transversais) para o software HEC-RAS, por meio da criação de um arquivo de geometria (.geo).

Com a geometria (.geo) criada, é preciso importar e terminar os ajustes da geometria no software HEC-RAS. Segundo o GeoEDUC (2019), primeiramente é preciso inverter o sentido do rio, pois, quando o alinhamento foi criado no Civil3D, a escolha do estaqueamento foi invertida para que o HEC-RAS entenda corretamente quais são as seções a montante e a jusante do rio. Isso é possível utilizando a ferramenta "*Reach invert lines table*".

O próximo passo é ajustar, em cada seção, as "*bank stations*", que delimitam a margem do canal. É nessa etapa também que é possível inserir a profundidade do rio manualmente, ou a partir de informações tabuladas, por meio do "*Graphical Cross*

Section”, pois as curvas de nível obtidas pelo projeto TOPODATA não possuíam essas informações.

Em seguida, são inseridos os “*levees*” (Figura 12), que são de extrema importância para a simulação, pois possibilita definir as elevações que devem ser ultrapassadas pela água para que aconteça a inundação no terreno. Isso é necessário pois o programa utiliza o conceito de vasos comunicantes, e se os *levees* não são inseridos, os pontos com mesma elevação de uma seção devem ser inundados de acordo com o nível d’água atingido.

Figura 12 - Exemplo de posicionamento do *levee*.



Fonte: GeoEDUC, 2019.

Também são inseridos nessa etapa os coeficientes de Manning, tanto para o canal, quanto para as planícies de elevação (Tabela 2). Para que a simulação funcione sem problemas, é aplicada o “*cross section points filter*”, determinando o número de 500 pontos para cada seção (sendo esse o número de pontos máximo permitido pelo HEC-RAS).

Tabela 2 - Coeficiente de Manning considerados no projeto.

Coeficiente de Manning para planícies de inundação margem direita ($m^{1/3}s^{-1}$)	Coeficiente de Manning para planícies de inundação margem esquerda ($m^{1/3}s^{-1}$)	Coeficiente de Manning para o curso d’água ($m^{1/3}s^{-1}$)
0,08	0,08	0,03

Fonte: A Autora, 2019.

Para finalizar as configurações desta etapa, foram inseridas as informações geométricas da barragem, sendo necessário escolher sua localização, sua largura e altura, e do seu reservatório, com informações de área superficial e de elevação.

Após a construção e ajuste da geometria, e a inserção da barragem no modelo, foi definida das condições de contorno e as condições iniciais do modelo. Com essas informações, foi possível obter as cotas de inundação, o tempo de chegada da onda, entre outras informações importantes para a análise dos resultados. Na guia “*Edit*”, e em “*Unsteady Flow Data*”, as condições presentes na simulação foram inseridas. Para a condição de contorno a montante, dentre as opções disponíveis no programa, foi escolhido o “*Flow Hydrograph*”, e para a condição a jusante, o “*Normal Depth*”, sendo essa última igual a 0,0006 m/m, valor este resultado da subtração da cota de jusante da de montante, dividido pela distância entre os pontos. Nas condições iniciais, são necessários os valores de escoamento inicial do corpo d’água e a elevação inicial do reservatório.

Por fim, é necessário inserir os dados do rompimento da barragem, ou seja, da formação da brecha. É preciso definir de que forma o rompimento acontecerá, como ficará a brecha após a ruptura e o tempo de ruptura (Tabela 3).

Com os dados inseridos e ajustados no software, é possível dar início à simulação, tendo um tempo total de observação de 24 horas.

3.2.1 Cenário de ruptura

Para efeitos de realização de teste de sensibilidade, foram simulados seis cenários de ruptura, sendo 3 alterando os valores de tempo de formação da brecha, e os outros 3 diversificando as dimensões da brecha.

Abaixo estão presentes os seis cenários de ruptura estudados no presente trabalho (Tabela 3).

Tabela 3 - Cenários de ruptura simulados.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Altura da brecha (m)	18	18	18	18	10,8	10,8
Largura da brecha (m)	1500	1500	1500	1800	1500	1800
Tempo de formação da brecha (h)	0,5	3	1	1	1	1
Passo de tempo da simulação (min)	6	4	4	4	4	30
Passo de tempo dos dados <i>output</i> (min)	30	20	20	20	20	30

Fonte: A Autora, 2019.

