

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

SÂNZZIA DE OLIVEIRA E SOUZA FIGUEIRA

ANÁLISE DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM UTILIZANDO O  
SOFTWARE IBER. ESTUDO DE CASO: SANTO ANTÔNIO DE  
PÁDUA-RJ

VOLTA REDONDA  
2022

**SÂNZZIA DE OLIVEIRA E SOUZA FIGUEIRA**

**ANÁLISE DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM  
UTILIZANDO O SOFTWARE IBER. ESTUDO DE CASO:  
SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA-RJ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

**Orientador:**

**Prof. D.Sc. Wagner Rambaldi Telles**

**Coorientador:**

**Prof. D.Sc. Thiago Jordem Pereira**

**VOLTA REDONDA  
2022**



Ficha catalográfica automática - SDC/BINF  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F475a Figueira, Sâzzia de Oliveira e Souza  
Análise do Rompimento de Barragem Utilizando o Software  
IBER. Estudo de Caso: Santo Antônio de Pádua-RJ / Sâzzia  
de Oliveira e Souza Figueira. - 2022.  
100 f.

Orientador: Wagner Rambaldi Telles.  
Coorientador: Thiago Jordem Pereira.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior, Volta  
Redonda, 2022.

1. Rompimento de Barragens. 2. Santo Antônio de Pádua. 3.  
Modelagem Computacional. 4. Software IBER. 5. Produção  
intelectual. I. Telles, Wagner Rambaldi, orientador. II.  
Pereira, Thiago Jordem, coorientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Instituto do Noroeste Fluminense de  
Educação Superior. IV. Título.

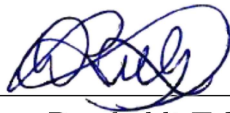
CDD - XXX

SÂNZZIA DE OLIVEIRA E SOUZA FIGUEIRA

ANÁLISE DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM UTILIZANDO O  
SOFTWARE IBER. ESTUDO DE CASO: SANTO ANTÔNIO DE  
PÁDUA-RJ

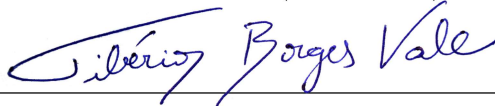
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em 30 de setembro de 2022.



---

Prof. Wagner Rambaldi Telles, D.Sc.  
MCCT-UFF (Presidente)



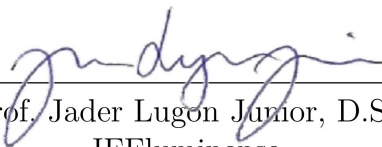
---

Prof. Tibério Borges Vale, D.Sc.  
MCCT-UFF



---

Prof. Ricardo Silveira Sousa, D.Sc.  
MCCT-UFF



---

Prof. Jader Lugon Junior, D.Sc.  
IFFluminense

VOLTA REDONDA  
2022

À Deus, por tudo o que tem proporcionado a mim.

## AGRADECIMENTOS

Durante todos esses anos de mestrado, de muito esforço e estudo, gostaria de externar os meus sinceros agradecimentos a algumas pessoas que fizeram parte para a realização de mais um sonho.

Primeiramente, agradecer a Deus, que me ajudou a enfrentar todos os obstáculos, me concedendo saúde e sabedoria para seguir sempre em frente e concluir essa dissertação de mestrado e, a Nossa Senhora, por sempre interceder por mim.

À minha mãe Ilcinéa de Oliveira, por todo o apoio e incentivo sempre e, a minha vó Brasilina Leite, que sempre esteve ao meu lado diante de todas as adversidades que surgiram ao longo do caminho.

Ao meu marido, Daniel Verdan, que me prestou suporte, acompanhando toda a trajetória de elaboração desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. D.Sc. Wagner Rambaldi Telles, que esteve comigo durante dias e noites, sempre se colocando disponível para sanar todas as dúvidas surgidas.

Ao meu coorientador, Prof. D.Sc. Thiago Jordem Pereira, que não poupou esforços para me ajudar a fazer com que essa dissertação fosse concretizada.

À Universidade Federal Fluminense, que me deu todo o suporte necessário, desde o início, para que eu chegasse até aqui.

A todos que me incentivaram e me ensinaram que tudo é possível, basta CRER.

Esse estudo foi apoiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (projetos com número de processos E-26/210.400/2018 e G. E47/2021-SEI260003/016517/2021-R210.107/2022).

*“DEUS SABE O QUE FAZ... TUDO NO TEMPO DELE.”*  
*(Sânzzia Figueira)*

## RESUMO

Os impactos provenientes do rompimento de barragens estão entre um dos assuntos mais discutidos na área ambiental quando se trata dos eventos catastróficos que degradam o meio ambiente e a população em geral. Desse modo, é preciso que haja, nas barragens, sucessivas análises de risco e segurança, através de métodos que avaliem a possibilidade de rompimentos, a fim de que medidas de segurança possam ser tomadas de maneira a evitar tais ocorrências. Assim, a simulação computacional que envolve tais rompimentos surge como uma alternativa para analisá-los por meio de um hidrograma de ruptura. Nesse contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo simular a hipotética ruptura da barragem da Usina Hidrelétrica Barra do Braúna situada no rio Pomba, entre os municípios de Laranjal e Recreio, ambos do estado de Minas Gerais, bem como os impactos causados pela onda de cheia no município de Santo Antônio de Pádua, localizado no estado do Rio de Janeiro. Foram simulados vários cenários, onde se escolheu mostrar o pior caso entre as possíveis brechas. Para alcance desse objetivo, foi utilizado o software IBER, o qual possibilita identificar os pontos mais críticos do fluxo.

**Palavras-chave:** Rompimento de Barragens. Santo Antônio de Pádua. Modelagem Matemática. Simulação Computacional. Software IBER.

## ABSTRACT

The impacts from the rupture of dams are among one of the most discussed issues in the environmental area when it comes to catastrophic events that degrade the environment and the population in general. Thus, it is necessary that, in the dams, successive risk and safety analyzes must be carried out in dams, through methods that assess the possibility of ruptures, so that safety measures can be taken in order to avoid such occurrences. Thus, the computer simulation that involves such ruptures appears as an alternative to analyze them through a rupture hydrograph. In this context, the present work had as main objective to simulate the hypothetical rupture of the dam of the Barra do Braúna Hydroelectric Power Station located on the Pomba River, between the municipalities of Laranjal and Recreio, both in the state of Minas Gerais, as well as the impacts caused by the flood wave in the municipality of Santo Antônio de Pádua, located in the state of Rio de Janeiro. Several scenarios were simulated, where it was chosen to show the worst case among the possible gaps. To achieve this objective, the IBER software was used, which makes it possible to identify the most critical points of the flow.

**Keywords:** Dam Breach. Santo Antônio de Pádua. Mathematical Modeling. Computer Simulation. IBER Software.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Barragem de gravidade. . . . .                                                                                                                                           | 27 |
| Figura 2 – Barragem em arco. . . . .                                                                                                                                                | 27 |
| Figura 3 – Barragem de contraforte. . . . .                                                                                                                                         | 28 |
| Figura 4 – Barragem de aterro de terra com seção homogênea. . . . .                                                                                                                 | 28 |
| Figura 5 – Barragem de concreto estrutural com contrafortes. . . . .                                                                                                                | 29 |
| Figura 6 – Barragem de gravidade. . . . .                                                                                                                                           | 30 |
| Figura 7 – Barragem de gravidade aliviada. . . . .                                                                                                                                  | 30 |
| Figura 8 – Barragem de concreto em arco. . . . .                                                                                                                                    | 31 |
| Figura 9 – Sistema Integrado de Segurança de Barragens: Pilar Técnico-Operacional (T-O), Pilar Monitoramento-Vigilância (M-V) e Pilar de Gestão de Riscos/Emergência (G-E). . . . . | 32 |
| Figura 10 – Etapas da Gestão de Riscos/Emergência. . . . .                                                                                                                          | 33 |
| Figura 11 – Etapas do Processo de Gestão de Riscos referente à Segurança de Barragens. . . . .                                                                                      | 34 |
| Figura 12 – Estrutura matricial para avaliação de barragens. . . . .                                                                                                                | 36 |
| Figura 13 – Bacia hidrográfica do rio Pomba. . . . .                                                                                                                                | 41 |
| Figura 14 – Mineradora Rio Pomba Cataguases Ltda depois do rompimento da barragem. . . . .                                                                                          | 42 |
| Figura 15 – Vista a montante da UHE Barra do Braúna. . . . .                                                                                                                        | 43 |
| Figura 16 – Vista a jusante da UHE Barra do Braúna. . . . .                                                                                                                         | 44 |
| Figura 17 – Zona de Auto Salvamento. . . . .                                                                                                                                        | 45 |
| Figura 18 – Enchente no bairro Mirante em Santo Antônio de Pádua ocorrido no mês de janeiro de 2022. . . . .                                                                        | 47 |
| Figura 19 – Pontes localizadas na zona urbana de Santo Antônio de Pádua. . . . .                                                                                                    | 48 |
| Figura 20 – Identificação da ZID 3 (Palma), onde está localizado o distrito de Cisneiros. . . . .                                                                                   | 49 |
| Figura 21 – Identificação da ZID 4 (Palma), onde está localizado o distrito de Itapirucu. . . . .                                                                                   | 49 |
| Figura 22 – Identificação da ZID 11 em Santo Antônio de Pádua, onde está localizado o distrito de Paraoquena. . . . .                                                               | 50 |
| Figura 23 – Identificação da ZID 17, onde está localizada a zona urbana de Santo Antônio de Pádua. . . . .                                                                          | 50 |
| Figura 24 – Volume de controle elementar dentro de um fluido em movimento. . . . .                                                                                                  | 54 |
| Figura 25 – Volume de controle a partir do qual são derivadas as equações da Continuidade e <i>Momentum</i> . . . . .                                                               | 54 |
| Figura 26 – Seção transversal da rede de drenagem. . . . .                                                                                                                          | 56 |
| Figura 27 – Conjunto de arquivos do TOPODATA. . . . .                                                                                                                               | 61 |



|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28 – Representação do território nacional em forma de quadriculas identificadas no formato LAHLON. . . . .                                                         | 62 |
| Figura 29 – Região topográfica demarcada. . . . .                                                                                                                         | 63 |
| Figura 30 – Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) na região situada entre a barragem da UHE Barra do Braúna e a cidade de Santo Antônio de Pádua. . . . . | 65 |
| Figura 31 – Região de estudos, bem como a localização da barragem e cidade de Santo Antônio de Pádua, seguida pelas superfícies construídas. . . . .                      | 67 |
| Figura 32 – Caracterização das condições de contorno e inicial para a região de estudos. . . . .                                                                          | 68 |
| Figura 33 – Caracterização das superfícies da região de estudos de acordo com o uso e ocupação do solo. . . . .                                                           | 69 |
| Figura 34 – Representação das superfícies e seus respectivos elementos, bem como a malha gerada. . . . .                                                                  | 70 |
| Figura 35 – Malha 3D contendo os dados de topografia da região de interesse. . . . .                                                                                      | 71 |
| Figura 36 – Posição da ruptura inserida. . . . .                                                                                                                          | 71 |
| Figura 37 – Resultados da elevação da lâmina d'água no início e fim da simulação. . . . .                                                                                 | 72 |
| Figura 38 – Representação da lâmina d'água, seguindo da esquerda para a direita e, de cima para baixo, em 0 s, 7.200 s, 14.400 s e 28.800 s. . . . .                      | 73 |
| Figura 39 – Mapa da profundidade máxima da lâmina d'água no instante em que a onda atinge a área mais urbanizada da cidade. . . . .                                       | 74 |
| Figura 40 – Comportamento dos sedimentos e consequente erosão ocorridos durante o processo de rompimento da barragem. . . . .                                             | 74 |
| Figura 41 – Ação 01. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial no reservatório. . . . .                                   | 76 |
| Figura 42 – Ação 02. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial na barragem. . . . .                                       | 77 |
| Figura 43 – Ação 03. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial no rio. . . . .                                            | 78 |
| Figura 44 – Ação 04. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial no planície. . . . .                                       | 79 |
| Figura 45 – Ação 05. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial na área urbanizada. . . . .                                | 80 |
| Figura 46 – Ação 06. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação do coeficiente de rugosidade do reservatório. . . . .                        | 82 |
| Figura 47 – Ação 07. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação do coeficiente de rugosidade da planície. . . . .                            | 83 |
| Figura 48 – Ação 08. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação do coeficiente de rugosidade da região urbanizada. . . . .                   | 84 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 49 – Perfis da profundidade e elevação da lâmina d’água na estação da ANA/INEA. . . . .                                                                  | 85 |
| Figura 50 – Perfis da profundidade máxima da lâmina d’água no rio Pomba na região analisada. . . . .                                                            | 85 |
| Figura 51 – Perfis da elevação máxima da lâmina d’água no rio Pomba na região analisada. . . . .                                                                | 86 |
| Figura 52 – Perfis das elevações da lâmina d’água nos quatro cenários com base nos diferentes rompimentos simulados ao longo de um período de 24 horas. . . . . | 87 |
| Figura 53 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d’água referente a simulação do Cenário A. . . . .                                                     | 88 |
| Figura 54 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d’água referente a simulação do Cenário A. . . . .                                                         | 88 |
| Figura 55 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d’água referente a simulação do Cenário B. . . . .                                                     | 89 |
| Figura 56 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d’água referente a simulação do Cenário B. . . . .                                                         | 89 |
| Figura 57 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d’água referente a simulação do Cenário C. . . . .                                                     | 90 |
| Figura 58 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d’água referente a simulação do Cenário C. . . . .                                                         | 90 |
| Figura 59 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d’água referente a simulação do Cenário D. . . . .                                                     | 91 |
| Figura 60 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d’água referente a simulação do Cenário D. . . . .                                                         | 91 |

## LISTA DE TABELAS

|          |   |                                                                                                                                          |    |
|----------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – | Relação das pontes situadas entre a represa e a cidade de Santo Antônio de Pádua. . . . .                                                | 48 |
| Tabela 2 | – | Informações referentes às pontes construídas sobre o rio Pomba utilizadas no estudo de Daru et al. (2013). . . . .                       | 51 |
| Tabela 3 | – | Dados utilizados para as simulações do rompimento hipotético da barragem de Barra do Braúna obtidos no trabalho de Daru et al. (2013). . | 87 |
| Tabela 4 | – | Valores da profundidade máxima da lâmina d'água para os distintos cenários analisados. . . . .                                           | 92 |
| Tabela 5 | – | Valores da elevação máxima da lâmina d'água para os distintos cenários analisados. . . . .                                               | 92 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                         |
|-------|---------------------------------------------------------|
| CBDB  | Comitê de Barragens                                     |
| CIGB  | Centro de Engenharia Genética e Biotecnologia           |
| T-O   | Técnico-Operacional                                     |
| M-V   | Monitoramento-Vigilância                                |
| G-E   | Gestão de Riscos/Emergência                             |
| CNRH  | Conselho Nacional de Recursos Hídricos                  |
| PNSB  | Política Nacional de Segurança de Barragens             |
| PAE   | Plano de Ação Emergencial                               |
| ZAS   | Zona de Auto Salvamento                                 |
| PSB   | Plano de Segurança de Barragem                          |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica                    |
| BDMEP | Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa    |
| PCHs  | Pequenas Centrais Hidrelétricas                         |
| UHE   | Usina Hidrelétrica                                      |
| PAC   | Programa de Aceleração do Crescimento                   |
| INPE  | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais               |
| INEA  | Instituto Estadual do Ambiente                          |
| REN   | Resolução Normativa ANEEL                               |
| ANA   | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico           |
| ZID   | Zona de Impacto Direto                                  |
| CNRH  | Rede Hidrometeorológica Nacional                        |
| RHNR  | Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência          |
| SNIRH | Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos |
| MEF   | Método dos Elementos Finitos                            |

|      |                                                                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|
| MVF  | Método dos Volumes Finitos                                                      |
| MDF  | Método das Diferenças Finitas                                                   |
| GEAM | Grupo de Água e Engenharia Ambiental                                            |
| MDE  | Modelo Digital de Elevação                                                      |
| USGS | Serviço Geológico dos Estados Unidos ( <i>United States Geological Survey</i> ) |
| DPA  | Dano Potencial Associado                                                        |
| CA   | Categoria de Risco                                                              |
| LA   | Latitude                                                                        |
| LON  | Longitude                                                                       |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|          |                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------|
| $m^3$    | Metro Cúbico                                              |
| $m$      | Metro                                                     |
| $A$      | Área                                                      |
| $km^2$   | Quilômetro Quadrado                                       |
| $km$     | Quilômetro                                                |
| $MW$     | Megawatt                                                  |
| $kW$     | Quilowatt                                                 |
| $hm^2$   | Hectômetro Quadrado                                       |
| $hm^3$   | Hectômetro Cúbico                                         |
| $S$      | Sul                                                       |
| $W$      | Oeste                                                     |
| $Q$      | Fluxo                                                     |
| $q$      | Fluxo Lateral                                             |
| $q_l$    | Fluxo Lateral por Unidade de Área                         |
| $ha$     | Hectare                                                   |
| $h$      | Profundidade                                              |
| $T$      | Largura da Seção Transversal em Relação ao Fundo do Canal |
| $F_g$    | Força de Gravidade                                        |
| $z_0$    | Elevação do Fundo do Rio                                  |
| $S_f$    | Termo de Atrito                                           |
| $g$      | Gravidade                                                 |
| $F_p$    | Força de Pressão Total                                    |
| $F_{Pn}$ | Pressão Efetiva                                           |
| $F_f$    | Força de Atrito                                           |

|            |                             |
|------------|-----------------------------|
| $S_0$      | Declividade do Fundo do Rio |
| $n$        | Coefficiente de Manning     |
| $\Delta x$ | Variação em $x$             |
| $\rho$     | Densidade                   |
| $\theta$   | Ângulo Formado pelo Canal   |

## SUMÁRIO

|              |                                                                                        |           |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                                            | <b>20</b> |
| <b>1.1</b>   | <b>Justificativa . . . . .</b>                                                         | <b>23</b> |
| <b>1.2</b>   | <b>Objetivos . . . . .</b>                                                             | <b>23</b> |
| <b>1.3</b>   | <b>Estrutura do trabalho . . . . .</b>                                                 | <b>24</b> |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>                                                 | <b>25</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Barragens: Contexto Histórico . . . . .</b>                                         | <b>25</b> |
| <b>2.2</b>   | <b>Tipos de Barragens . . . . .</b>                                                    | <b>26</b> |
| <b>2.3</b>   | <b>Avaliação de Risco e Segurança em Barragens . . . . .</b>                           | <b>31</b> |
| <b>2.4</b>   | <b>Legislações Vigentes Envolvendo Barragens . . . . .</b>                             | <b>35</b> |
| <b>2.5</b>   | <b>Problemas Decorrentes do Rompimento de Barragens . . . . .</b>                      | <b>37</b> |
| <b>3</b>     | <b>DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO . . . . .</b>                                        | <b>40</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>Bacia Hidrográfica do Rio Pomba . . . . .</b>                                       | <b>40</b> |
| <b>3.2</b>   | <b>Usina Hidrelétrica Barra do Braúna . . . . .</b>                                    | <b>43</b> |
| <b>3.3</b>   | <b>Santo Antônio de Pádua . . . . .</b>                                                | <b>46</b> |
| <b>4</b>     | <b>FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E SOLUÇÃO DO PROBLEMA PRO-<br/>POSTO . . . . .</b>            | <b>52</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>Modelagem Matemática do Problema Proposto . . . . .</b>                             | <b>52</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Solução do Problema Proposto . . . . .</b>                                          | <b>59</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b>O software IBER . . . . .</b>                                                       | <b>59</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>Obtenção dos Dados da Região de Interesse . . . . .</b>                             | <b>60</b> |
| <b>4.3.1</b> | <b>Dados Topográficos . . . . .</b>                                                    | <b>60</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Dados Hidrometeorológicos . . . . .</b>                                             | <b>63</b> |
| <b>5</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>                                               | <b>66</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>Determinação da Simulação Base Referente à Área de Estudo . . . . .</b>             | <b>66</b> |
| <b>5.2</b>   | <b>Variação da Malha Espacial . . . . .</b>                                            | <b>75</b> |
| <b>5.2.1</b> | <b>Variação da Malha no Reservatório . . . . .</b>                                     | <b>75</b> |
| <b>5.2.2</b> | <b>Variação da Malha na Barragem . . . . .</b>                                         | <b>76</b> |
| <b>5.2.3</b> | <b>Variação da Malha no Rio . . . . .</b>                                              | <b>77</b> |
| <b>5.2.4</b> | <b>Variação da Malha na Planície . . . . .</b>                                         | <b>78</b> |
| <b>5.2.5</b> | <b>Variação da Malha na Área Urbanizada . . . . .</b>                                  | <b>80</b> |
| <b>5.3</b>   | <b>Variação do Coeficiente de Rugosidade . . . . .</b>                                 | <b>81</b> |
| <b>5.3.1</b> | <b>Variação do Coeficiente de Rugosidade do Reservatório, Barragem e Rio . . . . .</b> | <b>81</b> |



|       |                                                                            |           |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.2 | Variação do Coeficiente de Rugosidade da Planície . . . . .                | 82        |
| 5.3.3 | Variação do Coeficiente de Rugosidade da Região Urbanizada . . . . .       | 83        |
| 5.4   | <b>Calibração e Validação do Modelo . . . . .</b>                          | <b>84</b> |
| 5.5   | <b>Simulação de Cenários Hipotéticos de Rompimento de Barragem . . . .</b> | <b>86</b> |
| 6     | <b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>                            | <b>93</b> |
| 6.1   | Conclusões . . . . .                                                       | 93        |
| 6.2   | Trabalhos Futuros . . . . .                                                | 96        |
|       | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                               | <b>97</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural e precioso para todos os seres vivos. Para que haja a manutenção da vida, ela deve estar presente não só em aspectos quantitativos, mas nos qualitativos, isto é, numa qualidade apropriada, uma vez que o homem tem a usado não somente para suprir com suas necessidades metabólicas, mas para outros objetivos, nos quais geram diversos modos de consumo e degradação (WOLKMER; PIMMEL, 2013).