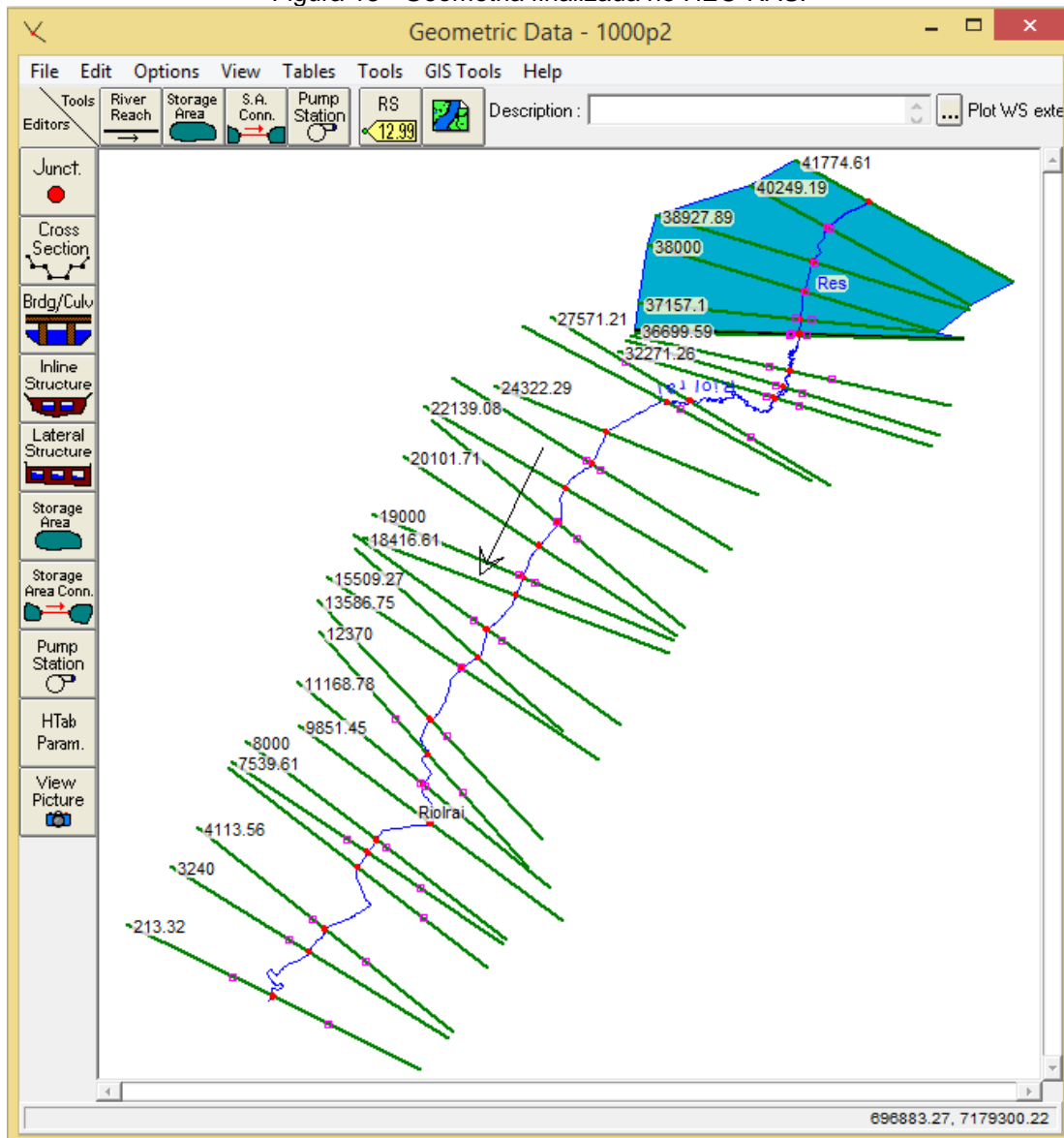
3.3 CONSTRUÇÃO DO MAPA DE INUNDAÇÃO

A criação do mapa é feita através de uma ferramenta do HEC-RAS chamada RAS Mapper, e os softwares AutoCAD Civil 3D e o SAGA GIS. A mancha de inundação será criada no RAS Mapper, logo após a criação de um arquivo .flt para representar o terreno existente na ferramenta do HEC-RAS. Após a finalização da mancha, a mesma é exportada para o Civil3D, e com o auxílio dos Mapas Online do Autodesk, informações georeferenciadas, grades de coordenadas e setas de norte, o mapa é finalizado.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Após todo o processamento executado tanto no QGIS, quanto no Civil3D e no HEC-RAS, a geometria final para a análise está presente na Figura 13.

Figura 13 - Geometria finalizada no HEC-RAS.



Fonte: A Autora, 2019.

Os coeficientes de Manning foram escolhidos com base nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Para as planícies de inundação, tanto do lado esquerdo, quanto do lado direito, o valor escolhido foi igual a $0,08 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ e, para o

canal em si, o valor de $0,03 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, sendo esses valores foi distribuído ao longo de toda a área de estudo.

Com todos os cenários apresentados na Tabela 3 executados, o cenário 6 apresentou resultados físicos mais coerentes entre todas as opções (os módulos das vazões e as alturas dos outros cenários apresentaram valores muito maiores do que os esperados, chegando à 200 m de diferença nos níveis d'água e vazões da ordem de $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). Ao final deste capítulo, tais resultados são analisados.