Dessa forma, Totti (2008) relata que é de suma importância a realização do gerenciamento dessas águas, principalmente as águas urbanas. Quando a problematização está voltada para a área urbana, há dois problemas principais: o primeiro referente à ocorrência de inundações, que muitas das vezes, ocorre por causa do acelerado e descontrolado processo de urbanização; o segundo, referente à falta de água com qualidade adequada, uma vez que há contaminação de águas subterrâneas ou dos corpos provenientes das águas de escoamento superficial.

Dentro desse contexto, Silva (2018) diz que é de grande relevância a abordagem de estudos que envolvem as bacias hidrográficas, uma vez que é nesse local geográfico natural que há a verificação de todos os componentes que fazem parte do desenvolvimento da sociedade, além de definir uma infinidade de utilização dos recursos hídricos.

Para Monte-Mor (2004), o mundo enfrenta diversos desafios constantemente. Porém, um deles, considerado o maior, é de se planejar e executar o gerenciamento dos recursos hídricos de maneira propícia, fazendo com que a água seja disposta para a população de forma racional. Em decorrência disso, muitas barragens foram construídas no último século a fim de atender a larga demanda de água e de energia para todos os indivíduos envolvidos. Há diferentes técnicas para construção das barragens e, uma delas, utilizada até hoje, consiste apenas em acumular terra e formar o corpo da barragem. Outras, utilizam concreto armado.

As barragens são estruturas artificiais já conhecidas por todos, há milhares de anos, que apresenta como finalidade o armazenamento de água, bem como o seu abastecimento para consumo de uma população; produção da energia elétrica; controle da cheia; entre outras finalidades (MOURA, 2010). Por outro lado, Mota (2017) ressalta que as barragens são vistas como obstáculos, cuja função é reter detritos ou líquidos, a fim de armazená-los ou controlá-los, além de, também, fazerem uso para fornecimento de água e geração de energia elétrica.

Ainda, segundo Mota (2017), as barragens são consideradas estruturas, em que seu uso corresponde há cerca de 6.000 anos. Nesse sentido, a barragem considerada mais antiga é a construída no Egito, de 12 m de altura e cerca de 6,8 mil anos (MOTA, 2017). Contudo,

ela se rompeu devido ao transbordamento. No Brasil, mais especificamente na capital de Pernambuco, Recife, no século XVI, iniciou-se a construção de grandes barragens, como por exemplo, as relacionadas à implantação de hidroelétricas.

Apesar do avanço ocorrido em dados técnicos e experimentais, muitas barragens carecem de manutenção, as quais geram um risco estrutural e ambiental, podendo causar acidentes em larga escala. Mota (2017) diz que essas estruturas podem provocar o rompimento de terras, com consequente geração de erosão das mesmas, deslizamento, galgamento, dentre outras formas. Assim, Pontes (2019) mostra que esses impactos afetam aos seres vivos e ao meio físico presentes a jusante das barragens, que sofrem com as enxurradas e com os processos de contaminação causadas pelas substâncias retidas no barramento. Daí, a necessidade e a importância de se realizar vistorias regulares.

Embora a engenharia em geral permita que ocorram a execução de projetos, construções, operações e manutenção de barragens, tais meios só são realizados de modo correto, sendo portanto, eficazes, se todos garantirem a segurança apropriada. Desse modo, há sempre uma série de fatores que ocorrerão, como o deslocamento das barragens, propensão à aumento de carga e esforço na estrutura, mesmo que tardios, capazes de afetar uma estrutura ou que esta opere de modo insatisfatório.

Por outro lado, a sociedade, apesar de reconhecer a existência dos riscos, se isenta de procurar por possíveis soluções, devido ao custo pago pela manutenção dos mesmos, fazendo com que uma estrutura fique sem o tratamento adequado. Isso pode ser visto em grandes obras que não tiveram nenhum tipo de manutenção há anos (PERINI, 2009).

Pontes (2019) diz que o problema com as barragens é devido às estruturas que necessitam de constantes vistorias a fim de verificar se elas apresentam danos estruturais, onde se faz necessária a presença de profissionais qualificados para que sejam analisadas medidas de reparo, com finalidade de se prevenir uma tragédia. Essas vistorias periódicas são importantes no momento em que a barragem se localiza perto dos recursos hídricos ou da malha urbana, uma vez que essa proximidade pode desencadear um risco gravíssimo à sociedade e ao meio ambiente, bastando apenas uma falha para isso ocorrer.

Quando as barragens apresentam adequadamente um projeto, como um controle de cheias, significa que a medida estrutural foi realizada de modo eficaz. Tornar uma barragem segura desencadeia numa série de tarefas complexas, visto que há uma gama de barragens diferentes e também, legislações que se divergem, conforme cada país. É preciso, antes de compreender a forma que uma barragem possa se romper, identificar os efeitos de sua ruptura, além de verificar como será a propagação da onda de cheia. Desse modo, há modelos matemáticos (os quais são resolvidos numericamente) e físicos que são utilizados, segundo cada questão proposta (MONTE-MOR, 2004).

Devido à ruptura de uma barragem, a modelagem do escoamento superficial apre-

senta, como finalidade, simular, no decorrer do vale, o movimento de onda da cheia. Tanto a modelagem do escoamento oriundo da barragem quanto da sua ruptura apresenta-se como uma ferramenta capaz de classificar o planejamento de ações de emergência, do perigo, das avaliações de risco e do mapeamento (MONTE-MOR, 2004). Por meio de simulações computacionais, é possível prever a vazão de ruptura e sua brecha, baseando-se conforme o tipo da barragem (FREITAS, 2018).

Através dos avanços tecnológicos, modelos matemáticos e físicos passaram a ser usados a fim de responder aos efeitos de ruptura da barragem. Desse modo, o uso de um modelo matemático auxilia no processo de simplificação da simulação, o que, consequentemente, favorece no estudo das barragens. A utilização desses modelos faz com que haja o crescimento do modo de verificação de uma possível ameaça, o que poderá causar um grave acidente no futuro. Além disso, tais simulações possibilitam analisar a onda de cheia no decorrer do vale, levando em consideração as características do escoamento, que na maioria das vezes, afeta o fluxo do rio em sua normalidade.

Diante do exposto, este trabalho tem como foco o estudo de uma barragem, em que é analisado o rompimento hipotético da mesma, utilizando, para essa finalidade, o software de simulação hidrodinâmica IBER, o qual é capaz de simular a ocorrência de eventos extremos e identificar os pontos críticos em um escoamento.

Em particular, a presente pesquisa tem como objeto de estudo a análise do rompimento hipotético da barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna, que localiza-se no estado de Minas Gerais, utilizando o software IBER, tendo como estudo de caso a cidade de Santo Antônio de Pádua, localizada no estado do Rio de Janeiro. Ademais, esse trabalho teve como intuito verificar o resultado da propagação da onda de cheia, a fim de obter meios para a avaliação de um trecho do rio Pomba, situado a jusante da referida represa, em função do uso e ocupação do solo a partir das características da região e, com isso, fornecer bases/meios de modo a contribuir e auxiliar para elaborar o Plano de Ação Emergencial (PAE), além de verificar os riscos ocasionados pelo rompimento.

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em pesquisa bibliográfica, através de livros, artigos, revistas e textos científicos publicados relacionados ao tema proposto, bem como o uso de equações matemáticas (e sua consequente solução numérica utilizando um software de simulação hidrodinâmica) para realizar a modelagem do escoamento superficial envolvendo a ruptura da barragem, com o intuito de analisar distintos cenários para o problema em questão e, assim, funcionar como medida preventiva a ser tomada quanto aos impactos causados ao meio ambiente.

## 1.1 Justificativa

A modelagem matemática tem sido utilizada para tentar explicar e interpretar os mais diversos fenômenos que nos permeiam, gerando os resultados desejados através do grau de confiança em que a mesma é capaz de proporcionar. O uso da modelagem a fim de simular eventos hidrológicos de grande complexidade, tais como as enchentes e inundações, ou ainda, rompimentos hipotéticos de barragens, é o ponto primordial para as tomadas de decisão iniciais. Desse modo, Bassanezi (2002) refere-se à modelagem como uma ferramenta que pode ajudar a minimizar ou solucionar os problemas e situações realísticas, onde a matemática é tida como linguagem que envolve a simplificação, compreensão e decisão com base no objeto em estudo.

Há de se destacar, também, que o número de acidentes com barragens ultimamente vem crescendo de maneira significativa. Com isso, houve um grande debate das autoridades para que as mesmas fiscalizassem essas ocorrências, as quais acarretam uma série de danos ambientais. Logo, verifica-se a necessidade de expor os problemas que possam emergir, bem como conscientizar a população sobre tal situação, caso a tragédia venha sobrevir, uma vez que um alerta de uma enchente ou inundação ocasionada pelo rompimento de uma barragem, com cota máxima a ser pré-anunciada minimizaria as perdas humanas, bem como os danos materiais.

Em particular, neste trabalho, o estudo do rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna justifica-se pelo fato da mesma localizar-se no curso do rio Pomba, o qual divide a cidade de Santo Antônio de Pádua ao meio e cujo rompimento poderia atingir a toda população, a fauna e flora da região.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos retratados nesse trabalho vêm mostrar as suas reais finalidades de estudos envolvendo modelos matemáticos e soluções numéricas representados nessa pesquisa.

### Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral simular computacionalmente o rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna, por meio do software IBER, além de analisar, investigar e discutir os impactos gerados por tal rompimento em relação à população da região pesquisada, tendo como estudo de caso o município de Santo Antônio de Pádua, estado do Rio de Janeiro.

## Objetivos Específicos

Além do objetivo geral apresentado, há outros a serem considerados. A seguir, apresentam-se tais objetivos específicos:

- Simular a onda de cheia gerada a partir do rompimento hipotético referente à barragem da UHE Barra do Braúna;
- Identificar as cotas máximas e as áreas atingidas através das simulações computacionais realizadas;
- Classificar a área afetada em relação ao uso e ocupação do solo;
- Classificar a barragem quanto ao dano correlacionado;
- Analisar possíveis impactos à vida humana e às edificações ocasionado pelo rompimento da barragem.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Esta seção apresenta a descrição de cada capítulo desta dissertação, os quais são fundamentais para sua estrutura e cumprimento dos objetivos já mencionados.

No Capítulo 1 são expostos alguns conceitos iniciais, bem como a justificativa e objetivos para compreensão do problema a ser tratado, a fim de contextualizá-lo. No Capítulo 2 são apresentados os conceitos preliminares relacionados aos tipos de barragens, mostrando suas legislações e problemas oriundos dos mesmos. Como desdobramento, no Capítulo 3 é abordada a descrição do problema proposto. Por outro lado, no Capítulo 4 é mostrada a formulação matemática e a solução do problema investigado nessa dissertação. Na sequência, o Capítulo 5 é destinado à apresentação dos resultados e discussões referentes à construção do modelo digital da região de interesse, da variação das malhas espaciais e da calibração e validação do modelo para os cenários de rompimentos hipotéticos propostos, bem como a análise dos resultados numéricos e suas respectivas conclusões parciais. Por fim, no Capítulo 6 é feita a conclusão dessa pesquisa, com base na teoria discutida ao longo do texto e resultados obtidos no Capítulo 5, com perspectivas para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos relacionados às barragens. Dentre os aspectos apresentados, são citados a avaliação dos riscos, as legislações vigentes em âmbito nacional e os problemas decorrentes do rompimento de tais estruturas.

### 2.1 Barragens: Contexto Histórico

O homem sempre buscou sobreviver ao meio em que se encontra. Com a evolução no decorrer dos anos, aos poucos o ser humano foi se aprimorando, ao desenvolver a sua inteligência. Desse modo, ele abandonou a prática do nomadismo e criou inúmeras cidades. Ao considerar a água como fonte de matéria prima, a fim de promover o desenvolvimento dos homens, ocorreu uma maior demanda hídrica, havendo a necessidade de se implantar um maior número de barragens (FRANCO, 2008). Willinghoefer (2015) reforça esse aumento devido à alta demanda ocasionada pelo crescimento populacional e desenvolvimento industrial.

De acordo com Willinghoefer (2015), a palavra barragem se refere a uma estrutura construída de forma transversal a um rio ou talvegue<sup>1</sup>, a fim de gerar um reservatório de acumulação de água e/ou elevar seu nível d'água.

Inicialmente, as barragens eram homogêneas e seu material era transportado de forma manual, além de ser compactado por meio de pisoteamento de animais ou homens. Depois, com o desenvolvimento da tecnologia, núcleos de argila foram inseridos a fim de obter a estanqueidade das barragens (FRANCO, 2008).

De acordo com Pereira (2014), no período entre 1990 e 1999, no Centro de Engenharia Genética e Biotecnologia (CIGB), 3.354 (três mil, trezentas e cinquenta e quatro) barragens foram inauguradas no mundo inteiro. Para tal, foram levadas em consideração apenas barragens de altura de 10 a 15 m, cuja capacidade de armazenamento fosse superior a 3 milhões de metros cúbicos de água, no reservatório. Pereira (2014) também diz que segundo a CIGB, o aterro compactado é o principal tipo de barragem, equivalente a 43% do total representado no mundo. Logo após, seguem as barragens de gravidade e as de enrocamento, com 10,6% e 5,3% do total, respectivamente.

A construção de uma barragem possui vários pontos positivos, uma vez que ela atua na melhoria da qualidade da água, através da diminuição de sua turbidez, além da

---

<sup>1</sup> Linha mais baixa de um vale por onde escorre a água da chuva e das nascentes ou o canal mais fundo de um rio.

WINGE, M. et al. Glossário Geológico Ilustrado, 2001. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>>. Acesso em: 17 de ago. de 2022.

sedimentação de nutrientes e redução dos processos de eutrofização a jusante. As barragens também são construídas a fim de atingir mais de uma utilidade, como é o caso da geração de energia elétrica, fornecimento de água ao consumo humano e industrial, controle cheias de inundação, regularização de vazões, dentre outras (FRANCO, 2008).

Em relação às barragens associadas a energias hidrelétricas, foco desse trabalho, observa-se que:

"Os cinco países onde mais se construíram barragens são responsáveis por mais de três quartos de todas as grandes barragens em todo o mundo, sendo que cerca de dois terços de todas as grandes barragens do mundo estão localizadas em países em desenvolvimento. A energia hidrelétrica é responsável por mais de 90 % da produção total de eletricidade em 24 países, entre eles o Brasil e a Noruega. Metade das grandes barragens do mundo foram construídas exclusivamente para irrigação e estima-se que as barragens contribuam com 12% a 16% da produção mundial de alimentos. Além disso, em pelo menos 75 países, grandes barragens foram construídas para controlar inundações e em muitas nações barragens continuam como os maiores projetos individuais em termos de investimento" (FRANCO, 2018 p. 18).

## 2.2 Tipos de Barragens

A classificação das barragens pode ser realizada conforme o seu uso do barramento, projeto hidráulico ou, até mesmo, de acordo com a utilização dos materiais que regem a sua construção.

Franco (2008) relata que o corpo da barragem possui a incumbência de conter o volume de água a ser represada. Por isso, a importância de se considerar, no projeto da obra, a construção desse corpo, visto que este tem a possibilidade de ocorrer em locais diversos e também com o uso de tipos de materiais diferentes. Para ele, as principais estruturas são terra, concreto, enrocamento (conjunto de blocos de pedras compactadas) e mistas. Além disso, segundo Almeida (2001), as barragens podem ser divididas em dois tipos: barragens de terra ou enrocamento e barragens de concreto.

No que se refere às barragens de terra, Quintas (2002) as subdivide em: gravidade, arco, contrafortes e de aterro. As barragens de gravidade são estruturas de betão<sup>2</sup>, que promovem a garantia da durabilidade contra os efeitos baseados na forma geométrica adotada em projeto. Na Figura 1 é mostrada uma barragem de gravidade.

Já, as barragens em arco possuem um volume pequeno, sendo o empuxo da água transmitido para as ombreiras em arqueamento horizontal. São indicadas em regiões de vales estreitos e profundos (SOUZA, 2013). Na Figura 2 é representada uma barragem em arco, situada na Austrália.

<sup>2</sup> Mistura de cimento, pedra britada, água e areia, usada em construções; concreto, formigão.  
Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/betao/>>. Acesso em: 08 de out. de 2022.





Figura 1 – Barragem de gravidade.  
Fonte: Quintas (2002).



Figura 2 – Barragem em arco.  
Fonte: Souza (2013).

Por outro lado, a barragem em contraforte apresenta um uso em queda no exterior e no Brasil. Quando essa barragem é comparada às barragens de gravidade, inúmeras são as vantagens apresentadas, como por exemplo, há menos supressão na base e também uma menor quantidade de volume de concreto (ORTIS et al., 2020). A seguir, na Figura 3, é representada uma barragem de contraforte.



Figura 3 – Barragem de contraforte.  
Fonte: Ferreira (2007).

De acordo com Souza (2013), as barragens de aterro são feitas de enrocamento ou uma combinação de solo-enrocamento e também por materiais soltos, como por exemplo, os solos. Esse tipo de barragem, quando em barragens de terra, tem que ser levada em consideração, uma vez que pode ser altamente perigosa caso ocorra o galgamento que, embora num curto prazo de tempo, certamente ocasionará a ruptura da barragem. Na Figura 4 é representada a barragem de aterro de terra com seção homogênea.



Figura 4 – Barragem de aterro de terra com seção homogênea.  
Fonte: Monteiro (2018).

Em contrapartida, conforme Franco (2008), as barragens de concreto são estruturas resistentes feitas de concreto, construídas basicamente por materiais granulares, sendo adicionado cimento e aditivos químicos. Há vários tipos de barragens de concreto, das quais são enfatizadas as de concreto estrutural com contrafortes, gravidade, gravidade aliviada e em arco.

As barragens de concreto estrutural com contrafortes são dotadas de uma laje impermeável à água que fica impossibilitada de passar. São apoiadas em contrafortes verticais, com a função de comprimir a fundação (GUTSTEIN, 2011). Na Figura 5 são representados os componentes básicos de uma barragem de concreto estrutural com contrafortes.



Figura 5 – Barragem de concreto estrutural com contrafortes.  
Fonte: Júnior (2016).

Segundo Gutstein (2011), as barragens de gravidade são formadas por estruturas de concreto, a fim de garantir a sua estabilidade contra todas as cargas de projeto existentes, em virtude da massa, forma geométrica e resistência do concreto, como mostrada na Figura 6.

Já, a barragem de gravidade aliviada, por sua vez, aparece como uma alternância em relação à gravidade maciça. Ela apresenta uma boa redução no volume e nas áreas (MOURA, 2016). Na Figura 7 é representada uma barragem de gravidade aliviada.





Figura 6 – Barragem de gravidade.  
Fonte: Moura (2016).



Figura 7 – Barragem de gravidade aliviada.  
Fonte: Moura (2016).