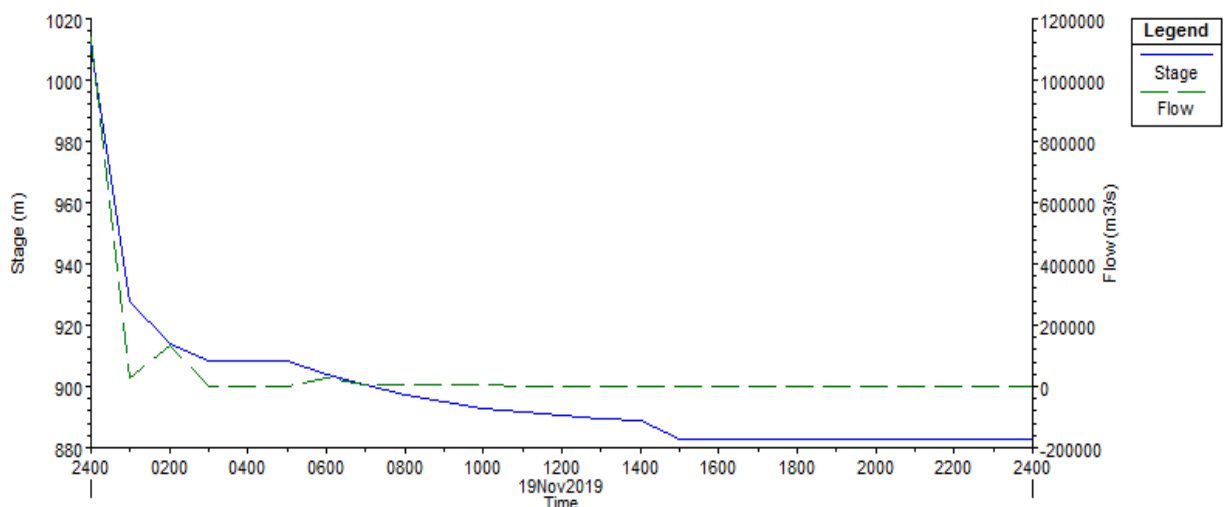
A seguir são apresentados os hidrogramas de vazão e as alturas no nível d'água (*Stage and Flow Hydrographs*) para três seções: logo à jusante da barragem (seção 36649,54), na metade da região de estudo (seção 17000) e a seção final da geometria (213,32). Além dos hidrogramas, serão apresentados frames do deslocamento da onda de ruptura através do tempo e o mapa de inundação para a situação mais representativa, ou seja, para o sexto cenário

4.1 VAZÕES E ALTURAS DO NÍVEL D'ÁGUA

O sexto e último cenário estudado corresponde ao tempo de formação da brecha em 1 hora, largura da brecha de 1800 m e altura total da brecha de 10,8 m. Com esses dados, foram obtidos os seguintes hidrogramas (Figura 14, Figura 15 e Figura 16):

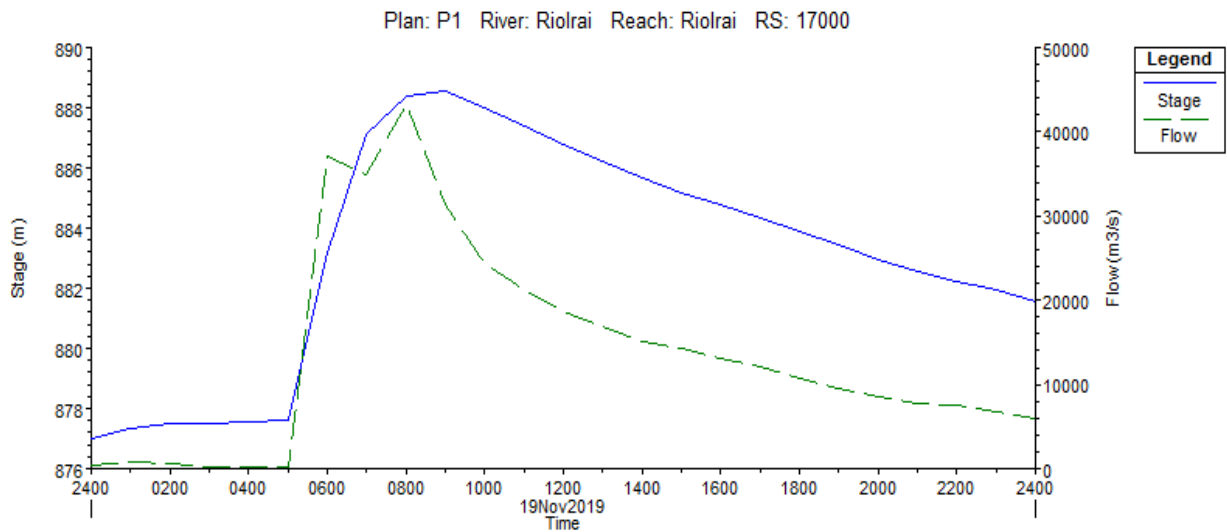
Figura 14 - *Stage and Flow Hydrograph* da seção 36649,54 no cenário 6.