Por fim, as barragens de concreto em arco, também denominadas de represas em abóbada, são as que possuem paredes de concreto delgadas e curvatura horizontal e vertical. Schneider (2011) diz que essa barragem é um tipo de barramento de grande economia, pois possui, em sua estrutura, esforços de compressão, mas seu cálculo estrutural se torna difícil. Na Figura 8 é mostrada uma barragem de concreto em arco, localizada em Hoover Dam, Estados Unidos.



Figura 8 – Barragem de concreto em arco.  
Fonte: Possan (2015).

### 2.3 Avaliação de Risco e Segurança em Barragens

Leite (2019) diz que as barragens estão sempre suscetíveis a acidentes e incidentes. Os acidentes se referem a um desastre ou acontecimento de forma inesperada e desagradável, capazes de causar consequências graves e lastimáveis. Já, os incidentes são decorrentes de compartimentos anormais ocorridos nas estruturas, ou seja, são vistos como defeitos que envolvem componentes dos sistemas envolvidos, como atividades de engenharia, pessoas, componentes físicos, sociais e organizacionais.

Por outro lado, Fontenelle (2007) refere-se ao risco como uma dependência de fatores relacionados às suas dimensões e características, fatores relacionados ao meio ambiente, construção, qualidade e operação do projeto. Ademais, adentram a possível ocorrência de sismos e cheias, fatores humanos, agressividade do clima, a população e instalações próximas a barragem.

Conforme Fontenelle (2007), a análise de risco tem por finalidade:

- Identificar os eventuais riscos e rupturas;
- Avaliar o risco considerado tolerável;
- Estimar a estatística do risco;
- Estabelecer medidas corretivas a fim de atenuar os riscos.

Ainda, no que diz respeito à análise do risco e consequente segurança envolvendo as barragens, Perini (2009) afirma que:

“Um conceito que vem sendo considerado como o mais completo para o controle da segurança de barragens é o chamado Sistema Integrado de Segurança, que vê a questão sobre três pilares: o Técnico-Operacional (T-O), o de Monitoramento-Vigilância (M-V) e o de Gestão de Riscos/Emergência (G-E). Cada um desses pilares deve ser entendido como um apoio que, em conjunto, mantém a barragem segura durante as diversas fases da vida” (PERINI, 2019 p. 27).

Na Figura 9, tem-se uma representação de um Sistema Integrado de Segurança de Barragens, o qual foi descrito por Perini (2009).

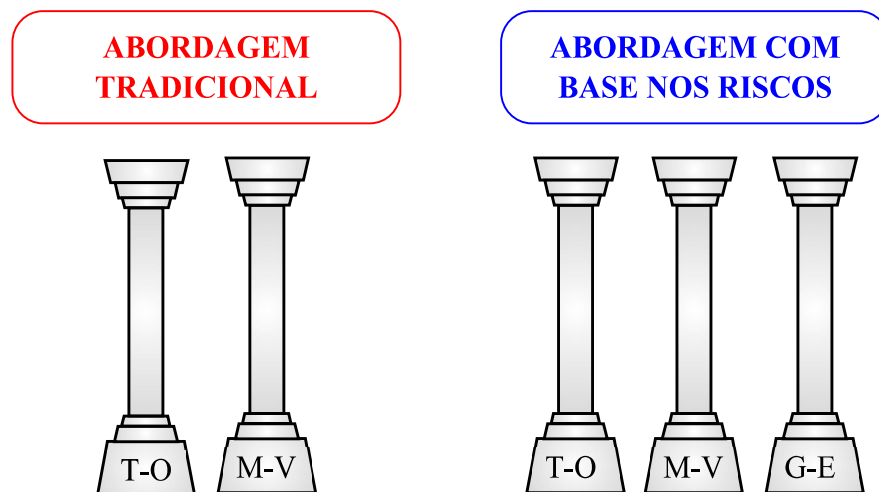


Figura 9 – Sistema Integrado de Segurança de Barragens: Pilar Técnico-Operacional (T-O), Pilar Monitoramento-Vigilância (M-V) e Pilar de Gestão de Riscos/Emergência (G-E).

Fonte: Adaptado de Perini (2009).

No que se refere ao Sistema Integrado de Segurança, de acordo com Almeida (2001), o Pilar Técnico-Operacional (T-O) representa as medidas de controle de segurança na parte hidráulica, estrutural e operacional, quando aplicadas em todas as fases de projeto. Já Fusaro (2011) diz que o Pilar Monitoramento-Vigilância (M-V) consiste em monitorar os eventos que causam os desastres, elaborar e aplicar leis de uso e ocupação dos solos, criar programas educativos de medidas de segurança e remover as estruturas em áreas de risco. Por fim, Perini (2009) considera o Pilar de Gestão de Riscos/Emergência (G-E) como um meio de implementar e preparar todas as medidas necessárias para controlar os riscos, além de se submeter a uma resposta caso haja algum acidente imprevisto, sendo este ocorrido numa barragem. Para ele, cada pilar deve ser visto como uma condição propícia à segurança, no entanto, não o suficiente.

A classificação do risco de barragens, segundo Souza e Silva (2017), é por categoria de risco, pelo dano associado e por seu volume, conforme os critérios do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

De acordo com Perini (2009), a Gestão de Riscos/Emergência é uma prática que envolve cultura, as estruturas e os processos voltados na realização das oportunidades potenciais, além de poder gerenciar os efeitos contrários suscetíveis a surgir com o tempo. Ela se concretiza através de um processo iterativo em etapas que proporcionam uma constante melhoria nas tomadas de decisão, como mostrado na Figura 10.

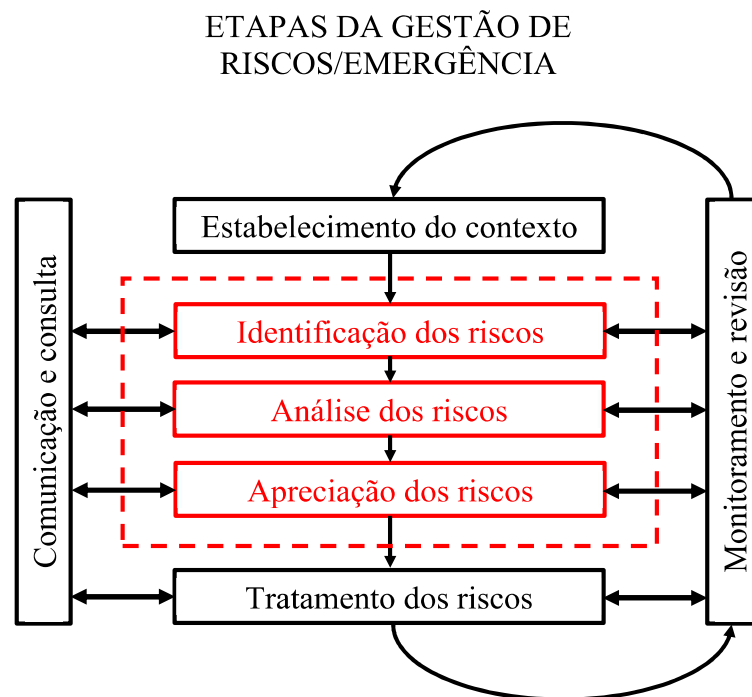


Figura 10 – Etapas da Gestão de Riscos/Emergência.  
Fonte: Adaptado de Perini (2009).

Segundo Vianna (2007), embora o risco dos acidentes em barragens não seja muito usual, sua possível ocorrência gera consequência catastrófica. Na Figura 11 é mostrado o processo de gestão de risco referente à segurança de barragens.

No princípio, a construção das barragens, em solo nacional, começou a crescer de modo acentuado a partir da construção de açudes na região nordeste do Brasil. Depois, devido à necessidade da geração da energia elétrica, controle de cheias e de irrigação (PERINI, 2009).

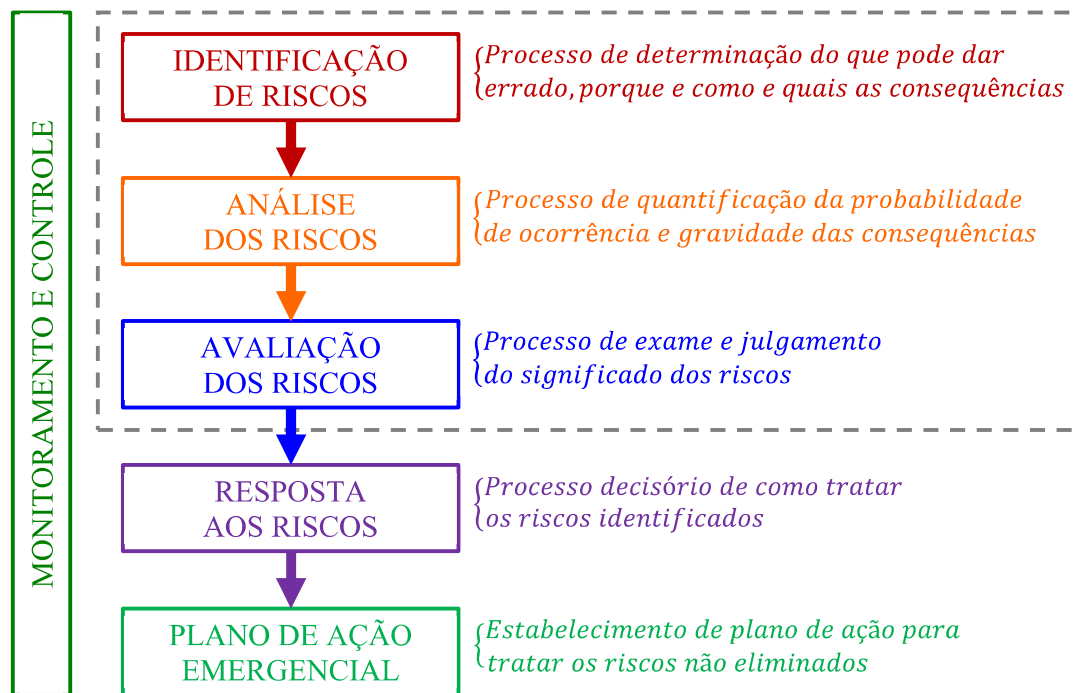


Figura 11 – Etapas do Processo de Gestão de Riscos referente à Segurança de Barragens.  
Fonte: Adaptado de Fusaro (2011).

Cabe ressaltar, que a hidroeletricidade, no Brasil, corresponde em aproximadamente 75% da matriz energética brasileira. Para Soriano e Valencio (2012), a energia hidrelétrica é considerada a essência da sociedade industrial, a fim de fornecer a base energética primordial para o crescimento no desenvolvimento de todo o país.

O investimento inicial para a construção de uma usina hidrelétrica, bem como os custos de manutenção são altos. No entanto, a água é uma energia renovável e fonte desse combustível, o que torna o seu custo nulo, mas isso não significa que seja livre de impactos ambientais e sociais. Quando há inundação de áreas ou a criação do lago a montante da barragem, vários problemas são gerados, como a destruição das áreas extensas de vegetação natural, reapropriação das populações ribeirinhas, desmoronamento de margens, danos à fauna e à flora, assim como mudanças no regime hidráulico do rio. Todavia, o maior problema refere-se à segurança das barragens no decorrer e no fim da construção (SANTOS, 2018).

Nesse sentido, Santos (2018) relata a importância das hidrelétricas na produção de energia no Brasil. Por isso, há uma enorme preocupação em verificar a segurança das barragens, a fim de compreender o comportamento delas, e assim, certificar que as mesmas permaneçam em operação e executem todos os propósitos de projeto e, principalmente, não colocar as pessoas e propriedades a sua jusante em risco.



## 2.4 Legislações Vigentes Envolvendo Barragens

Fusaro (2011) relata que a lei sobre a Segurança de Barragens, no Brasil, é a de nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Ela se refere à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que se destina à captação da água sob os diversos usos. Entre os seus principais objetivos, destacam-se:

"A garantia da observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências; regulamentação das ações de segurança a serem adotadas em todas as fases de vida útil da barragem; promoção do monitoramento e acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens; criação de condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; coligação de informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos; estabelecimento de conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público; e, por fim, fomentação da cultura de segurança de barragens e gestão de riscos" (SANTOS, 2018 p. 23).

Para Mota (2017), a Lei nº 12.334 apresenta algumas características, dentre as quais pode-se destacar:

- Altura do maciço em aproximadamente 15 *m*, contada desde o ponto mais baixo da fundação até a crista;
- Reservatório que possua resíduos perigosos;
- Capacidade total do reservatório superior a 3.000.000 *m*<sup>3</sup>;
- Categoria de dano em médio ou alto.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) tem por finalidade garantir que sejam cumpridos os parâmetros mínimos de segurança de barragens a fim de proteger o meio ambiente e a população. A PNSB prevê que seja criado o Plano de Segurança da Barragem (PSB), que requer o Plano de Ação Emergencial (PAE) para a classificação de barragens vistas como danos potenciais altos.

Conforme Balbi (2008), o PAE é dividido em plano interno e externo. O plano interno contém as ações que detectam o problema, notifica os agentes envolvidos e faz a tomada de ações, além de apresentar os cenários de emergência, como um possível rompimento. Já, o plano externo emite um sinal de alerta às populações afetadas e o procedimento para a sua retirada.

De um modo geral, o artigo 12 do Plano de Segurança da Barragem aborda que no PAE, em relação a um caso de emergência, os agentes deverão ser notificados sobre o mesmo, contemplando ao menos:

"I - identificação do empreendedor; II - dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação desta Lei, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem; III - estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem; IV - manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem; V - regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; VI - indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem; VII - Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido; VIII - relatórios das inspeções de segurança; IX - revisões periódicas de segurança" (BRASIL, 2010).

De acordo com Willinghoefer (2015), a segurança da barragem ocorre quando há uma condição que visa estabelecer uma integridade operacional e estrutural, além de preservar a saúde, vida e o meio ambiente. Paula et al. (2013) enfatizam, ainda, que o objetivo dos programas que envolvem a segurança de barragens é verificar todos os riscos que essas estruturas oferecem, a fim de minimizar até chegar a níveis admissíveis.

A Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010) diz que o Plano de Segurança de Barragem (PSB) necessita de uma gama de informações que envolve uma barragem, como por exemplo, a categoria, o nome, o tamanho, identificação quanto ao dano potencial associado (DPA) e a categoria de risco (CA), bem como a idade da construção, conforme mostrado na Figura 12.



Figura 12 – Estrutura matricial para avaliação de barragens.  
Fonte: Adaptado de Leite (2019).

Toda a questão da regulamentação da Lei nº 12.334 de 2010, com características específicas do setor elétrico, incide na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL),

a partir da Resolução Normativa ANEEL, de 15 de dezembro de 2015, chamada REN 696/2015. Esta por sua vez, estabelece os critérios para classificar, formular o plano de segurança, inspecionar a segurança espacial e regular, além de revisar periodicamente a segurança dos barramentos. Também, delimita os tipos de barragens de aproveitamentos hidrelétricos a cerca dos regulamentos específicos da Agência.

De acordo com Souza (2019), toda a PNSB se fundamenta pelos princípios de prevenção de sinistros ocorrentes em barragens, visto que esse tipo de dano causa inúmeros prejuízos de ordem econômica, social e ambiental.

Por outro lado, a Constituição Federal de 1988, em relação ao setor elétrico, no seu artigo 21, no inciso XII, indica que compete à União, explorar, diretamente ou mediante autorização, permissão ou concessão, as instalações e serviços de energia elétrica, bem como do setor energético dos cursos de água, juntamente com os Estados, cujos potenciais hidroenergéticos são citados.

Segundo Conejo (2016), sua articulação com a Lei de nº 9.433/1197 obedecerá a todas as diretrizes, fundamentos e instrumentos referentes a Política Nacional de Recursos Hídricos, juntamente com o apoio de órgãos e entidades privadas e públicas que integram o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, com fins de proporcionar um elo entre os órgãos fiscalizadores de barragens e coordenar anualmente o Relatório de Segurança de Barragens.

Já, a Resolução CNRH de nº 144/2012 retrata que o Relatório de Segurança de Barragens precisa possuir, no mínimo, dados atualizados sobre os cadastros das barragens, a implementação da PNSB, quantitativo de barragens com categoria de risco alto, descrição dos principais acidentes no decorrer do período de competência do relatório, relação dos órgãos que remetem informações para a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e os recursos dos orçamentos fiscais dos estados e da União.

## **2.5 Problemas Decorrentes do Rompimento de Barragens**

Nos últimos anos, inúmeros acidentes decorrentes de falhas de barragens ocorreram. Grande parte deles gerou danos maciços e graves, tais como perda de vidas humana e animal, poluição do meio ambiente, destruição de propriedades, além de impactos econômicos negativos para vários setores, como por exemplo, o de mineração (MACHADO; AZEEZ, 2018).

Oliveira (2019) também reforça que os impactos ambientais de grande magnitude são provenientes do rompimento de barragens, que afetam a biodiversidade local, como danos aos organismos aquáticos, à poluição atmosférica, aos recursos hídricos e econômicos devido à destruição de residências e outros bens, mas principalmente perdas elevadas no número de vidas humanas. Ademais, com esses impactos, há a mudança nas comunidades

biológicas, que geram a proliferação de insetos vetores de várias doenças nas populações afetadas.

O rompimento das barragens pode ocorrer, segundo Santos (2017), de duas maneiras: gradual ou instantânea. No primeiro caso, o efeito da onda é pequeno e o comportamento do reservatório é como se o mesmo apresentasse uma abertura grande de comportas. Já, no segundo rompimento, uma grande parte da seção ou ela toda é removida num pequeno intervalo de tempo, originando numa onda de cheia com grande capacidade de erupção ao vale à jusante.

Os critérios para a formação da brecha influem diretamente no hidrograma de ruptura devido ao rompimento da barragem. Sendo assim, Santos (2017) afirma que:

"Após a definição da brecha, a modelagem do rompimento de uma barragem exige que muitas suposições sejam feitas, isso porque, em geral, não há dados quantitativos suficientes para uma análise precisa do problema. As principais variáveis envolvidas devem ser modeladas e o conhecimento de suas características é essencial para o sucesso na previsão de ondas de cheia e na elaboração de mapas de inundação" (SANTOS, 2017).

Santos (2020) evidencia que é preciso que haja estudos prévios numa bacia hidrográfica antes da construção de barragens, uma vez que a ausência deles pode acarretar em danos catastróficos, resultando em problemas de abastecimento ou em tornar inútil a bacia como uma fonte segura de água. Além disso, a construção de uma barragem hidrelétrica tem a possibilidade de ocasionar inúmeros impactos ambientais numa bacia hidrográfica. Sousa (2000), por exemplo, diz que o alagamento de uma grande área pode provocar inúmeras mudanças no ecossistema, como o desmoronamento de barreiras, destruição da vegetação natural, extinção de algumas espécies de peixes, assoreamento de leito de rios, dentre outras. Outros fatores podem ser analisados, conforme relatam Ferreira, Junior e Souza (2017):

"O lançamento de resíduos industriais e/ou domésticos indiscriminadamente nos cursos d'água, como forma de destino final, poderá ocorrer assoreamento além do aumento da turbidez e variação do gradiente de temperatura, acarretando a quebra do ciclo vital das espécies, tornando a água biologicamente estéril. O lançamento de despejos industriais com temperatura elevada afeta a sobrevivência de algumas espécies da fauna e flora aquática, visto que a vida destas espécies só pode existir dentro de um gradiente relativamente pequeno de temperatura" (FERREIRA; JUNIOR; SOUZA, 2017).

Cabe ressaltar, de acordo com Batista et al. (2012), que a forma de aproveitar os rios com fins de construção de barragens faz com que haja a mudança na dinâmica natural que não fica restrita somente as áreas do reservatório, ou seja, também em áreas utilizadas com fins de construir as vias de acesso.

Conforme aborda Roos (2012), a construção de uma hidrelétrica gera grandes impactos na biosfera, onde se afeta o desenvolvimento sustentável, assunto tão discutido e preocupante visto no cenário atual. As usinas hidrelétricas são tidas como obras de grande complexidade, pois geram impactos e excedem a área de implantação. Assim, há uma necessidade de se constituir programas e políticas ambientais para amenizar suas possíveis degradações construtivas, como a formação de um lago.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Neste capítulo é abordada a caracterização da área definida para estudos, a fim de analisar cenários envolvendo uma hipotética ruptura da barragem da UHE Barra de Braúna, região que se estende do estado de Minas Gerais até o estado do Rio de Janeiro, sendo a cidade de Santo Antônio de Pádua-RJ, o principal objeto de investigação sobre os efeitos causados por tal rompimento.

#### 3.1 Bacia Hidrográfica do Rio Pomba

O Brasil possui cerca de 12% de recursos hídricos quando comparado em nível global. Mas sua distribuição espacial é desigual, bem como o crescimento econômico e populacional desordenado. No país, há várias bacias hidrográficas, as quais encontram-se em estado crítico de qualidade e abastecimento de água. A bacia hidrográfica do rio Pomba é uma delas e apresenta uma drenagem amplamente afetada pelos despejos de efluentes de origem industrial e desmatamento. Nela, há uma cobertura florestal que se reduz à medida do tempo, além de resultar em grande área de terras sujeita a erosões (SILVA, 2014).

A bacia hidrográfica do rio Pomba encontra-se situada entre as coordenadas 20°51'58" a 21°42'53" de latitude Sul e 43°45'15,3" a 41°59'2,5" de longitude Oeste, com área de drenagem de 8.616  $km^2$ , a qual abrange três municípios fluminenses e trinta e cinco mineiros. A nascente do rio Pomba, principal curso d'água que dá nome a bacia, está localizada na Serra Conceição, em Barbacena, estado de Minas Gerais, com 1.100  $m$  de altitude e, a 90  $km$  de sua nascente, essa altitude se reduz a 200  $m$ . Na cidade de Cataguases, estado de Minas Gerais, está na altitude de 165  $m$ , enquanto que, na cidade de Santo Antônio de Pádua, estado do Rio de Janeiro, sua altitude passa a ser 90  $m$ . Este curso d'água (rio Pomba) atinge a foz no rio Paraíba do Sul após 265  $km$  percorridos. Durante esse percurso, seus principais afluentes são os rios Xopotó, Pardo, Novo, Formoso, Piau. Na Figura 13 é apresentada a bacia do rio Pomba.

A bacia hidrográfica do rio Pomba é uma região caracterizada por terras severamente desmatadas, problemas esses que contribuem para a degradação do rio, que já sofre pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais. Ademais, é uma região marcada por desastres naturais ocorridos constantemente, como vários litros de resíduos tóxicos, desmoronamento de terras e enchentes.

Um dos principais problemas dessa bacia é a perda de vida humana e animal, bem como a ausência de saneamento ambiental, em que não há tratamento de esgoto doméstico, o que sempre ocasiona o lançamento dos efluentes domésticos "*in natura*" nos cursos d'água.

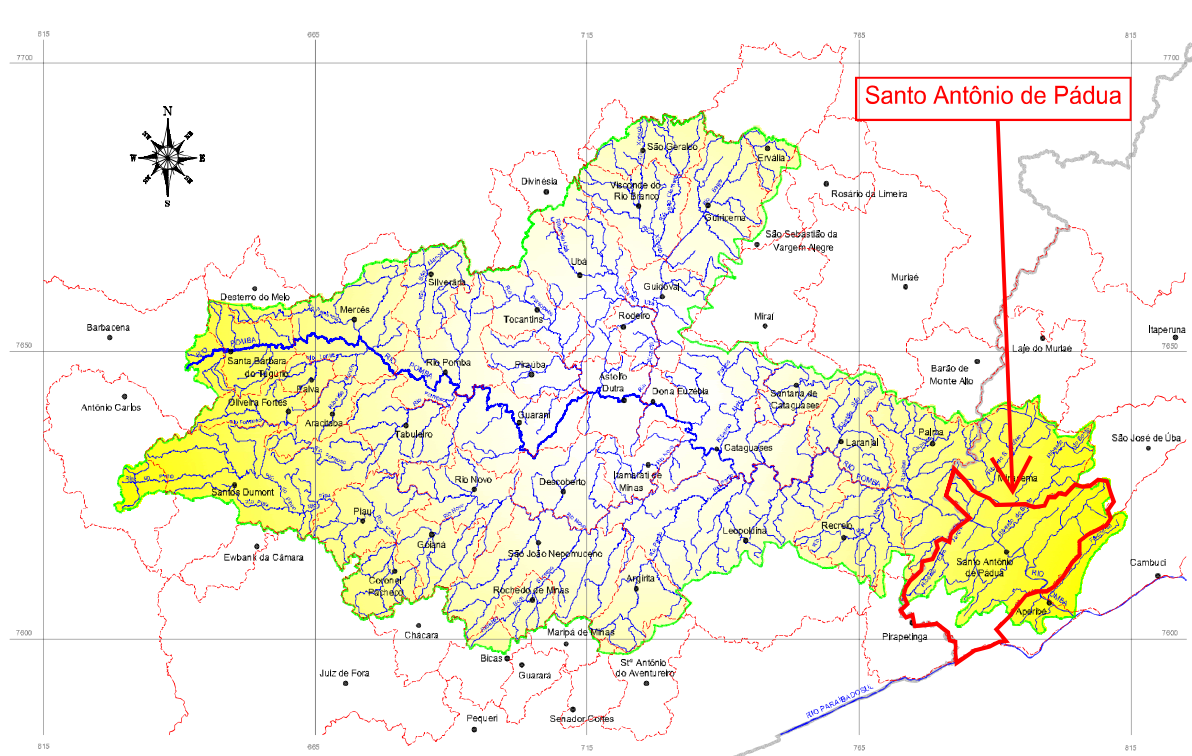


Figura 13 – Bacia hidrográfica do rio Pomba.  
Fonte: Adaptado de AGEVAP (2006).

A falta de tratamento dos esgotos domésticos constitui-se como uma das características mais marcantes da bacia rio Pomba quando relacionada ao saneamento ambiental. Um outro fator a se considerar é a degradação da cobertura vegetal (FUJITA, 2011).

Silva (2014) relata que também estão incluídas na bacia do rio Pomba as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), compostas por seus afluentes, ambos do estado de Minas Gerais, como Guarany/rio do Pinho, localizado no município de Santos Dumont, com 5.400 kW de potência instalada; Boa Esperança/rio Piau, localizada no município de Piau; Maurício/rio Novo, onde o reservatório da barragem encontra-se entre os municípios de Leopoldina e Itamarati de Minas; e Ervália/rio dos Bagres, cujas nascentes se localizam no município de Ervália, na serra da Mantiqueira. Por outro lado, no leito principal, foram registradas seis PCHs, totalizando, 10 PCHs ao longo da bacia, dentre elas, a barragem da Usina Hidrelétrica Barra do Braúna, principal foco de investigação dessa pesquisa.

Ao longo do curso d'água do rio Pomba, também é possível enumerar alguns acidentes ocasionados por rompimento de barragens. Dentre eles, há de se destacar aqueles envolvendo a empresa de mineração Rio Pomba Cataguases Ltda. Pedrosa (2017) relata que em menos de um ano, a referida empresa apresentou dois acidentes na barragem São Francisco, localizada no município de Mirai, estado de Minas Gerais. Essa barragem tinha

por fins usar os rejeitos vindo do minério de bauxita da referida empresa.

O primeiro incidente ocorreu no ano de 2006, quando houve o vazamento de aproximadamente 400 milhões de litros de lama constituída de sulfato de alumínio e óxido de ferro, provocando a interrupção da água, das regiões norte e noroeste fluminense. Essa lama ocasionou a morte de inúmeros animais, tornando as áreas de pastagens e agricultáveis inutilizadas. Na Figura 14 é apresentada a região em questão após o rompimento.



Figura 14 – Mineradora Rio Pomba Cataguases Ltda depois do rompimento da barragem.  
Fonte: Adaptado de Monte-Mor (2008).

Já no segundo acidente, ocorrido em 10 de janeiro de 2007, vários municípios de Minas Gerais, entre eles Muriaé, Mirai e Patrocínio do Muriaé; e do Rio de Janeiro, como Laje do Muriaé e Itaperuna, foram os mais afetados pelo rompimento da barragem de rejeitos de lavras de bauxita dessa empresa de mineração, devido a fortes chuvas que caíram na região (ALMEIDA, 2012).

A ocorrência de vários acidentes nas barragens, em nível nacional, tem feito com que várias empresas sejam cobradas quando se trata do quesito segurança e qualidade das estruturas nelas instaladas. Diante dessas considerações, torna-se indispensável um estudo que analise a barragem e, assim, as prováveis consequências devido à ruptura, cujo agravamento se dará de modo catastrófico.

O motivo para a verificação do rompimento da barragem é que o mesmo gera um quantitativo bem elevado de prejuízos a população dessas cidades que se encontram numa região a jusante à sua construção, uma vez que ela retém muita água em seu reservatório.



### 3.2 Usina Hidrelétrica Barra do Braúna

A Usina Hidrelétrica Barra do Braúna, pertencente a “Broockfield Energia Renovável” (um grupo canadense), situa-se no rio Pomba e o eixo de sua barragem localiza-se entre as cidades mineiras de Laranjal e Recreio, além de cidades fluminenses, como Santo Antônio de Pádua, Itaocara, Aperibé e Cambuci. As águas de seu reservatório também ocupam as cidades de Leopoldina e Cataguases, no estado de Minas Gerais.

No ano de 2007, teve início da construção da UHE Barra do Braúna, no rio Pomba, a qual conta com uma barragem de 340 *m* de largura e 34 *m* de altura. Em 2009, no mês de setembro, iniciou-se o processo de enchimento do reservatório, pertencente ao Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) (MENDES, 2016). A autorização pela ANEEL ocorreu no dia 7 de janeiro de 2010.

Este empreendimento, tem sua operação de responsabilidade da Barra do Braúna Energética S.A., contando com uma capacidade de geração de energia de 39 *MW* e com uma área de 1.245,63 *ha* de lâmina d’água. O tempo de esvaziamento do reservatório é de 1,96 *h*. O reservatório a montante possui uma área de alagamento máximo de 10.050 *km*<sup>2</sup>, cuja máxima capacidade é de 88,71 *hm*<sup>3</sup>. Em relação ao nível operacional, o valor mínimo é de 150 *m* e o máximo de 154 *m*, quando considerado entre a lâmina de água e o ponto de maior profundidade do reservatório (FUJITA, 2011). Na Figura 15 é mostrada a vista a montante da UHE Barra do Braúna, enquanto na Figura 16 é representada a vista a jusante da mesma.



Figura 15 – Vista a montante da UHE Barra do Braúna.  
Fonte: Adaptado de Cestari (2020).

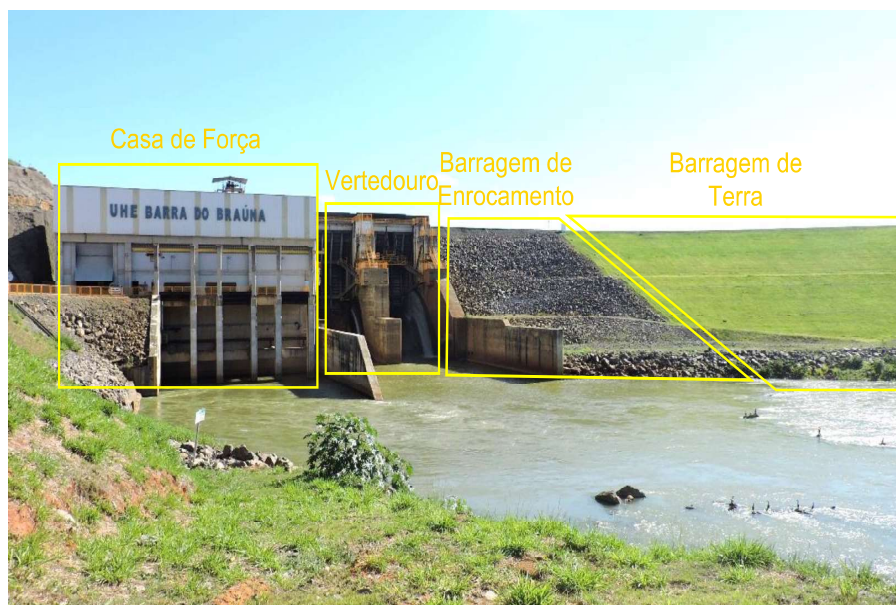


Figura 16 – Vista a jusante da UHE Barra do Braúna.  
 Fonte: Adaptado de Cestari (2020).

Mendes (2016) relata que a construção da UHE Barra do Braúna trouxe inúmeras vantagens e desvantagens. Em relação aos benefícios, houve, na região, geração de empregos, o que melhorou significativamente a economia. Também, com a criação do lago, uma gama de atividades, como por exemplo, a piscicultura, o turismo, dentre outras, propiciaram o desenvolvimento dos municípios vizinhos, como a cidade Laranjal. Em contrapartida, a construção dessa usina removeu um grande número da população rural de suas propriedades, afetando a agricultura, a cultura e a história dessa população. Ademais, essa construção arruinou o solo agricultável, espécies de animais e plantas, recursos madeireiros e alterações na área do rio.

Cabe ressaltar, conforme exigências legais, que essa usina possui um plano de segurança de barragens com a finalidade de minimizar a probabilidade da existência de acidentes, bem como atuar no monitoramento da estrutura. Segundo Pontes (2019), a UHE Barra do Braúna apresenta um sistema de proteção contra incêndio, a fim de detectar, proteger e combater quaisquer incêndios que estejam nos equipamentos e em locais da usina.

Para fins de atendimento aos princípios requeridos pela Lei Federal nº 12.334/2010, bem como a Resolução da Norma nº 696 da ANEEL, do ano de 2015, criou-se o Plano de Atendimento a Emergência (PAE) para a barragem da UHE Barra do Braúna. Ele é um documento a fim de identificar situações que se encontram em estado de emergência de modo a provocar um colapso estrutural da barragem. Também, determina os procedimentos na área técnica e administrativa como forma de atenuar os efeitos ocasionados pelas ondas de cheia ou por uma possível ruptura da barragem da UHE Barra do Braúna. A máxima

vazão de projeto dessa barragem é de  $3.296 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que significa que vazões excedentes representam o seu quesito de emergência.

Esse sistema é utilizado no momento em que a emergência possa acarretar danos associados à população a jusante, aos empregados, à produção, entre outras partes, a fim de garantir uma resposta rápida e segura a essas situações, uma vez que a condição de emergência se caracteriza a partir do momento em que as anomalias configurem em risco de ruptura, sendo o coordenador do PAE informado pelos empregados. Vários foram os estudos realizados sobre o rompimento hipotético dessa barragem. Objetivando estruturar um PAE que realmente funcionasse como um meio a proporcionar segurança das edificações, bem como das infraestruturas localizadas a jusante da barragem, vários mapas de inundação relacionados ao pior cenário de ruptura hipotética do barramento foram desenvolvidos.

Nesse sentido, como representada na Figura 17, a Zona de Auto Salvamento (ZAS) se configura como uma região que se localiza a jusante da barragem quando não há tempo necessário para que haja intervenções perante às autoridades competentes para o caso. Esse tempo representa cerca de trinta minutos da chegada da onda de inundação. Da mesma forma, caso a situação de anormalidade já se apresente e o risco de ruptura já esteja em andamento, deve-se iniciar a evacuação a jusante o mais rápido possível.

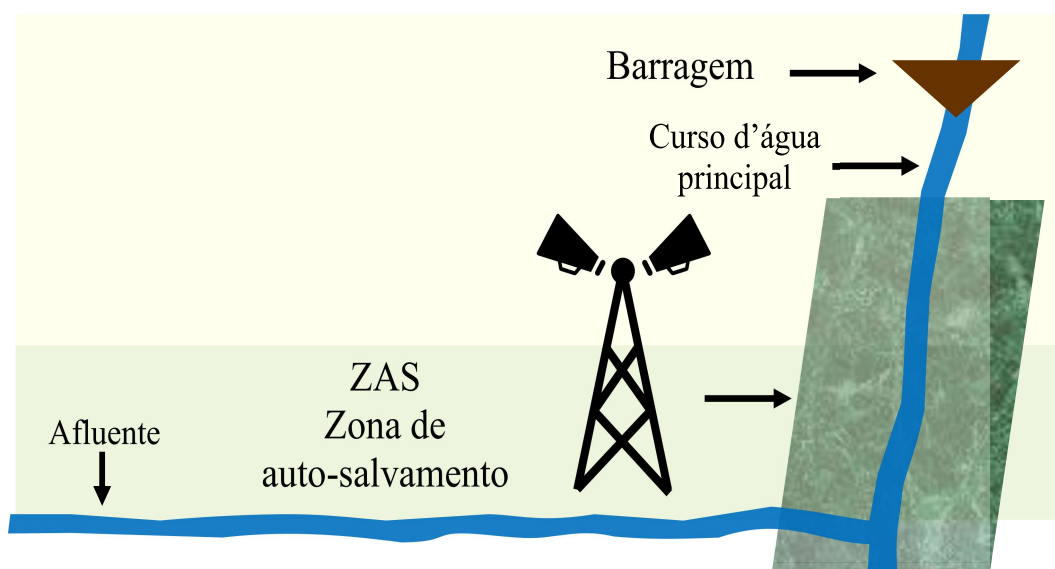


Figura 17 – Zona de Auto Salvamento.  
Fonte: Adaptado de Viseu (2006).

Ao estudar o rompimento da barragem da UHE Barra do Braúna, constata-se, também, a Zona de Impacto Direto (ZID), que representa uma área limitada geograficamente, localizada na posição a jusante da barragem, com a probabilidade de ser atingida se as estruturas se romperem.

Sempre se faz necessário planejar uma evacuação emergencial de uma área a fim de preservar a vida nesses lugares. Tal planejamento é realizado por meio do Plano de Contingência Municipal, cuja competência é da Defesa Civil, tanto municipal quanto estadual (CESTARI, 2020). Na UHE Barra do Braúna, há uma divisão de trinta e oito trechos de modo a obter melhorias no gerenciamento. Sendo assim, o foco desse trabalho está no município de Santo Antônio de Pádua, o qual, de acordo com os estudos relacionados à ZID, tem a possibilidade de ser atingido pela onda de cheia causada pela ruptura da barragem.

### 3.3 Santo Antônio de Pádua

Em particular, esse trabalho tem como enfoque o estudo dos efeitos do rompimento hipotético da barragem da UHE Barra de Braúna na cidade de Santo Antônio de Pádua, estado do Rio de Janeiro. Embora haja também outros municípios próximos à barragem, a escolha dessa municipalidade deve-se ao fato da mesma ser a primeira cidade que se encontra a jusante da barragem e que possui o rio Pomba passando dentro de seus limites, dividindo-a ao meio. Um rompimento da barragem atingiria a área mais urbanizada da cidade, causando enormes danos a toda a população.

O município de Santo Antônio de Pádua é pertencente ao noroeste do estado do Rio de Janeiro. A cidade encontra-se na latitude Sul a  $21^{\circ}32'22''$  e na longitude Oeste a  $42^{\circ}10'49''$ , apresentando uma área territorial de  $669 \text{ km}^2$ , subdividida em nove distritos: Santo Antônio de Pádua (zona urbana da cidade, a qual é a sede); Santa Cruz; Marangatu; Baltazar; Campelo; Monte Alegre, Paraoquena; Ibitiguaçu; e São Pedro de Alcântara.

Nos últimos anos, a cidade tem convivido com diversos problemas decorrentes da elevação das águas do rio Pomba. Inúmeras enchentes vêm ocorrendo, as quais alagam quase todos os seus bairros, provocando a invasão nas casas, escolas, dentre outros fatores, fazendo com que milhares de pessoas fiquem ilhadas. No ano de 2008, ocorreu uma de suas maiores enchentes, devido ao aumento de  $4,5 \text{ m}$  acima do leito normal. Esse acontecimento causou a derrubada de uma ponte pequena, no bairro Cidade Nova, gerando um enorme prejuízo, de milhões de reais. Depois, no ano de 2012, houve uma outra enchente na cidade, assim como no ano de 2014. No início do ano de 2020, três transbordamentos ocorreram, dos quais dois foram no mês de janeiro e um em fevereiro, atingindo várias áreas da cidade, o que causou prejuízo à população. Já, em 2022, houve transbordo no rio Pomba nos meses de janeiro e fevereiro, como mostrado na Figura 18.





Figura 18 – Enchente no bairro Mirante em Santo Antônio de Pádua ocorrido no mês de janeiro de 2022.

Fonte: Paes (2022).