Plan: P1 River: Riolarai Reach: Riolarai RS: 36649.54



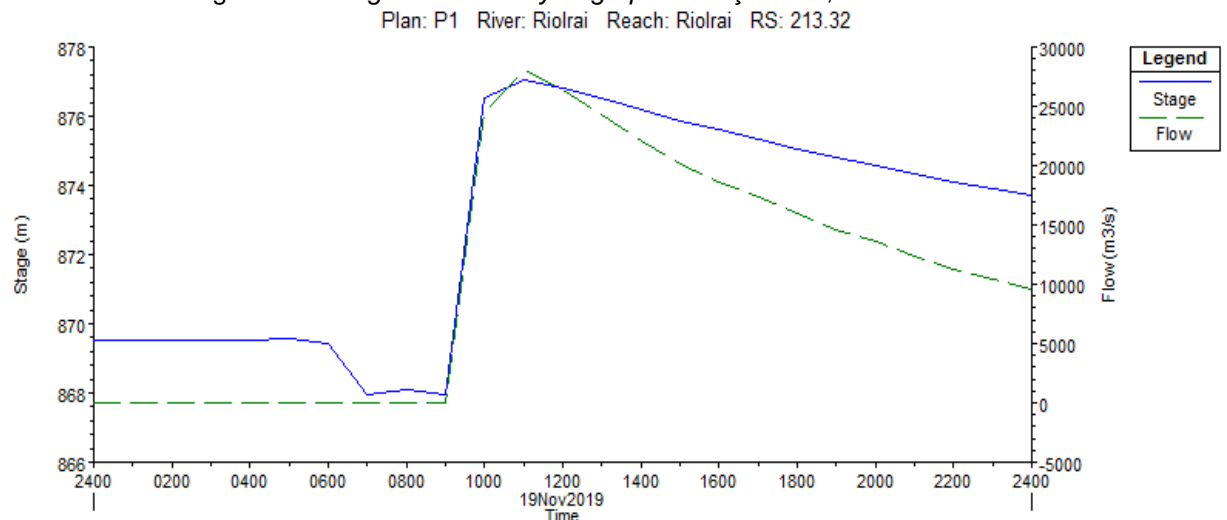
Fonte: A Autora, 2019.

Figura 15 - Stage and Flow Hydrograph da seção 17000 no cenário 6.



Fonte: A Autora, 2019.

Figura 16 - Stage and Flow Hydrograph da seção 213,32 no cenário 6.



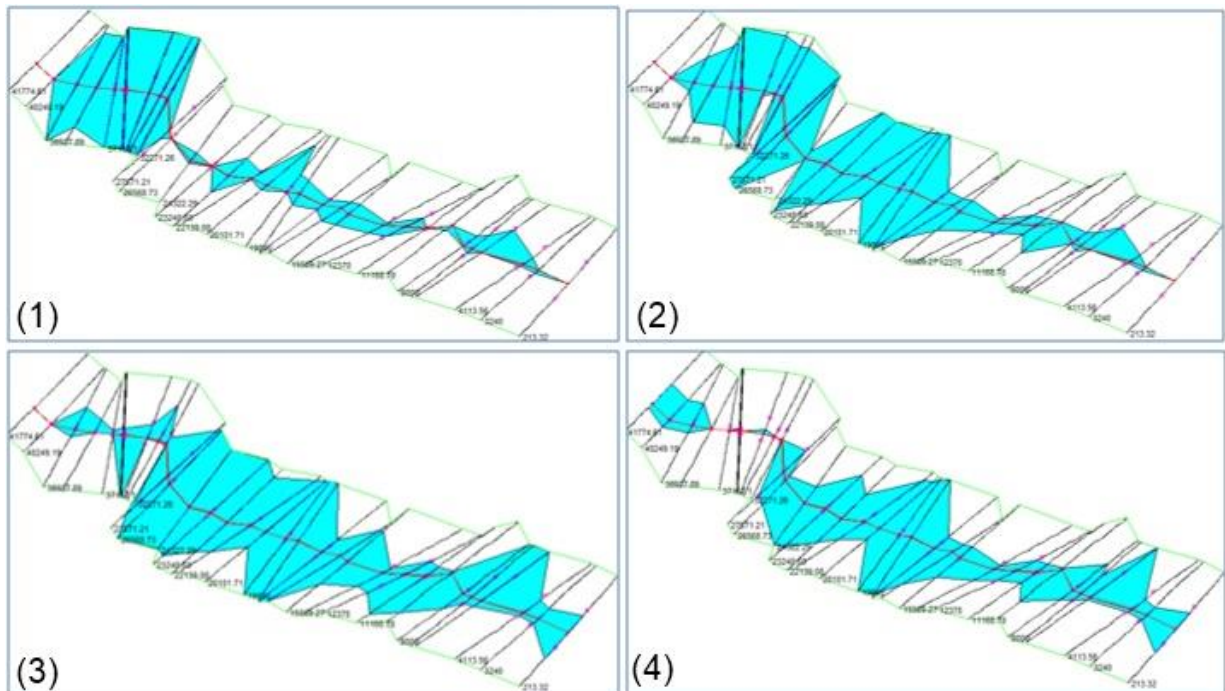
Fonte: A Autora, 2019.