Santo Antônio de Pádua tem cinco pontes localizadas em sua área urbana, as quais ligam uma margem à outra do rio Pomba. Três delas são destinadas à passagem de veículos, sendo elas Badih Chicralla (ponte do Nando), em homenagem ao prefeito Nando Padilha; Raul de Moraes Veiga (ponte Velha ou ponte dos Arcos), a mais antiga com quase 100 anos de idade e um dos símbolos do município; e Paulino Padilha (ponte Nova), próxima à rodoviária da cidade. Já, as duas pontes de pedestres são Alberíades Gabry, localizada no baixo Gerador; e Abel da Silva Malafaia (ponte de Ferro), que embora destruída em decorrência da enchente do ano de 2008, atualmente se encontra reconstruída. Além dessas cinco pontes citadas há, ainda, uma ponte localizada no distrito de Paraoquena, chamada ponte Paraoquena-Campelo, situada a 19,30 *km* da UHE Barra do Braúna. Na Figura 19 são representadas as pontes da zona urbana da cidade de Santo Antônio de Pádua.

No que se refere às simulações realizadas no PAE sobre o rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna, além das obras de infraestrutura (pontes) localizadas dentro do limite territorial de Santo Antônio de Pádua, também são consideradas duas outras pontes situadas no trecho do rio Pomba compreendido entre a represa e a referida cidade, mais especificamente, nos distritos de Cisneiros e Itapiruçu, respectivamente, os quais pertencem ao município de Palma, estado de Minas Gerais. Tais regiões são identificadas por ZIDs, conforme descrito na Tabela 1.



Figura 19 – Pontes localizadas na zona urbana de Santo Antônio de Pádua.

Fonte: Adaptado de ENGECORPS (2012).

Tabela 1 – Relação das pontes situadas entre a represa e a cidade de Santo Antônio de Pádua.

| Descrição da Ponte     | Cidade                    | ZID |
|------------------------|---------------------------|-----|
| Cisneiros              | Palma-MG                  | 3   |
| Itapiruçu              | Palma-MG                  | 4   |
| Paraoquena-Campelo     | Santo Antônio de Pádua-RJ | 11  |
| Badih Chicralla        | Santo Antônio de Pádua-RJ | 17  |
| Alberíades Gabry       | Santo Antônio de Pádua-RJ | 17  |
| Abel da Silva Malafaia | Santo Antônio de Pádua-RJ | 17  |
| Raul de Moraes Veiga   | Santo Antônio de Pádua-RJ | 17  |
| Paulino Padilha        | Santo Antônio de Pádua-RJ | 17  |

Fonte: A Autora (2022).

Na Figura 20 é mostrada região referente à ZID 3, na qual encontra-se a ponte no distrito de Cisneiros. Já na Figura 21 é caracterizada a região relacionada à ZID 4, onde está o distrito de Itapiruçu. Por outro lado, na Figura 22 tem-se o distrito de Paraoquena (ZID 11). As pontes localizadas na zona urbana de Santo Antônio de Pádua encontram-se caracterizadas na Figura 23 (ZID 17).



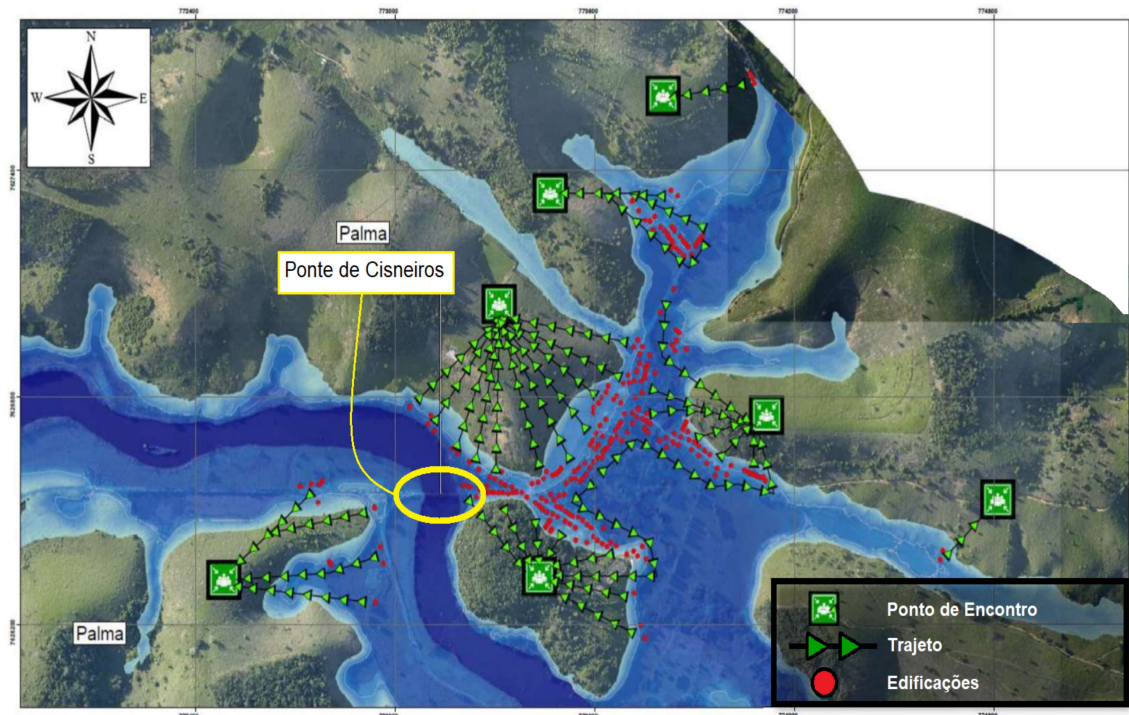


Figura 20 – Identificação da ZID 3 (Palma), onde está localizado o distrito de Cisneiros.  
Fonte: Adaptado de Cestari (2020).

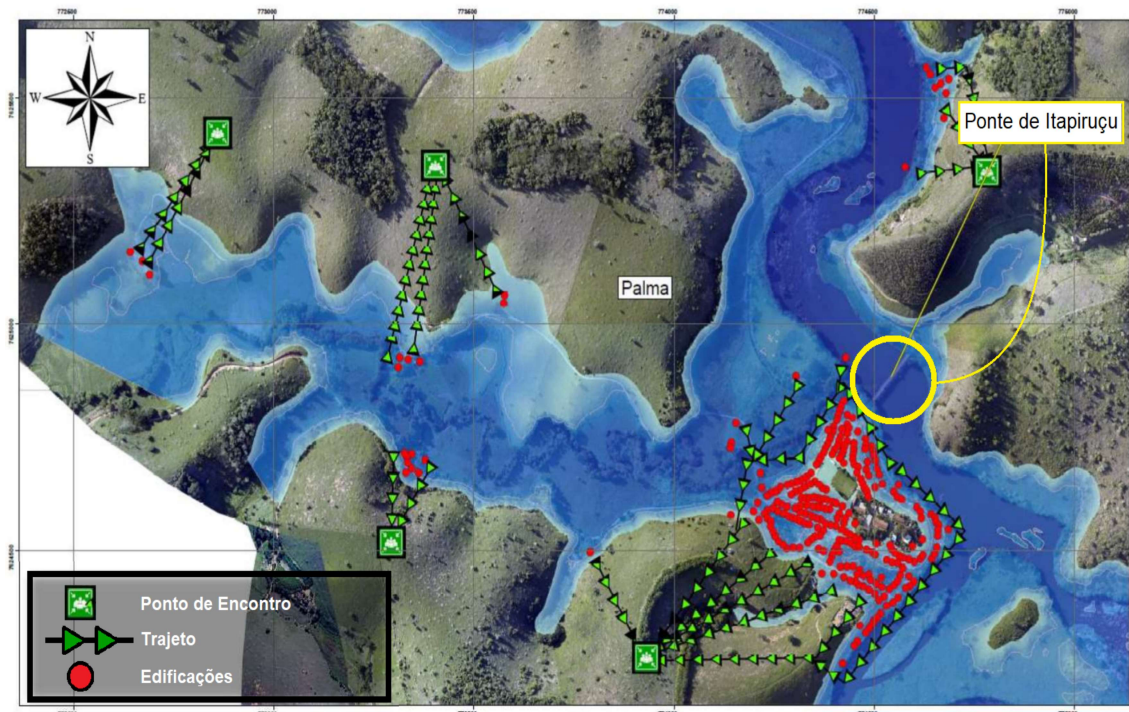


Figura 21 – Identificação da ZID 4 (Palma), onde está localizado o distrito de Itapiruçu.  
Fonte: Adaptado de Cestari (2020).



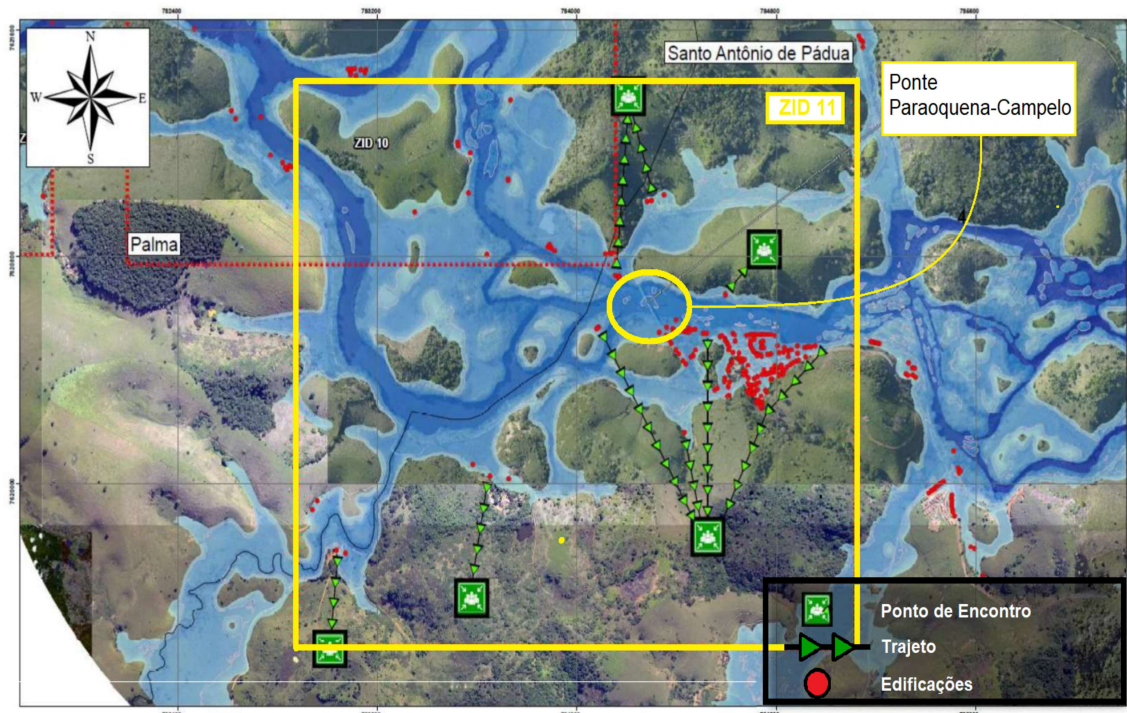


Figura 22 – Identificação da ZID 11 em Santo Antônio de Pádua, onde está localizado o distrito de Paraoquena.

Fonte: Adaptado de Cestari (2020).

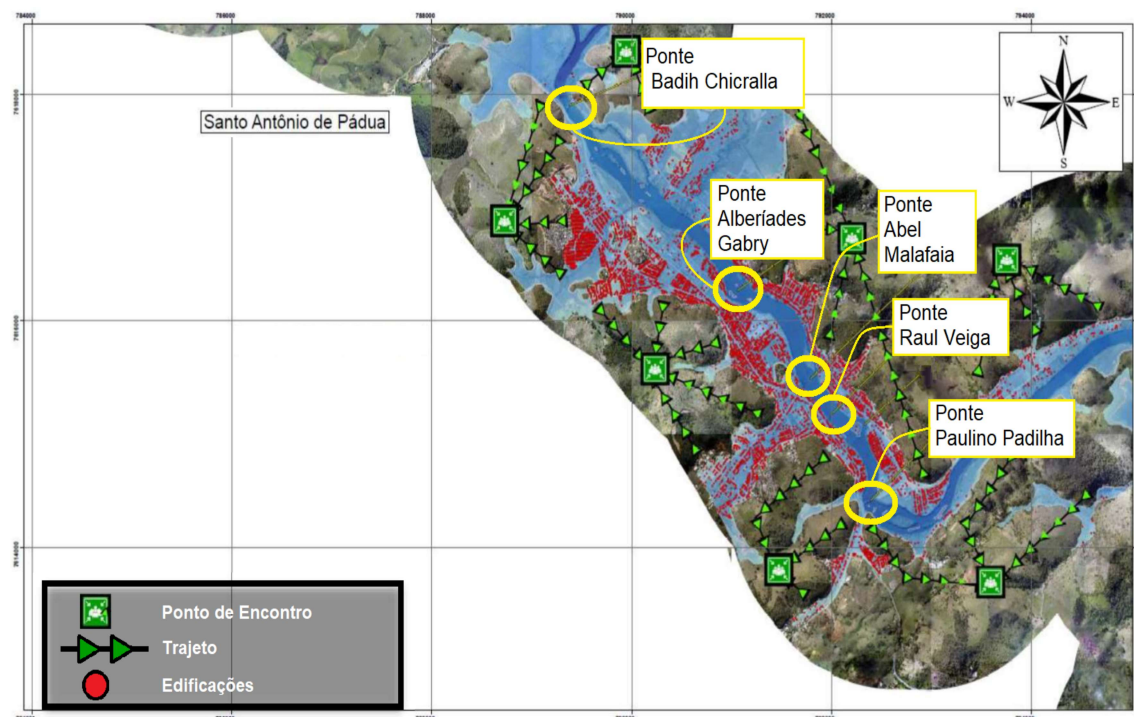


Figura 23 – Identificação da ZID 17, onde está localizada a zona urbana de Santo Antônio de Pádua.

Fonte: Adaptado de Cestari (2020).



Em particular, este estudo tem como base o trabalho de Daru et al. (2013), no qual são analisados diversos cenários envolvendo o rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna, sendo consideradas, pelo referido autor, sete dentre as oito pontes apresentadas na Tabela 1 (desconsiderada a ponte Alberíades Gabry). As informações referentes às pontes usadas como referência por Daru et al. (2013) são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Informações referentes às pontes construídas sobre o rio Pomba utilizadas no estudo de Daru et al. (2013).

| Número da Ponte | Nome da Ponte          | Distância da Barragem ( <i>km</i> ) | Localização (UTM WGS84 23S) |
|-----------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Ponte 01        | Cisneiros              | 5,974                               | 773143,403; 7626548,468     |
| Ponte 02        | Itapiruçu              | 8,954                               | 774530,326; 7624890,031     |
| Ponte 03        | Paraoquena-Campelo     | 23,360                              | 784268,138; 7620655,88      |
| Ponte 04        | Badih Cricalla         | 31,407                              | 789371,786; 7617911,681     |
| Ponte 05        | Abel da Silva Malafaia | 34,929                              | 791782,059; 7615496,07      |
| Ponte 06        | Raul de Moraes Veiga   | 35,305                              | 792016,947; 7615189,114     |
| Ponte 07        | Paulino Padilha        | 36,252                              | 792395,971; 7614420,389     |

Fonte: A Autora (2022).

Apesar das informações dispostas na Tabela 2 incluírem a Ponte 05 (Abel da Silva Malafaia), neste trabalho, a mesma será desconsiderada, uma vez que encontra-se muito próxima à Ponte 06, bem como não permite o fluxo de veículos.

## 4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E SOLUÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Como já citado, o objetivo desse trabalho consiste em analisar o rompimento hipotético da barragem da UHE Barra de Braúna utilizando o software IBER, com o estudo de caso voltado para Santo Antônio de Pádua, município do estado do Rio de Janeiro. Para essa finalidade, nessa seção são abordadas as equações de Saint Venant e respectiva metodologia para a solução da mesma.

A utilização das equações de Saint Venant se torna imprescindível quando há uma gama de problemas relacionadas à engenharia ambiental. Por isso, justifica-se o seu estudo a fim de antever fenômenos ambientais que se tornam catastróficos, assim que barragens, portos ou comportas são construídos (SILVA, 2019).

### 4.1 Modelagem Matemática do Problema Proposto

A melhor forma de compreender o processo de escoamento superficial em bacias e rios é analisar os cenários de intervenção, prever vazões, dentre outros fatores. Esses estudos são indispensáveis, por exemplo, na verificação das inundações e estiagens.

O meio pelo qual a água se movimenta, pode ser representado por cálculos matemáticos, utilizando abordagens uni, bi ou tridimensionais. Segundo Silva (2019), a modelagem hidrodinâmica iniciou-se há mais de 240 anos, através das pesquisas dos franceses Laplace e Lagrange, entre os anos de 1775 e 1781. Mas, conforme Ferreira, Fernandes e Kaviski (2016), foi no ano de 1871 que o tratamento matemático de escoamentos transientes em canais abertos se efetivou, por meio de duas equações diferenciais parciais desenvolvidas por Barré de Saint Venant, divulgadas na Academia de Ciência da França, com o título "Teoria do fluxo de água instável, com aplicação a inundações do rio e à propagação das marés nos canais dos rios".

Nesse sentido, a propagação da vazão em cursos d'água é, de modo geral, caracterizada através de um grupo de duas equações, denominadas equações de Saint Venant, podendo também ser chamadas de equações de escoamento não permanente unidimensional (FAN; PONTES; PAIVA, 2014).

Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Silva (2019), onde são usadas as equações de Saint Venant unidimensionais a fim de analisar um canal retangular, para as seções da rede do rio, bem como sua largura superficial e assim, quantificar o impacto gerado na redução dos picos de cheia. Ele identificou, por meio da modelagem hidrológica, que na bacia do rio Ipojuca a vazão média apresentou  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ , sendo considerada baixa, uma vez que já havia atingido um pico de  $434 \text{ m}^3/\text{s}$  com as barragens em operação e,

depois atingiu um valor fluviométrico inferior a  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , onde aconteceram inundações, mostrando a vulnerabilidade da zona urbana do município de Caruaru em decorrência das inundações.

Por outro lado, Monteiro (2015) usa o modelo hidrodinâmico para representar a elevação da coluna d'água, bem como as intensidades das correntes nos cenários de período apresentando maior e menor pluviosidade no sistema estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim. Os resultados simulados mostraram que no período de grande pluviosidade a descarga fluvial controlou a intensidade das correntes. Já, quando o período encontrou-se com menor pluviosidade, houve uma significativa redução na descarga fluvial.

Além disso, Simões et al. (2015) enfatizam que as equações de Saint Venant são utilizadas em sua forma unidimensional a fim de prever enchentes e inundações, com destaque para o comportamento de ondas de cheias nos canais e rios e de correntes marítimas, formação de ressaltos hidráulicos, entre outros eventos. Eles analisaram os aspectos numéricos e físicos de soluções das equações de Saint Venant e observaram que em um canal horizontal que apresenta condições de entrada supercríticas, as profundidades são ditas como crescentes ao longo da distância  $x$ . Em contrapartida, quando a profundidade do escoamento supercrítico aumenta, a energia específica diminui.

De acordo com Steinstrasser (2005), as equações de Saint Venant são deduzidas por meio das equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento (*Momentum*), ambas aplicadas a um volume de controle, estabelecido dentro do fluido em movimento, mostrado na Figura 24. Em particular, a equação de *Momentum* é aquela que, no decorrer de todo o escoamento, representa a conservação da massa de líquido no conduto. Na Figura 25 é representado um volume de controle elementar, com ênfase ao balanço a partir do qual são derivadas as equações da Continuidade e *Momentum*, onde  $x$  refere-se à medida ao longo do canal.

Tomando como base a Figura 25, no volume de controle de comprimento  $\Delta x$ , quando decorrido em sua extensão, o fluxo é dado por  $Q(x, t)$  e a área de fluxo total por  $A$ . Assim, a taxa de variação temporal é representada por meio da Equação (4.1).

$$\frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (4.1)$$

Para o volume de controle, as taxas de entrada e saída são representadas, respectivamente, por meio das Equações (4.2) e (4.3).