Na Figura 14 (seção 36649,54) observa-se um pico tanto na vazão quanto na altura da lâmina d'água, o que já era esperado, já que a ruptura foi iniciada às 24 horas e termina uma hora depois. A estabilização da vazão ocorre cerca de 7 horas após o início do rompimento, correspondendo à situação de não existência da barragem. Já a lâmina d'água demora mais para estabilizar, o que também já era esperado. As duas últimas figuras (Figura 15 e Figura 16) mostram que a frente de onda demora cerca de 5 horas para atingir o centro do rio, e aproximadamente 8 horas e meia para atingir o final do domínio. Isso pode ser explicado devido ao fato da região de estudo não apresentar grande declividade. É interessante observar também que as alturas das frentes de onda e os picos de vazão ocorrem concomitantemente.

4.2 EVOLUÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA

Na Figura 17 são apresentadas as vistas superiores da evolução da inundação.

Figura 17 - Evolução da inundação logo após a formação da brecha (1), às 6h (2), às 12h (3) e às 24h (4), no cenário 6.



Fonte: A Autora, 2019.

4.3 MAPA DE INUNDAÇÃO

Para o cenário representativo foi gerado o mapa de inundação com dados correspondentes a superfície de inundação máxima (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**)

danificar milhares de casas, supermercados, escolas e parques da região, além do potencial alto de prejudicar os habitantes da área e estradas municipais, estaduais e federais. A onda de inundação ainda passa muito próximo de locais como o Aeroporto Internacional Afonso Pena e o Zoológico Municipal de Curitiba. Locais esses onde, em caso de ruptura em cenários de cheia, tem a possibilidade de serem atingidos.

Segundo a Tabela 3, os cenários de 1 a 5 apresentam passos de tempo bem menores do que os do cenário 6. Tais passos de tempo foram escolhidos pois, segundo a documentação do HEC-RAS (USACE, 2016), os passos de tempo não devem ultrapassar os 30 minutos, sendo que, para ruptura de barragens, os passos de tempo costumam ser menores (cerca de $1/24$ do tempo para se atingir o valor máximo do hidrograma). O HEC-RAS resolve as equações discretizando-as em diferenças finitas e, por isso, era esperado que os passos de tempo menores levariam a uma maior estabilidade e resultados mais refinados. No entanto, segundo o CivilGEO (2019), é possível que haja instabilidade para passos de tempo menores, pois pode tornar uma simulação estável subitamente instável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Represa do Rio Iraí foi construída com o objetivo de abastecimento de água de parte da Região Metropolitana de Curitiba e de diminuir os alagamentos nas regiões próximas à construção. Porém, como ela é localizada em uma região com grande densidade demográfica, principalmente em seu vale à jusante, seu dano potencial associado em caso de ruptura, segundo o SNISB, é considerado alto, sendo necessário, conseqüentemente, o estudo das zonas inundáveis do rompimento hipotético da represa.

Para o estudo realizado, foram utilizados vários softwares para auxiliar na construção da geometria e na simulação da propagação da onda de cheia, entre eles o AutoCAD Civil 3D e o HEC-RAS. Para obter os dados da geometria, utilizou-se o modelo digital de elevação TOPODATA, projeto criado pelo INPE, sendo gerado no QGIS, e dado os devidos ajustes iniciais no Civil 3D. Neste último, foi definido o alinhamento do rio à jusante da barragem, e definidas as seções transversais com distâncias iniciais entre elas de 1 quilômetro. Exportando os dados do Civil 3D para o HEC-RAS, além da finalização da geometria, foram inseridos os dados da barragem, do seu reservatório, os coeficientes de Manning, e as condições de contorno e condições iniciais.

O estudo foi realizado analisando seis cenários de ruptura, sendo três deles alterando a duração da formação da brecha, e outros três alterando as dimensões finais da brecha (altura e largura). Como resultado, os valores da maior parte das simulações se apresentaram muito altos e instáveis, como consequência dos dados não tão precisos quanto o necessário. Analisando todos os cenários, foi escolhido o cenário 6 para a construção do mapa de inundação, por apresentar resultados mais coerentes se comparado às outras simulações.

Com o mapa de inundação gerado, notou-se que boa parte das regiões periféricas das cidades de Piraquara, Curitiba e São José dos Pinhais serão atingidas pela onda de inundação conseqüente do rompimento da Represa do Iraí, regiões essas com grande concentração populacional e de edificações. Observou-se também que a região mais a jusante da área de estudo será atingida pela onda de cheia aproximadamente 9 horas depois da formação total da brecha, apresentando um tempo bom para aviso e evacuação dos habitantes da área.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações gerais para trabalhos futuros, seria interessante:

- Obtenção e aplicação de uma geometria mais precisa, a partir de levantamentos topobatimétricos realizados no local, com equipe especializada;
- A aquisição da curva de cota-volume para descrever melhor o volume do reservatório;
- Introdução de um modelo de hidrograma de ruptura; e
- Obtenção de dados mais representativos da vazão dos canais bem como introdução dos rios tributários.

De posse dessas modificações, seria relevante também realizar a simulações em outros cenários como:

- Em períodos de cheia, utilizando a vazão correspondente;
- Aumentando a extensão da área de estudo da simulação; e
- Considerando outras hipóteses de ruptura da barragem, como o *piping*.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, Cameron T.; P.E.; BRUNNER, Gary W.. **DAM FAILURE ANALYSIS USING HEC-RAS AND HEC-GEORAS**. Disponível em: <http://acwi.gov/hydrology/mtsconfwkshops/conf_proceedings/3rdFIHMC/11F_Ackerman.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2019.
- ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Instruções para Apresentação do Plano de Segurança de Barragem – Vol I**. 130 p. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2016.
- 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**. 337 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.
- BARBOSA, N. P.; MENDONÇA, A. V.; SANTOS, C. A. G.; LIRA, B. B. **Relatório Barragem de Camará**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia. 2004.
- 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). 203 p. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.
- BRASIL. Engecorps Engenharia. Agência Nacional de Águas (Org.). **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: Engecorps, 2012. 113 p.
- BRASIL. Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de informações sobre Segurança de Barragens. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF.
- CAMPOS, R. G. D. **Curso Básico HEC-RAS**. 58 p. Belo Horizonte, 2011.
- CASTRO, A. L. C. **Glossário de Defesa Civil**. 178 p. Ministério do Planejamento e Orçamento, Brasília, 1999.
- CESBE. **Barragem do Rio Iraí**. Disponível em: < <http://www.cesbe.com.br/obras/barragem-do-rio-irai/> >. Acesso em: 02 de nov. de 2019.
- CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. 680 p. McGraw – Hill Book Co. Nova York, 1959.

CivilGEO. **Unsteady Flow HEC-RAS Model Troubleshooting**. Disponível em: <<https://www.civilgeo.com/knowledge-base/unsteady-flow-hec-ras-model-troubleshooting/>>. Acesso em: 06 de nov. de 2019.

COLLINSCHON, W. **Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina – RS**. 214 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRS, Porto Alegre, 1997.

DNPM. Portaria Nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. **Ministério de Minas e Energia**. Brasília, DF.

EMBRAPA. **SRTM – Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>>. Acesso em: 03 de out. de 2019.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Após 7 anos, rompimento de barragem em Rondônia segue sem punição**. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/07/1653131-apos-7-anos-rompimento-de-barragem-em-rondonia-segue-sem-punicao.shtml>>. Acesso em: 01 de nov. de 2019.

GEOeduc. Cursos Online. **Estudos de Rompimento de Barragens utilizando o HEC-RAS**. Disponível em: <<https://cursos.geoeduc.com/curso/estudos-de-rompimento-de-barragens-utilizando-o-hec-ras/>>. Acesso em: 2019.

ICOLD: INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam break flood analysis: review and recommendations**. Bulletin 111. 301 p. Paris, 1998.

INPE. **Projeto TOPODATA**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 08 de set. de 2019.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos: O Caso UHE São Simão**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). 210 p. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

LAURIANO, A. W. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 251 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009.

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

MONTE-MOR, R. C. A. **Mapeamento de Áreas Inundáveis Associadas à Ruptura de Barragens; Estudo de Caso: Barragem de Ninho da Águia - MG.** 141 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R. **Mapeamento de Áreas Inundáveis Associadas à Ruptura de Barragens.** In: XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, São Pedro, São Paulo, 2004.

MOTA, K. R. R. **Rompimento Hipotético e Delimitação da Área de Inundação da Barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG.** 117 p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

O GLOBO. **Rompimento de represa no Laos deixa centenas de desaparecidos.** Disponível em: < <https://oglobo.globo.com/mundo/rompimento-de-represa-no-laos-deixa-centenas-de-desaparecidos-22913695> >. Acesso em: 01 de nov. de 2019.

PORTUGAL. **Decreto-Lei n. 11, 06 de janeiro de 1900. Regulamento de Segurança de Barragens.** Lisboa, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 1990. Diário da República, Série 1, n.5, 06 jan. 1990.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PINHAIS. **Características do Município.** Disponível em: < <http://www.pinhais.pr.gov.br/turismo/FreeComponent89content12622.shtml> >. Acesso em: 01 de nov. de 2019.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil.** 200 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2015.

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

SIMPÓSIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS E RISCOS ASSOCIADOS, 3, 2008, Salvador. **Comitê Brasileiro de Barragens.** Salvador: UFBA, 2008.

SINGH, V. P. **Dam Breach Modeling Technology.** 242 p. Kluwer Academic Publishers. Louisiana, 1996.

UNIDADE DE CONSERVAÇÃO NO BRASIL. **Área de Proteção Ambiental do Iraí.** Disponível em: < <https://uc.socioambiental.org/arp/2433> >. Acesso em: 02 de nov. 2019.

USACE. **HEC-RAS River Analysis System – User’s Manual.** Chapter 16: Advanced Features for Unsteady Flow Routing. Hidrologic Engineering Center, 2016.

USBR . UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. United States Department of the Interior. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure.** 43 p. Dam Safety Office. Denver, Colorado, Estados Unidos, 1999.

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

WISEU, T.; MARTINS, R. **Optimização de Recursos nas Acções de Segurança de Barragens.** 10 p. In: III SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (SILUSBA). Maputo, Moçambique, abril de 1997.