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \text{ (entrada)} \quad (4.2)$$

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \text{ (saída)} \quad (4.3)$$

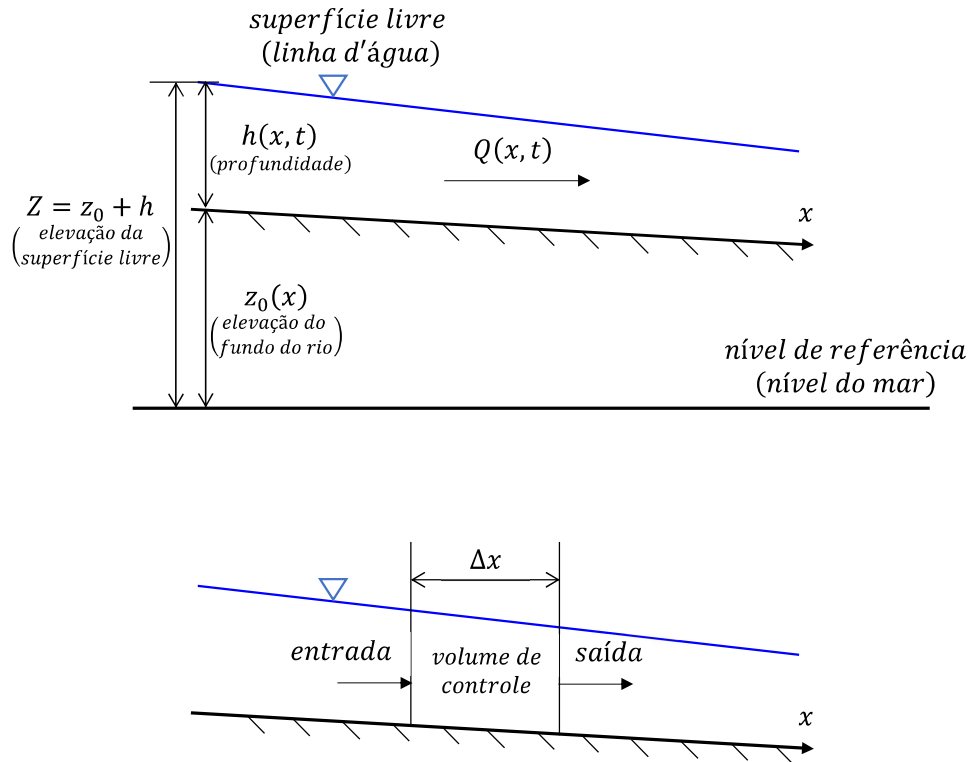


Figura 24 – Volume de controle elementar dentro de um fluido em movimento.  
Fonte: A Autora (2022).

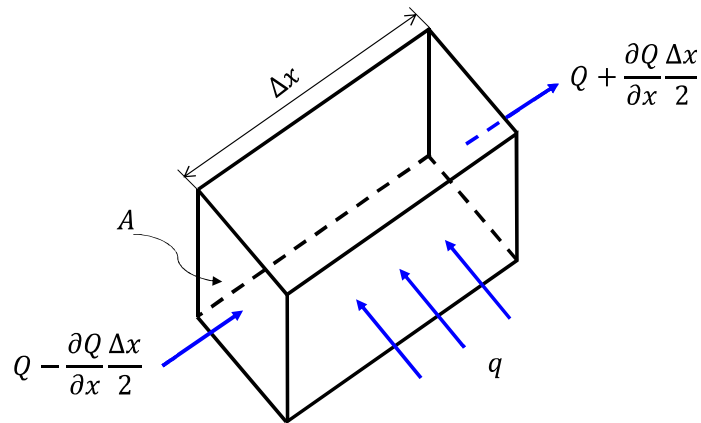


Figura 25 – Volume de controle a partir do qual são derivadas as equações da Continuidade e *Momentum*.

Fonte: A Autora (2022).

Assim, considerando  $\Delta x$  um valor pequeno, é possível caracterizar o balanço de massa, ou seja, a taxa de variação da massa no volume de controle ao longo do tempo, como sendo a diferença entre a massa que entrou na face esquerda do volume e a massa que saiu na face direita do mesmo, acrescida da entrada lateral, conforme expresso na

Equação (4.4):

$$\rho \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x = \rho \left[ \left( Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + q \right] \quad (4.4)$$

onde  $q$  é o fluxo entrando pela lateral do volume de controle (de comprimento  $\Delta x$ ) e  $\rho$  é a densidade do fluido.

Dividindo a Equação (4.4) por  $\rho \Delta x$  e reorganizando os termos, tem-se a equação da Continuidade, expressa conforme Equação (4.5):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (4.5)$$

onde  $q_l$  refere-se à entrada lateral por unidade de área, ou seja,  $q_l = q/\rho \Delta x$ .

Por outro lado, a conservação do movimento para um volume de controle afirma que a taxa de acúmulo de movimento em um dado instante de tempo é igual à taxa de movimento líquido que entra no volume mais a soma de todas as forças externas agindo sobre o mesmo (STEINSTRASSER, 2005). Neste balanço, três forças são levadas em consideração: pressão (total e efetiva), gravidade e força de atrito (IBER, 2014).

Sendo assim, uma vez que o movimento do fluxo no volume de controle é dado por  $\rho Q \Delta x$ , a taxa de acúmulo do mesmo ao longo do tempo é representada pela Equação (4.6).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (4.6)$$

Já, os fluxos de entrada e de saída do volume de controle são descritos a partir das Equações (4.7) e (4.8):

$$\rho \left[ uQ - \frac{\partial(uQ)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] (\text{entrada}) \quad (4.7)$$

$$\rho \left[ uQ + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] (\text{saída}) \quad (4.8)$$

onde  $u$  é a velocidade.

Logo, a taxa de movimento líquida que adentra ao volume de controle, com base nas Equações (4.7) e (4.8), é representada conforme a Equação (4.9).

$$-\rho \frac{\partial(uQ)}{\partial x} \Delta x = \rho \left[ uQ - \frac{\partial(uQ)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] - \rho \left[ uQ + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (4.9)$$

No que se refere à força de pressão, um aspecto de suma importância está relacionado à área de cada uma das faces do volume de controle, uma vez que essa área é dependente da altura da linha de água  $h$ , perpendicular ao eixo do canal, a qual leva em consideração o tempo  $t$  e a distância  $x$ , como representado na Figura 26.

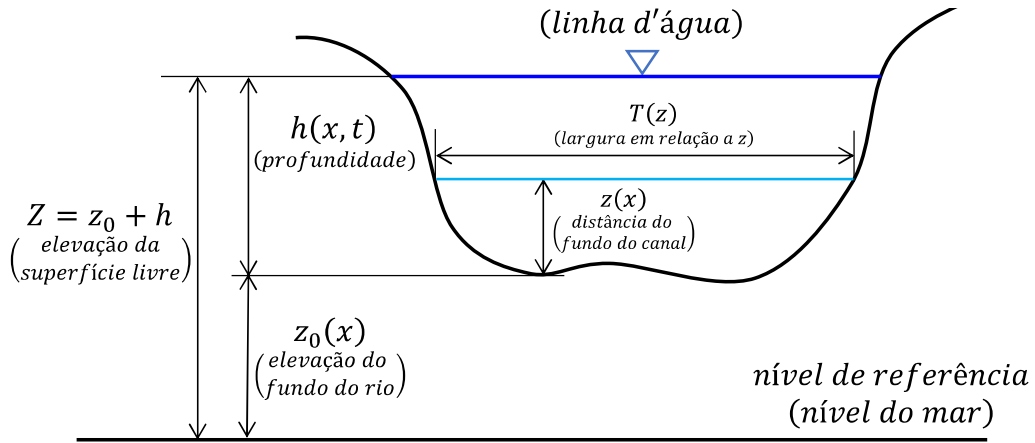


Figura 26 – Seção transversal da rede de drenagem.

Fonte: A Autora (2022).

Tomando como referência o esboço apresentado na Figura 26, pode-se definir a força de pressão total como sendo a integral do produto da área de pressão no decorrer da seção transversal, sendo descrita conforme a Equação (4.10):

$$F_p = \int_0^h \rho g (h - z) T(z) dz \quad (4.10)$$

onde  $h$  refere-se à profundidade,  $z$  à distância em relação ao fundo do canal, e  $T(z)$  à função destinada à largura da seção transversal referente à distância  $z$  sobre o canal.

Daí, levando em consideração a pressão total e a pressão exercida pelas margens do rio, a pressão efetiva é descrita de acordo com a Equação (4.11):

$$F_{Pn} = -\rho g \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (4.11)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade.

Em contrapartida, no volume de controle, a força da gravidade sobre o líquido é dada por meio da Equação (4.12):

$$F_g = \rho g A \sin \theta \Delta x \quad (4.12)$$

onde  $\theta$  refere-se ao ângulo de inclinação do fundo do canal.

Em relação aos rios naturais, o valor de  $\theta$  é pequeno e, assim, o valor de  $\sin\theta$  pode ser aproximado pelo valor de  $\tan\theta$ , conforme a Equação (4.13):

$$\sin\theta \approx \tan\theta = -\frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (4.13)$$

onde  $z_0$  refere-se à elevação do fundo do rio.

Logo, substituindo a Equação (4.13) na Equação (4.12), a força gravitacional pode ser descrita de acordo com a Equação (4.14).

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x \quad (4.14)$$

Por fim, a força de atrito, também chamada de força de arrasto no contorno, é descrita conforme a Equação (4.15):

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad (4.15)$$

onde  $S_f$  refere-se ao atrito, o qual é positivo no momento em que o fluxo encontra-se na direção  $x$  positiva.

Cabe ressaltar, que o atrito precisa estar relacionado ao fluxo e ao fundo. Por isso, são utilizadas as equações de atrito de Manning, a qual é representada conforme a Equação (4.16):

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (4.16)$$

em que  $R$  refere-se ao raio hidráulico, ou seja,  $R = A/P$ , sendo  $P$  o perímetro molhado e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Dessa maneira, tomando como referência o princípio da conservação do movimento, ou seja, a taxa de acúmulo de movimento em um dado instante de tempo, Equação (4.6), bem como a taxa de movimento líquido que entra no volume, Equação (4.9), e as três forças externas: pressão (Equação (4.11)), gravidade (Equação (4.14)) e atrito (Equação (4.15)), a equação do *Momentum*, é representada conforme na Equação (4.17).

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial Qu}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (4.17)$$

Simplificando (dividindo) a Equação (4.17) por  $\rho \Delta x$  e sabendo que  $Q = uA \Rightarrow u = Q/A$ , tem-se a Equação (4.18):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} = g A S_0 - g A S_f \quad (4.18)$$



onde:

$$S_0 = -\frac{\partial z_0}{\partial x}. \quad (4.19)$$

Desta forma, as equações de Saint Venant são definidas, simultaneamente, a partir das equações da Continuidade (Equação (4.5)) e da Quantidade de Movimento (Equação (4.18)).

Uma vez que  $A = Bh$ ,  $Q = uA$  e considerando  $q_l = 0$ , dividindo a Equação (4.5) por  $B$ , bem como a Equação (4.17) por  $A$ , as equações de Saint Venant podem ser representadas como nas Equações (4.20)-(4.21).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (4.21)$$

Já, quando os modelos hidrodinâmicos apresentam tensões e acelerações verticais negligenciadas independentemente do resultado, utilizam-se as equações de águas rasas (Saint Venant) bidimensionais, de modo simplificado, através das equações de Navier-Stokes, conforme Equações (4.22)-(4.24), conhecidas também por Equação da Continuidade, Equação Dinâmica na Direção  $x$  e Equação Dinâmica na Direção  $y$ , respectivamente,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_{0x} - S_{fx}) \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_{0y} - S_{fy}) \quad (4.24)$$

em que  $u$  refere-se à velocidade média do fluxo na direção  $x$ ,  $v$  à velocidade média do fluxo na direção  $y$ ,  $S_{0x}$  à declividade do canal da direção  $x$ ,  $S_{0y}$  à declividade do canal da direção  $y$ , e  $S_{fx}$  e  $S_{fy}$  à resistência da água, isto é, à perda de energia em relação ao atrito com o fundo do canal.

A linha de energia para o caso bidimensional, ou seja, nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, é decomposta conforme Equações (4.25)-(4.26):

$$S_{fx} = \frac{|V|un^2}{h^{4/3}} \quad (4.25)$$

$$S_{fy} = \frac{|V|vn^2}{h^{4/3}} \quad (4.26)$$

onde  $V$  é o módulo de velocidade total, representado conforme a Equação (4.27).

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.27)$$

## 4.2 Solução do Problema Proposto

O modelo matemático do escoamento superficial existente num rio se baseia na forma de prever alguns valores assumidos pelas variáveis hidráulicas, como por exemplo, as velocidades, o fluxo, dentre outros, através da solução numérica das equações que modelam o problema.

Para a solução do problema do rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna, o qual é modelado pelas equações de Saint Venant, é utilizado o software IBER, descrito na próxima seção (IBER, 2014).

### 4.2.1 O software IBER

Conforme exposto na Seção (4.1), a modelagem do escoamento superficial em um rio prevê os valores assumidos pelas variáveis hidráulicas, através da solução utilizando métodos numéricos obtidos por algumas equações numa sequência de hipóteses. Desse modo, para fins de estudo dessas equações, comumente, usa-se modelos unidimensionais ou bidimensionais.

Um dos esquemas numéricos mais utilizados na solução dos modelos matemáticos empregados, é o chamado Método das Diferenças Finitas (MDF), adotado em softwares como o Sobek, Mike-21 ou TufLOW 2D, limitando o cálculo das resoluções que adotam as descontinuidades e a flexibilidade da malha. Outros softwares usam o Método dos Elementos Finitos (MEF), os quais permitem maior flexibilidade na malha de cálculo no momento em que as malhas não estruturadas são trabalhadas (IBER, 2014).

Em particular, nessa pesquisa, é utilizado o software IBER, o qual tem como base um modelo matemático dado pelas equações de Saint Venant usado para simular o fluxo em rios e regiões estuarinas, fruto do trabalho do Grupo de Água e Engenharia Ambiental (GEAM); Instituto Flumen, pertencente à Universidade Politécnica de Catalunha; e Grupo de Engenharia Matemática, da Universidade de Santiago de Compostela. Este software encontra-se disponível para download no site [www.iberaula.es](http://www.iberaula.es).

Segundo Magro (2018), no IBER, o módulo hidrodinâmico resolve as equações de Saint Venant de forma bidimensional, representadas simplificadamente pelas Equações (4.22)-(4.24), a fim de agregar os efeitos das velocidades, ventos, vazão, entre outros, ambos

devido à solução a partir dos métodos numéricos que utilizam equações com base numa gama de hipóteses.

Na solução numérica presente no software IBER é usada a esquematização baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF) de modo bidimensional no domínio físico, possibilitando a integração do modelo digital do terreno, bem como a construção da malha de cálculo. Trata-se de um modelo que trabalha sobre uma malha não estruturada de volumes finitos, resolvendo as equações de Saint Venant de forma bidimensional.

O MVF apresenta propriedades conservativas. Sendo assim, seu emprego se torna muito usual no momento em que a solução numérica para as equações de Saint Venant são obtidas, visto que estas, independentemente das irregularidades do domínio e da topografia de fundo do curso d'água, fornecem as componentes da velocidade num fluxo transiente e a altura da coluna de água.

Segundo Sartori (2018), o IBER é um modelo que simula o fluxo turbulento, de superfície livre, em escoamento não permanente. Dentre alguns de seus campos de aplicação estão: ruptura de barragens; avaliação das zonas de inundação; cálculo hidráulico das redes de canais e de canalização; fluxo de marés em estuários; transporte de sedimentos; qualidade da água; dentre outros.

A composição do modelo IBER baseia-se em diferentes módulos ligados uns aos outros, como por exemplo, o módulo hidrodinâmico, o qual determina características do escoamento, tais como a velocidade e a profundidade da água; módulo de turbulência; e módulo de transporte de sedimentos (CHARGEL, 2018).

### 4.3 Obtenção dos Dados da Região de Interesse

Nessa seção são apresentados os processos de aquisição dos dados necessários para a realização das simulações no software IBER.

#### 4.3.1 Dados Topográficos

Com o intuito de fornecer os dados topográficos por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas básicas derivações locais, o projeto TOPODATA foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tendo como base os dados da Missão Topográfica Radar Shuttle (do inglês *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM), sendo estes disponibilizados por meio do Serviço Geológico dos Estados Unidos (do inglês *United States Geological Survey* - USGS), na rede mundial de computadores.

O projeto TOPODATA estabelece os dados da topografia de uma determinada região, registrando a altimetria, ou seja, as cotas percebidas por satélite para o terreno sem considerar a presença de água, tomando como referência o nível do mar. Iniciou-se

em agosto de 2008, sendo processado de forma inspecionada e revisada, a fim de se obter correções e aprimoramento do mesmo.

Para que houvesse a expansão do TOPODATA, uma nova revisão dos produtos e processos foi necessária, o que gerou uma metodologia capaz de ser aplicada onde existam dados SRTM (ARASHIRO, 2006). O projeto TOPODATA está disponível através do site <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Na opção "Dados" são disponibilizados os tipos referentes às etapas de processamentos dos dados SRTM, como mostrado na Figura 27.

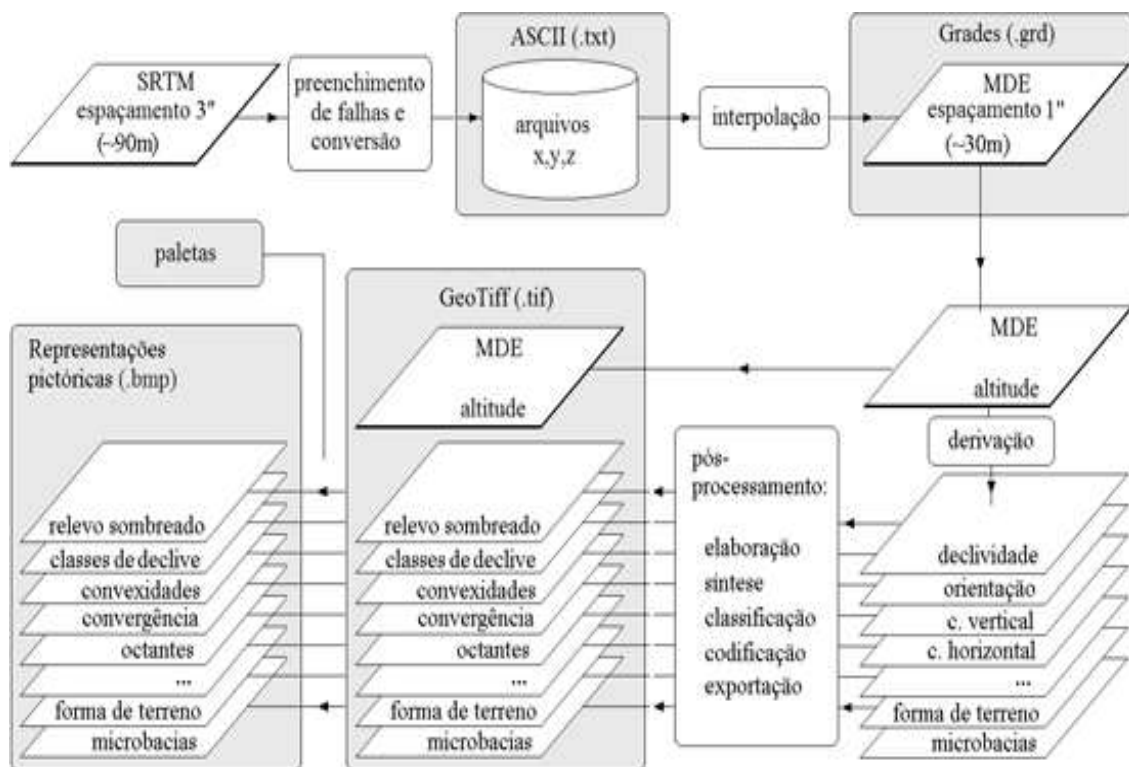


Figura 27 – Conjunto de arquivos do TOPODATA.

Fonte: TOPODATA (2022).

A opção "Acesso" representa todos os dados estruturados no formato de quadrículas, em conjunto com a articulação 1:250.000. Na atual versão, com dados disponíveis desde novembro de 2011, os arquivos são nomeados, para cada conjunto de uma mesma folha, conforme uma notação única. A identificação das folhas seguem o prefixo de 6 letras LAHLON, em que LA, H e LON são, respectivamente, a latitude do canto superior esquerdo, o hemisfério da posição e sua longitude na notação nn5, quando ela for nn graus e 30', e quando a coordenada for nn graus inteiros, é dada por nn\_. Na Figura 28 é mostrada a representação do território nacional em quadrículas.