WISEU, T.; RAMOS, C. **Zoneamento Territorial e Critérios para Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos,** SEPREM, Madri, 1999.

XIONG, Yi. **A Dam Break Analysis Using HEC-RAS.** Journal Of Water Resource And Protection. Mississipi, p. 370-379. 28 mar. 2011.

ANEXO 1 – CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGEM

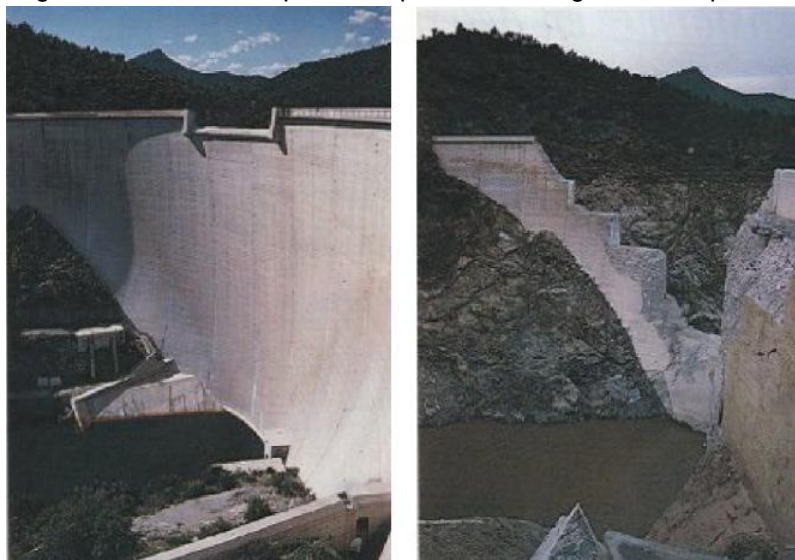
Dentre as centenas de casos de ruptura de barragem ao redor do mundo, abaixo estão listados alguns desses eventos, organizadas em ordem cronológica, tendo como característica principal o acúmulo de água.

BARRAGEM DE MALPASSET (FRANÇA)

A Barragem de Malpasset ficava localizada no rio Reyran, a aproximadamente 7 quilômetros ao norte de Fréjus, ao sul da França, e tinha como objetivo o fornecimento de água para consumo humano e também para irrigação. A construção foi iniciada em 1941 e concluída no ano de 1954. A estrutura apresentava cerca de 60 metros de altura, 223 metros de comprimento, e tinha a capacidade de armazenamento máxima de 51 hm³, sendo esta de concreto em arco. (LAURIANO, 2009).

A ruptura ocorreu no dia 2 de dezembro de 1959, por volta das 9 horas da noite, sendo a falha na fundação por meio da natureza geológica da área em conjunto com chuva de grande magnitude a causa do rompimento, resultando na destruição ao longo dos 11 quilômetros do curso do Rio Reyran, atingindo um trecho de 800 metros de ferrovia e uma ponte, além de causar 421 mortes. (MARCARENHAS, 1990). Abaixo é possível observar o antes e o depois do rompimento da barragem (Figura 19).

Figura 19 – Antes e depois da ruptura da Barragem de Malpasset.



Fonte: Balbi, 2008

BARRAGEM DE TETON (ESTADOS UNIDOS)

A Barragem de Teton foi construída no rio de mesmo nome, no estado de Idaho, Estados Unidos, entre os anos de 1972 e 1975, e tinha como objetivo a irrigação e geração de energia elétrica. Apresentava 93 metros de altura máxima, e capacidade de 308 hm³, sendo a barragem feita de terra. (SINGH, 1996).

O rompimento da barragem aconteceu devido ao *piping*, no primeiro enchimento do reservatório, no dia 5 de junho de 1976. O tempo de esvaziamento foi de aproximadamente 4 horas, e a vazão de pico da brecha foi de 66000 m³/s. A onda devido à ruptura, causou a morte de 11 pessoas, 25000 pessoas desabrigadas e milhões de dólares em prejuízo material (LAURIANO, 2009). Abaixo é possível atentar ao antes e logo após a ruptura da barragem (Figura 20).

Figura 20 - Vista do maciço da barragem antes e depois do processo de formação da brecha.



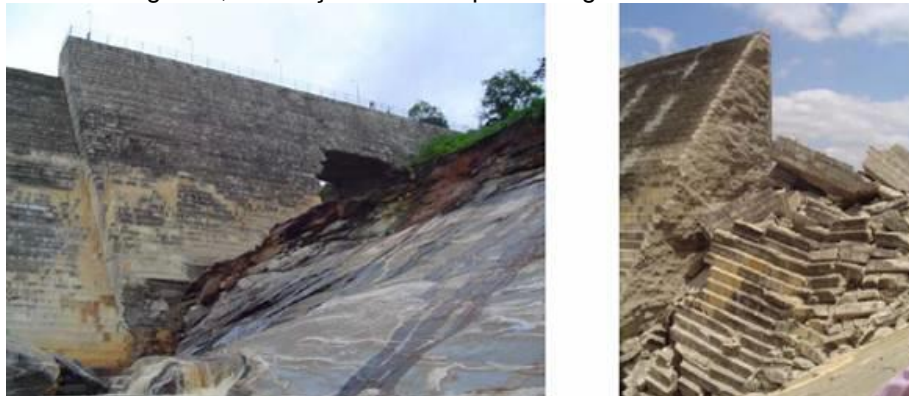
Fonte: Lauriano, 2009

BARRAGEM DE CAMARÁ (BRASIL)

A Barragem de Camará se localizava próxima à cidade de Alagoa Nova, no estado da Paraíba. Sua estrutura era em concreto compactado com rolo, com altura de 50 metros de altura, 269 metros de comprimento e capacidade de 26,5 hm³. Sua construção foi terminada no ano de 2002. Em 17 de junho de 2004 a barragem apresentou problemas na rocha da fundação da ombreira esquerda, ocasionando um orifício, por onde o reservatório iniciou seu esvaziamento (Figura 21). Onze dias após a falha na fundação, a parte acima do orifício ruiu, liberando cerca de 17 hm³, causando 6 mortes, cerca de 3000 desabrigados e destruindo centenas de casas em Mulungu e Alagoa Grande. (BALBI, 2008).

Segundo Barbosa *et al.* (2004), em um relatório apresentado pela UFPA (Universidade Federal da Paraíba) aos Ministérios Públicos Federal e Estadual, concluiu-se que “a Barragem de Camará não foi construída segundo os bons princípios da engenharia, tão pouco foi considerada após a sua entrega como uma obra importante que deveria ser acompanhada no seu primeiro enchimento”. Ainda de acordo com o relatório, mesmo a barragem sendo entregue em 2002, o seu primeiro enchimento total só foi concluído com as chuvas de 2004, além de que, teria sido possível baixar o nível do lago para a cota segura, se essas decisões tivessem sido tomadas com antecedência.

Figura 21 – Na primeira imagem é possível ver o orifício formado pela falha na fundação. Na segunda, a situação 11 dias após o surgimento do orifício.



Fonte: Barbosa *et al.*, 2004

BARRAGEM DE PCH APERTADINHO (BRASIL)

A Barragem da Pequena Central Hidrelétrica Apertadinho localizava-se a 30 quilômetros da cidade de Vilhena, no estado de Rondônia, no rio Comemoração, e tinha como principal função gerar energia elétrica. A barragem apresentava a estrutura em terra com altura de 43 metros, comprimento de 440 metros e capacidade de 31,74 hm³. Ainda quando estava em fase final de construção, no dia 09 de janeiro de 2008, a Barragem de Apertadinho se rompeu, formando uma brecha de aproximadamente 60 metros na ombreira direita da barragem, liberando cerca de 3 hm³ de água, sendo que a maior parte desse volume retido na usina Rondon II, à 60 quilômetros de Apertadinho. Apesar de não haver vítimas fatais, o rompimento afetou significativamente na questão ambiental, destruindo 50 quilômetros de mata (Figura 22). A causa da ruptura teria sido falha nas etapas de construção da barragem. (Lauriano, 2009).

Figura 22 – Danos causados pela ruptura da Barragem de Apertadinho.



Fonte: Folha de São Paulo, 2008.

BARRAGEM DE ALGODÕES I (BRASIL)

A Barragem de Algodões I localizava-se no município de Cocal, no estado do Piauí, e tinha como finalidade o abastecimento de água e a irrigação. Sua construção terminou em 2001, e tinha capacidade de 51 hm³. A barragem rompeu no dia 27 de maio de 2009, por volta das 16 horas, liberando uma onda de cheia que aumentou o rio Pirangi em 5 metros, atingindo 11 povoados e as cidade de Cocal e Buriti dos Lopes. Mais de 2900 pessoas foram afetadas, sendo 80 feridos e 11 mortos. Na Figura 23 é possível ver a o local onde a barragem se rompeu.

Figura 23 – Barragem de Algodões I rompida.



Fonte: Jornal da Paraíba, 2009.

REPRESA XE-PIAN XE-NAMNOY (LAOS)

A Represa Xe-Pian Xe-Namnoy fazia parte de um projeto de uma usina hidrelétrica, e era situada a 550 quilômetros da capital Vientiane, em Laos. No dia 23 de julho de 2018, ainda em processo de construção, a barragem de rompeu às 20 horas (horário local), liberando cerca de cinco bilhões de metros cúbico de água, onde atingiu cerca de seis aldeias da região (Figura 24). Centenas morreram e mais de 6600 pessoas foram obrigadas a deixarem suas casas. A empresa responsável pela obra (SK Engineering & Construction) disse que a possível causa da falha seria as fortes chuvas e enchentes que assolavam a região. As operações da hidrelétrica estavam programadas para serem iniciadas em 2019, tendo como objetivo exportar 90% da energia para a Tailândia, e os 10% restantes seriam vendidos para a rede elétrica local. (O Globo, 2018).

Figura 24 – Aldeia alagada em decorrência da ruptura da represa.



Fonte: O Globo, 2018.