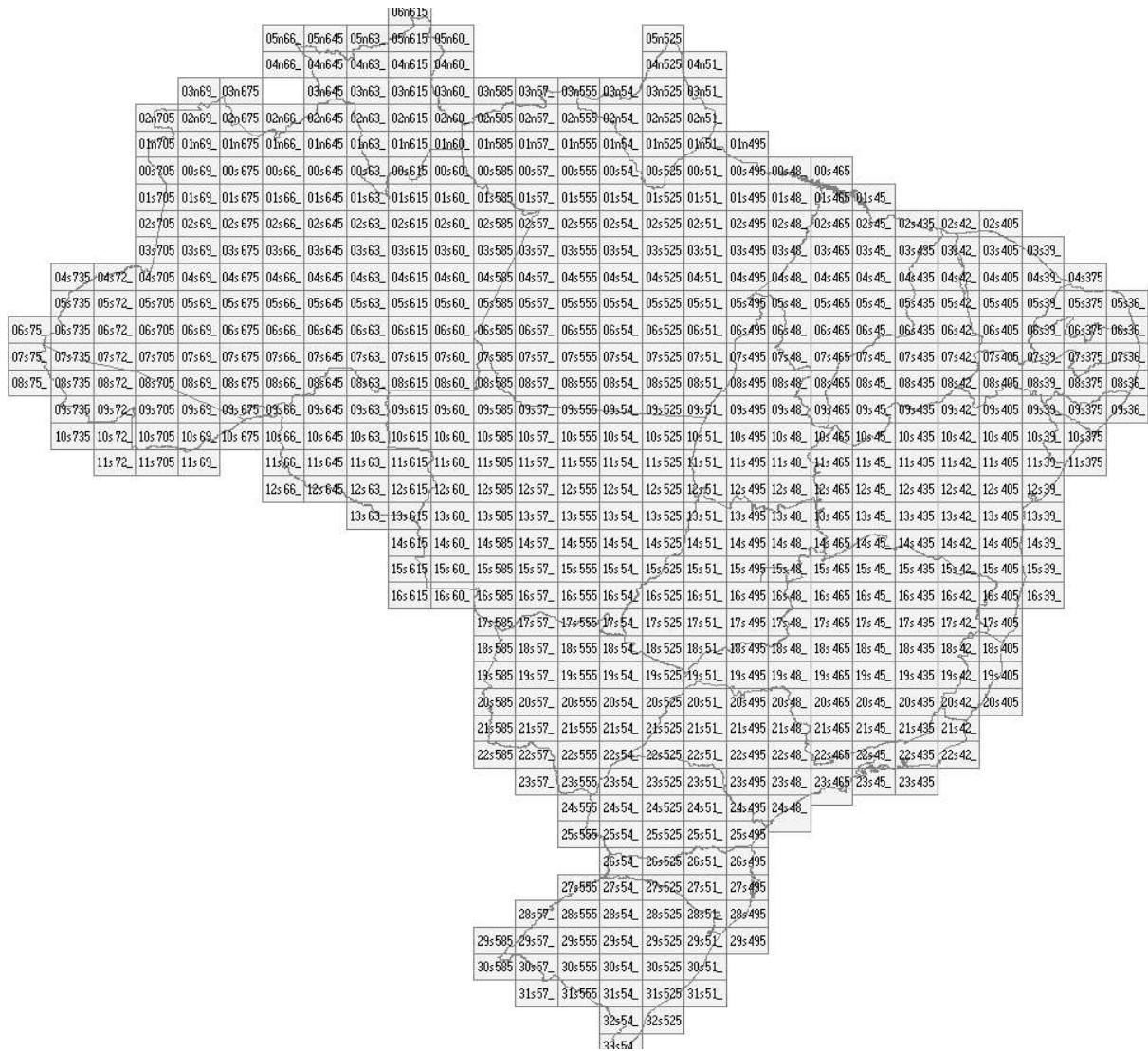


Figura 28 – Representação do território nacional em forma de quadrículas identificadas no formato LAHLON.

Fonte: TOPODATA (2022).

No que se refere aos dados de topografia para a região de interesse abordada nessa pesquisa, na Figura 29 é mostrada a área que engloba desde a nascente do rio Pomba, que se inicia na cidade Barbacena, no estado de Minas Gerais, até o seu deságue, no rio Paraíba do Sul, próxima à cidade de Itaocara, estado do Rio de Janeiro e, em particular, destacado em vermelho, a cidade de Santo Antônio de Pádua.

Cabe ressaltar que, para este trabalho, foram feitos pequenos ajustes nos dados de topografia que caracterizam o leito principal do rio Pomba, visto que ele, a jusante da barragem, possui uma profundidade da lâmina d'água pequena devido à presença de muitas pedras em seu curso.





Figura 29 – Região topográfica demarcada.  
Fonte: Adaptado de TOPODATA (2022).

#### 4.3.2 Dados Hidrometeorológicos

O Brasil é um país com grande extensão territorial, porém, os períodos de ocorrências das chuvas e estações de seca são bem definidos. Para isso, é importante o acompanhamento de todas as formas de chuva, realizando a gestão eficiente dos reservatórios, a fim de que os mesmos garantam que haja recursos hídricos, mesmo em épocas mais secas.

Nesse sentido, Sousa et al. (2012) definem o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) como a Política Nacional de Recursos Hídricos, inscrito na Lei nº 9433/1997, que coleta, trata, armazena e recupera todos os recursos hídricos. Conforme a lei citada, os princípios básicos que regem o seu funcionamento são a unificação coordenada do sistema, a descentralização da produção e obtenção dos dados, e seu acesso a toda a sociedade. Além disso, essa lei dispõe de objetivos, como por exemplo: reunir e divulgar todos os dados a respeito da situação dos recursos hídricos no Brasil; dispor de subsídios a fim de elaborar os Planos de Recursos Hídricos; e atualizar, de modo permanente, informações sobre os recursos hídricos existentes no território nacional.

Há dois bancos de dados ambientais de suma importância, no Brasil: o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) e o Portal Hidroweb, mantido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Todos eles são de livre acesso e gratuito (ROSSETTI, 2008).

Por outro lado, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) retrata, em seu primeiro artigo, que a ANA tem por incumbências articular com as entidades e órgãos federais atribuições relacionadas à gestão de recursos hídricos, a fim de informar a todos sobre a rede hidrométrica nacional, sistemas de avaliação e concessão de recursos hídricos, sistemas de informação sobre saúde, dentre outros fatores. Em outras palavras, a ANA promove a coordenação de atividades que se desenvolvem no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH). Conforme Sousa et al. (2012), é de responsabilidade da ANA os dados hidrológicos, onde os mesmos são disponibilizados e publicados através do aplicativo Hidroweb e do portal SNIRH.

Por meio do aplicativo do Hidroweb, é possível selecionar as estações de interesse, sendo que cada uma delas apresenta um período diferente de funcionamento; os dados hidrológicos, bem como fazer download dos mesmos nos formatos do Access (.mbd), texto (.txt) e planilha eletrônica (.csv).

O site da ANA tem por incumbência a criação de condições técnicas para atuar de modo preventivo no direito do uso dos recursos hídricos, bem como a fiscalização e a cobrança dos mesmos, a fim de buscar soluções para dois dos grandes problemas do país, que são a poluição dos rios e as secas extensas, em determinadas áreas do território nacional (ROSSETTI, 2008).

Desse modo, como forma de analisar esse acontecimento, faz-se necessário dispor-se de aplicativos, a fim de se obter uma boa interação com o usuário, visualização geográfica das informações, facilidade de uso, dentre outros fatores. O aplicativo Hidroweb v3.1.1 apresenta a Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR), que opera com tecnologia de última geração, para promover dados confiáveis, na busca da proteção da vida e no avanço da pesquisa científica no país. Além disso, o referido aplicativo possui, como características, as abas legendas, medidas, compartilhamento, mesa de atributos, galeria da base de mapas, inquerimento e selecionar, encontradas no formato inglês.

Ao selecionar uma estação de interesse é possível verificar o código, a bacia, a sub-bacia, o rio, o estado, o município, o responsável, a operadora e o tipo estação. Quando há dados telemétricos disponíveis, é possível definir o período inicial e o período final da ocorrência, não podendo ser superior a 90 dias.

Em particular na região situada entre a barragem da UHE Barra do Braúna e a cidade de Santo Antônio de Pádua, há quinze estações, as quais dispõem de dados convencionais e/ou telemétricas, conforme demarcado na Figura 30.

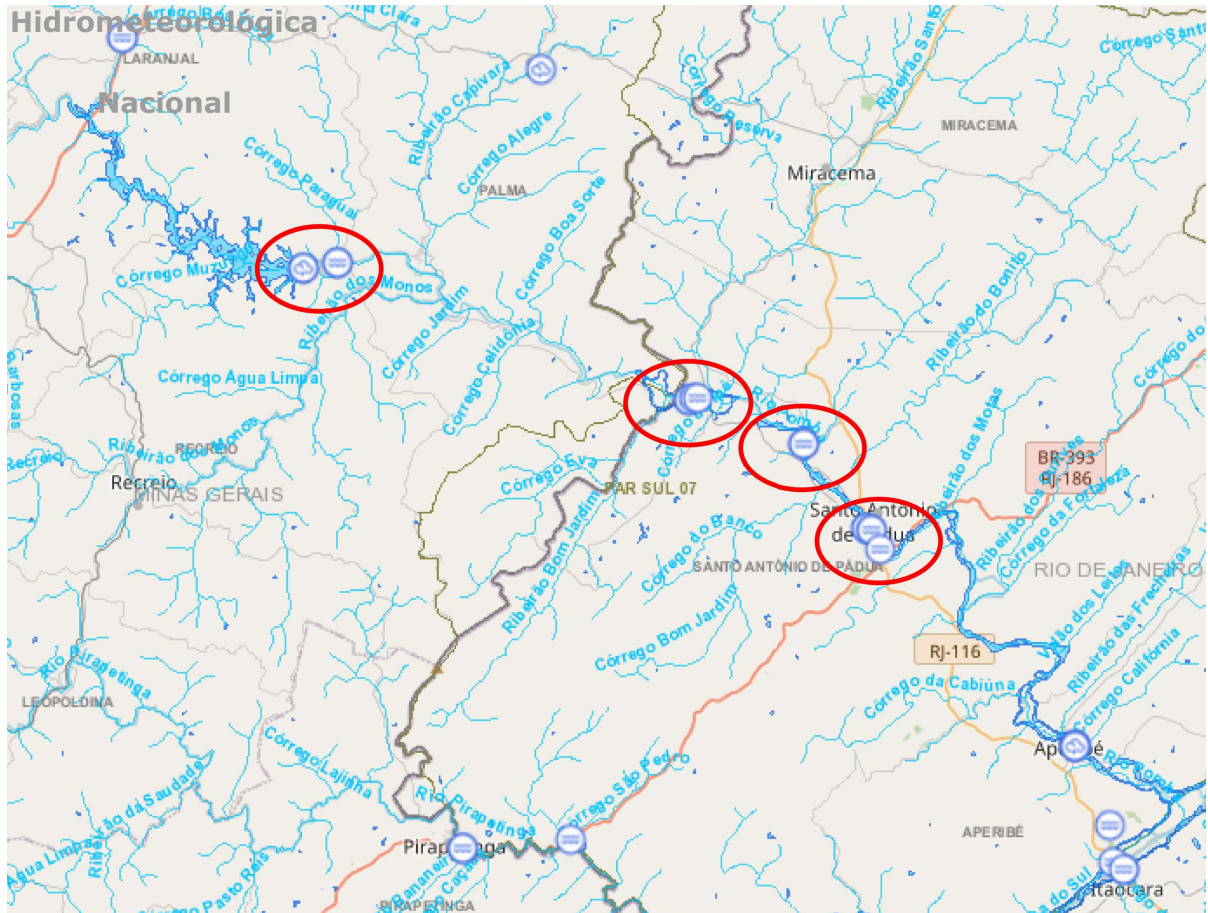


Figura 30 – Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) na região situada entre a barragem da UHE Barra do Braúna e a cidade de Santo Antônio de Pádua.

Fonte: A Autora (2022).

Neste trabalho, como forma de calibrar e validar o modelo desenvolvido no software IBER, foram utilizados dados de duas estações de monitoramento fluviométrico localizadas a jusante da UHE Barra do Braúna, sendo o período abordado entre o dia 24 de janeiro de 2020 a 28 de janeiro de 2020:

- Estação 58788600: localizada próximo à barragem e utilizada como condição de contorno (dado de entrada) no modelo;
- Estação 58774000: localizada próximo à zona urbanizada de Santo Antônio de Pádua, de operacionalização do INEA, e utilizada para comparação com os resultados numéricos obtidos por meio das simulações no software IBER.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos com o software IBER para simulações hidrodinâmicas, utilizando as equações de Saint Venant como modelo matemático para o problema de uma ruptura hipotética na barragem da UHE Barra do Braúna.

Várias simulações foram realizadas com as variações dos parâmetros estabelecidos a fim de ajustar e validar o modelo desenvolvido com base no software IBER. Todos os resultados foram gerados em um computador com processador Intel Core i5-13500 2.5 GHz com 6 GB de memória RAM DDR5.

### 5.1 Determinação da Simulação Base Referente à Área de Estudo

Em um primeiro momento, foi definida uma simulação tomada como referência para realizar alguns testes preliminares quanto à melhor configuração a ser utilizada no modelo com o intuito de representar de forma mais fidedigna a região de interesse. Nesse sentido, as informações necessárias à simulação da formação da brecha de ruptura foram retiradas de Daru et al. (2013).

Basicamente, o processo de elaboração de uma simulação no software IBER, segue as seguintes etapas:

- Construção da geometria, tendo como base uma imagem de fundo da área de estudos (ortofoto georreferenciada) e criação de polígonos delimitadores da região;
- Atribuição das condições de contorno e iniciais do problema;
- Atribuição dos coeficientes de rugosidade de acordo com o uso do solo;
- Determinação do tamanho dos elementos e posterior geração da malha de cálculo;
- Associação dos dados de topografia da região de interesse aos elementos da malha construída;
- Definição das características da brecha de ruptura da barragem;
- Dados do período de simulação e consequente processamento (execução) da mesma;
- Análise dos resultados obtidos (etapa de pós-processamento).

Assim sendo, foi delimitada a região de estudos, a qual se estende desde o reservatório da UHE Barra do Braúna até a cidade de Santo Antônio de Pádua. Para isso, um arquivo

como imagem de fundo, no formato ".jpg" foi carregado na IBER (*View » Background image » Real size...*), com o mapa georreferenciado inserido em coordenadas UTM métricas. Com base nesse mapa, foi realizada a marcação da área de estudo, por meio da construção de linhas que delimitam polígonos, construídos com base em uma investigação visual das imagens e informações topográficas, formando superfícies, de forma a caracterizar melhor a região. Nas Figuras 31(a)–31(d) são mostradas a região de estudos, bem como a localização da barragem e cidade de Santo Antônio de Pádua, seguida pelas superfícies construídas.



(a) Área de estudo.



(b) Barragem.



(c) Santo Antônio de Pádua.



(d) Superfícies construídas.

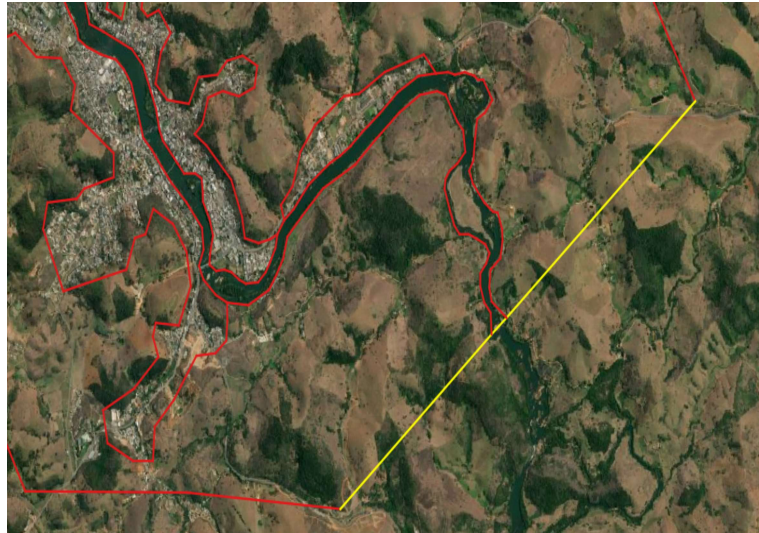
Figura 31 – Região de estudos, bem como a localização da barragem e cidade de Santo Antônio de Pádua, seguida pelas superfícies construídas.

Fonte: A Autora (2022).

A próxima etapa foi inserir as condições de contorno e a parte hidrodinâmica. Como neste trabalho o intuito é analisar a onda de cheia oriunda do volume d'água presente no reservatório da UHE Barra do Braúna, frente ao rompimento de sua barragem, não foram consideradas condições de contorno de entrada, sendo definida apenas uma condição de

saída localizada no contorno à jusante à cidade de Santo Antônio de Pádua.

Além disso, devido às características das simulações realizadas, foi considerada, como condição inicial, uma elevação do nível d'água no reservatório igual a  $154,5\text{ m}$ , em relação ao nível do mar, enquanto às demais superfícies foi atribuída profundidade  $0\text{ m}$ , uma vez que, em períodos de seca, o rio Pomba, nessa região, apresenta profundidade baixa. Nas Figuras 32(a)–32(b), são mostradas as condições inseridas no modelo.



(a) Condição de contorno de saída.



(b) Condição inicial.

Figura 32 – Caracterização das condições de contorno e inicial para a região de estudos.  
Fonte: A Autora (2022).



Na sequência, foram inseridas as informações sobre o coeficiente de rugosidade de acordo com o uso do solo na área de estudos. Para essa etapa, foram considerados cinco tipos de regiões, a saber: reservatório, barragem, rio, planície e área urbanizada. Às superfícies que caracterizavam o reservatório, barragem e rio, foi atribuído o valor de  $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$  para o coeficiente de rugosidade de Manning, enquanto às superfícies que representavam planície e área urbanizada, atribuiu-se os valores de  $0,050 \text{ s/m}^{1/3}$  e  $0,150 \text{ s/m}^{1/3}$ , respectivamente. Na Figura 33 são mostradas as superfícies (em representação 2D, sem dados de topografia) consideradas nesse trabalho, bem como os respectivos coeficientes de rugosidade de Manning.

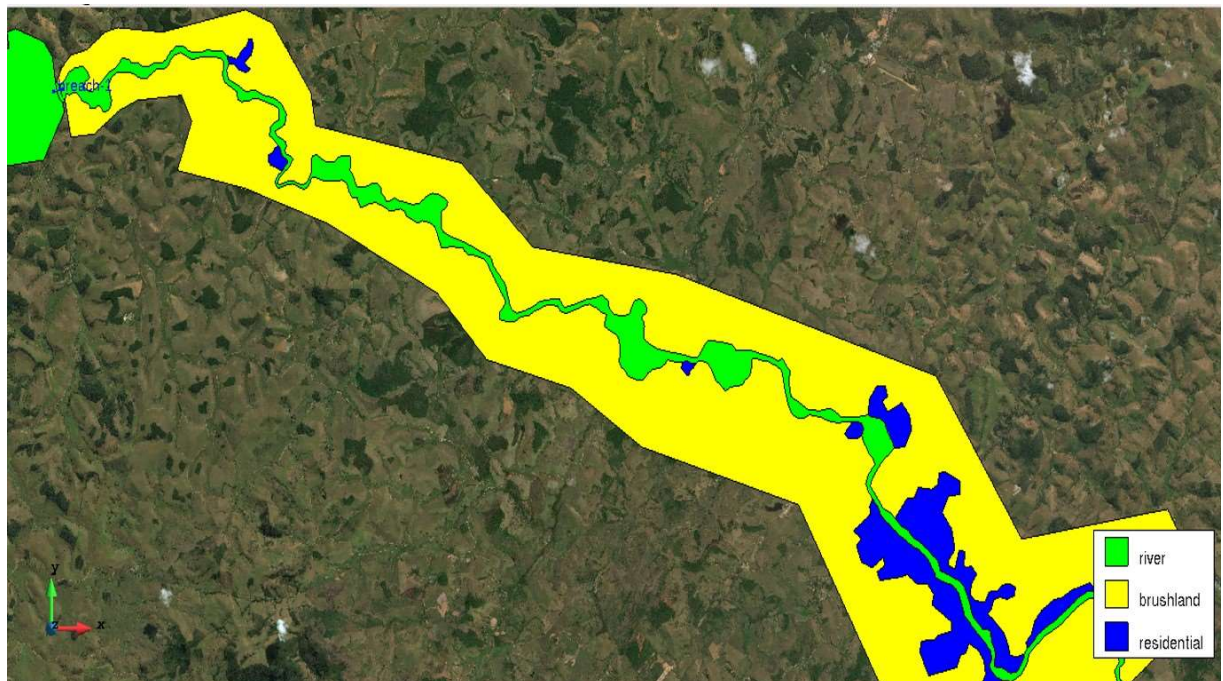


Figura 33 – Caracterização das superfícies da região de estudos de acordo com o uso e ocupação do solo.

Fonte: A Autora (2022).

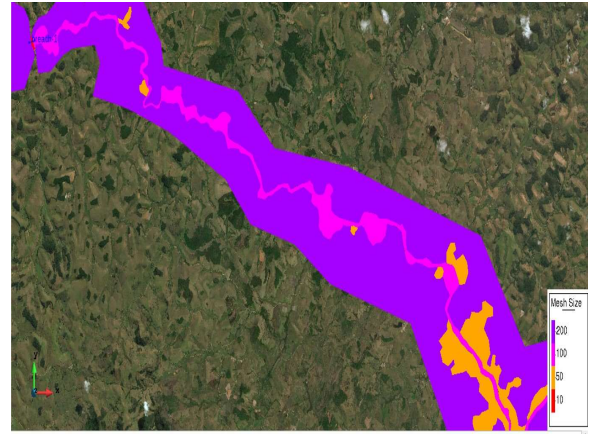
Após a atribuição do coeficiente de rugosidade para cada uma das superfícies da região de estudo, deve-se definir a característica dos elementos de cada superfície para, posteriormente, realizar a construção da malha computacional. Neste trabalho, é utilizada uma malha não estruturada com elementos triangulares, pois ela permite uma maior flexibilidade para se ajustar às superfícies, a fim de utilizar o menor ângulo possível, bem como às elevações.

Nessa simulação base, em particular, no reservatório e planície foram utilizados elementos triangulares de tamanho  $200 \text{ m}$ , enquanto no rio adotou-se elementos de tamanho igual a  $100 \text{ m}$ , seguido da área urbanizada e barragem, com elementos de tamanho iguais  $50 \text{ m}$  e  $10 \text{ m}$ , respectivamente. Com isso, o modelo apresentará cerca de 25.026 elementos. Também é possível identificar o tamanho dos elementos da malha a partir dos comandos

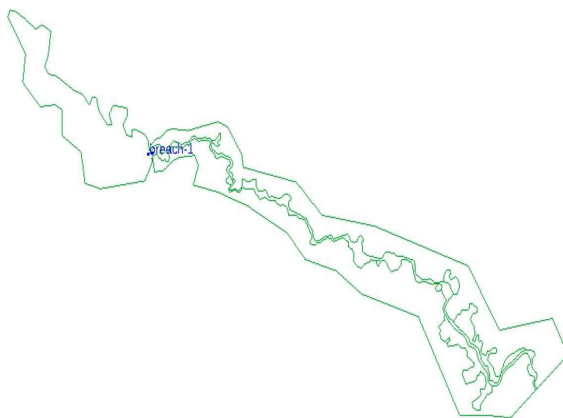
*Mesh » Draw » Sizes » Surfaces*. Nas Figuras 34(a)–34(d) são representadas as superfícies e seus respectivos elementos, bem como a malha gerada.



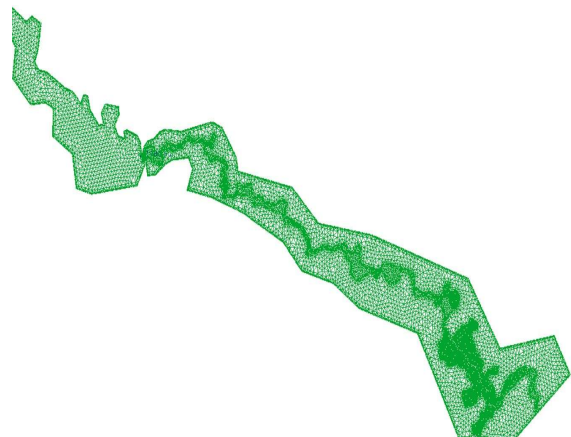
(a) Superfícies.



(b) Tamanho dos elementos.



(c) Superfícies sem a ortofoto de fundo.



(d) Malha gerada.

Figura 34 – Representação das superfícies e seus respectivos elementos, bem como a malha gerada.

Fonte: A Autora (2022).

Após a geração da malha, é carregado o arquivo em formato ASCII, que apresenta os dados de elevação topográfica da região analisada, contendo as informações de sua elevação, conforme mostrado na Figura 35.

Por fim, torna-se necessário inserir os dados referentes à ruptura hipotética da barragem analisada. O software IBER possui uma ferramenta própria com objetivo de introduzir os parâmetros de ruptura. Com ela, uma deformação na malha é feita e a brecha é formada, bastando estabelecer um ponto a montante e outro a jusante da barragem e assim, fazer com que a água saia através da passagem.





Figura 35 – Malha 3D contendo os dados de topografia da região de interesse.  
Fonte: A Autora (2022).

Os parâmetros de ruptura são inseridos através do caminho *Data » Breach » Breach Definition...*, os quais tiveram como base os dados descritos por Daru et al. (2013). Para essa simulação, foi considerado como tempo inicial do processo o instante 0 s, assim como o instante para começar a formação da brecha de ruptura na barragem. Já a ruptura total (final) ocorreu com 3.600 s após o início de sua formação, ou seja, no instante de tempo de 3.600 s (1 hora), sendo sua geometria definida com largura média de 91,5 m. Na Figura 36 é representada a posição da ruptura a ser simulada.



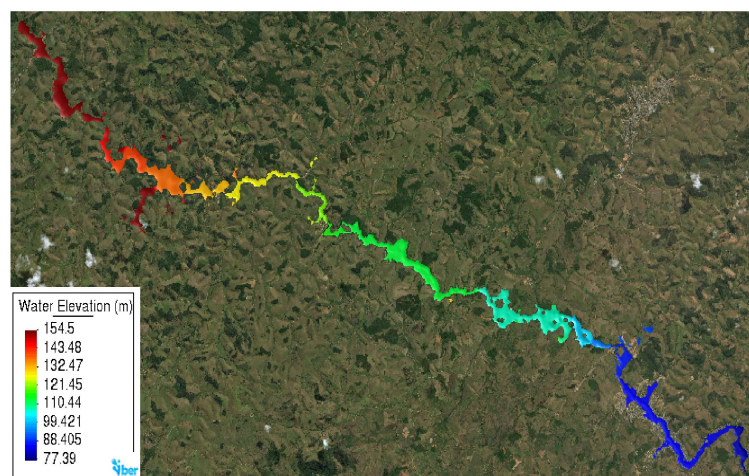
Figura 36 – Posição da ruptura inserida.  
Fonte: A Autora (2022).

Finalizada toda a etapa de pré-processamento dos dados, executa-se o modelo. Para isso, foi realizada uma simulação contemplando um período de 24 horas, ou seja, 86.400 s, com intervalo de tempo de 900 s para a gravação dos resultados obtidos. Ao término do processo de cálculo, os resultados podem ser verificados na etapa de pós-processamento.

O software IBER apresenta um ambiente que verifica o comportamento do nível d'água ao longo do tempo na região de interesse, chamado de pós-processamento, como mostrado nas Figuras 37(a)–37(b), onde observa-se que a onda de cheia em decorrência do rompimento flui em direção à jusante, passando por toda área urbanizada da cidade de Santo Antônio de Pádua. No pós-processamento, é possível determinar a profundidade e a elevação da lâmina d'água no decorrer de todo o processo de simulação. No final deste, verifica-se que o reservatório se encontra em sua capacidade mais baixa de armazenamento.



(a) Elevação da lâmina d'água no início (tempo igual a 0 s).



(b) Elevação da lâmina d'água no tempo final.

Figura 37 – Resultados da elevação da lâmina d'água no início e fim da simulação.  
Fonte: A Autora (2022).



Por outro lado, na Figura 38, é possível verificar a evolução da profundidade da lâmina d'água ao longo do tempo até o momento de sua chegada no final da área urbanizada de Santo Antônio de Pádua.

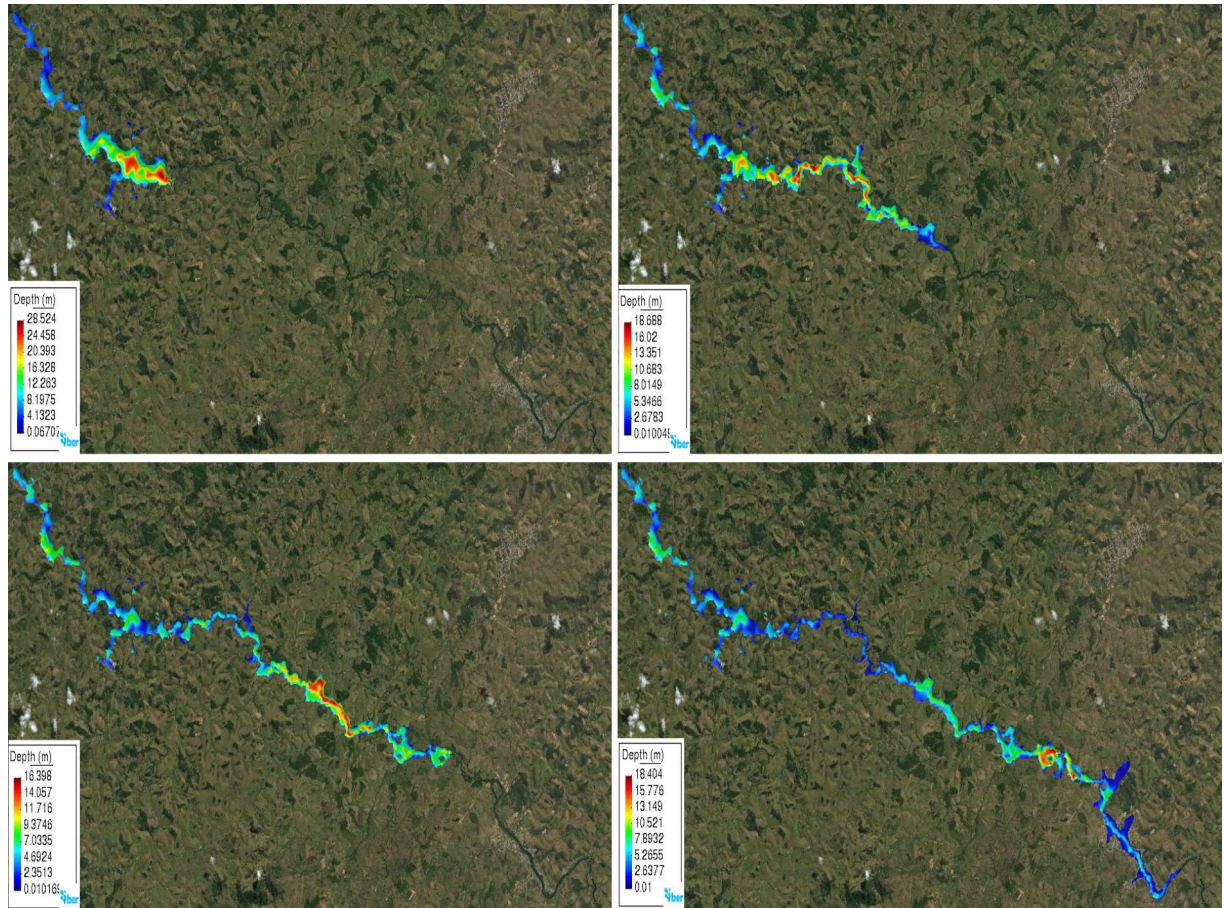


Figura 38 – Representação da lâmina d'água, seguindo da esquerda para a direita e, de cima para baixo, em 0 s, 7.200 s, 14.400 s e 28.800 s.

Fonte: A Autora (2022).

Além disso, na Figura 39, observa-se a extensão da inundação (mapa de máximo), no momento em que a mesma adentra na parte mais povoada (área urbanizada) de Santo Antônio de Pádua, a qual ocorreu no instante 22.500 s.

Cabe ressaltar, que o software IBER, para criar a brecha na barragem, modifica a topografia da malha, a fim de permitir que a água se movimente de montante para jusante. Essa análise possibilita a verificação do processo de formação de brechas por meio da elevação do leito ou pelos resultados ocorridos pela erosão, conforme mostrado na Figura 40, onde a ruptura se inicia em 0 s e termina em 3.600 s.

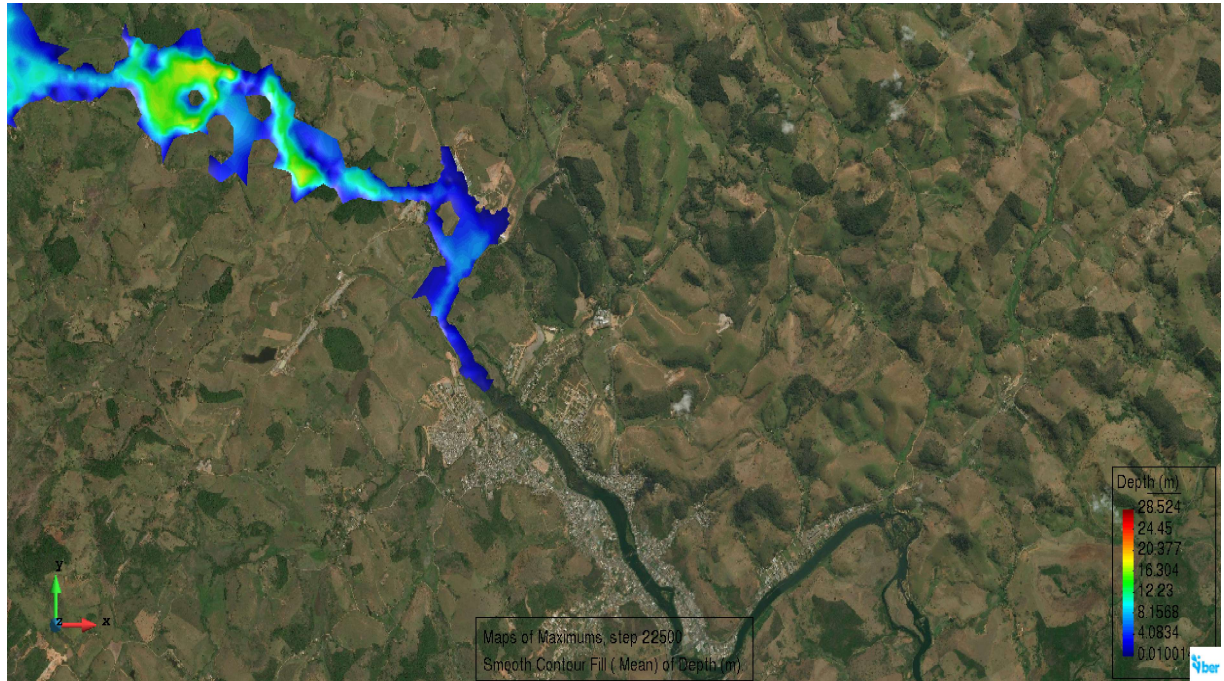


Figura 39 – Mapa da profundidade máxima da lâmina d'água no instante em que a onda atinge a área mais urbanizada da cidade.

Fonte: A Autora (2022).

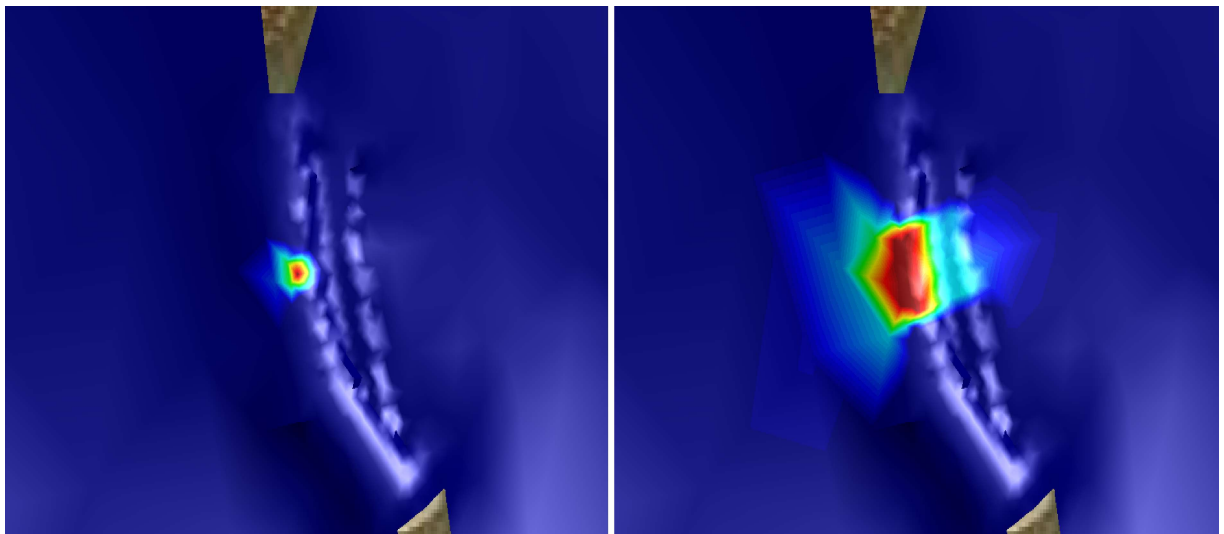


Figura 40 – Comportamento dos sedimentos e consequente erosão ocorridos durante o processo de rompimento da barragem.

Fonte: A Autora (2022).

Tomando como referência a simulação realizada nessa seção, na próxima, são realizadas investigações no que se refere ao estudo de sensibilidade para verificar o resultado do modelo para diferentes malhas e coeficientes de Manning. Com isso, a partir da melhor configuração de malha e parâmetro, pode-se atuar na calibração e validação do modelo a fim de ajustá-lo conforme dados reais e verificar sua capacidade de representar o fenômeno



de interesse. Além disso, é possível fazer a simulação de eventos críticos, investigando diferentes cenários para avaliar o impacto causado na região urbana.

Como forma de comparação dos resultados, foi tomado como base o nível d'água em cada uma das 6 pontes que há no trecho analisado, ou seja, entre a UHE Barra do Braúna e Santo Antônio de Pádua, as quais possibilitam o fluxo de veículos automotores. Nesse sentido, não foi considerada a Ponte 05, descrita na Tabela 2, uma vez que esta é destinada apenas a passagem de pedestres.

## 5.2 Variação da Malha Espacial

Nessa seção são apresentados os resultados envolvendo a variação da malha espacial no que se refere à aplicação do Método dos Volumes Finitos com malhas não-estruturadas composta por elementos triangulares. Para isso, foram realizadas variações da malha no reservatório, barragem, rio, planície e área urbanizada, cujos resultados são apresentados na sequência.

Além disso, cabe ressaltar que, em todos os casos, devido ao tempo para "aquecimento" do modelo (tempo em que a água leva para escoar ao longo de todo o leito do rio de modo a atingir a estabilidade das variáveis), foi realizada uma simulação prévia de forma que toda a hidrodinâmica do sistema, incluindo a elevação e profundidade da lâmina d'água na rede de drenagem, atingisse a estabilidade, antes da simulação do rompimento e consequente análise das malhas adotadas.

### 5.2.1 Variação da Malha no Reservatório

Nesta seção, foram levadas em consideração as simulações para a variação apenas da malha no reservatório, denominada "Ação 01". Para esse cenário, foram realizadas 5 simulações, considerando elementos de malha com tamanho de 200 *m*, 150 *m*, 100 *m*, 50 *m* e 25 *m*. Nas demais superfícies, a malha permaneceu constante e inalterada, ou seja, planície (elementos de 200 *m*), rio (elementos de 100 *m*), área urbanizada (elementos de 50 *m*) e barragem (elementos de 10 *m*). Na Figura 41 são mostradas as elevações da lâmina d'água obtidas em cada uma das 6 pontes presentes no trecho analisado, considerando as diferentes malhas adotadas.

Ao analisar os resultados obtidos na Figura 41 referente às simulações para a variação da malha no reservatório, "Ação 01", verifica-se que o tempo necessário para a água decorrente do rompimento da barragem chegar às pontes 01 e 02 na malha com volumes de tamanho 200 *m*, foi de, aproximadamente, uma hora a uma hora e meia. A partir da ponte 03, esse tempo aumentou à medida que a elevação diminuía. Verifica-se, também, que os resultados obtidos para os volumes de tamanho 50 *m* e 25 *m* não tiveram significativas variações entre si.

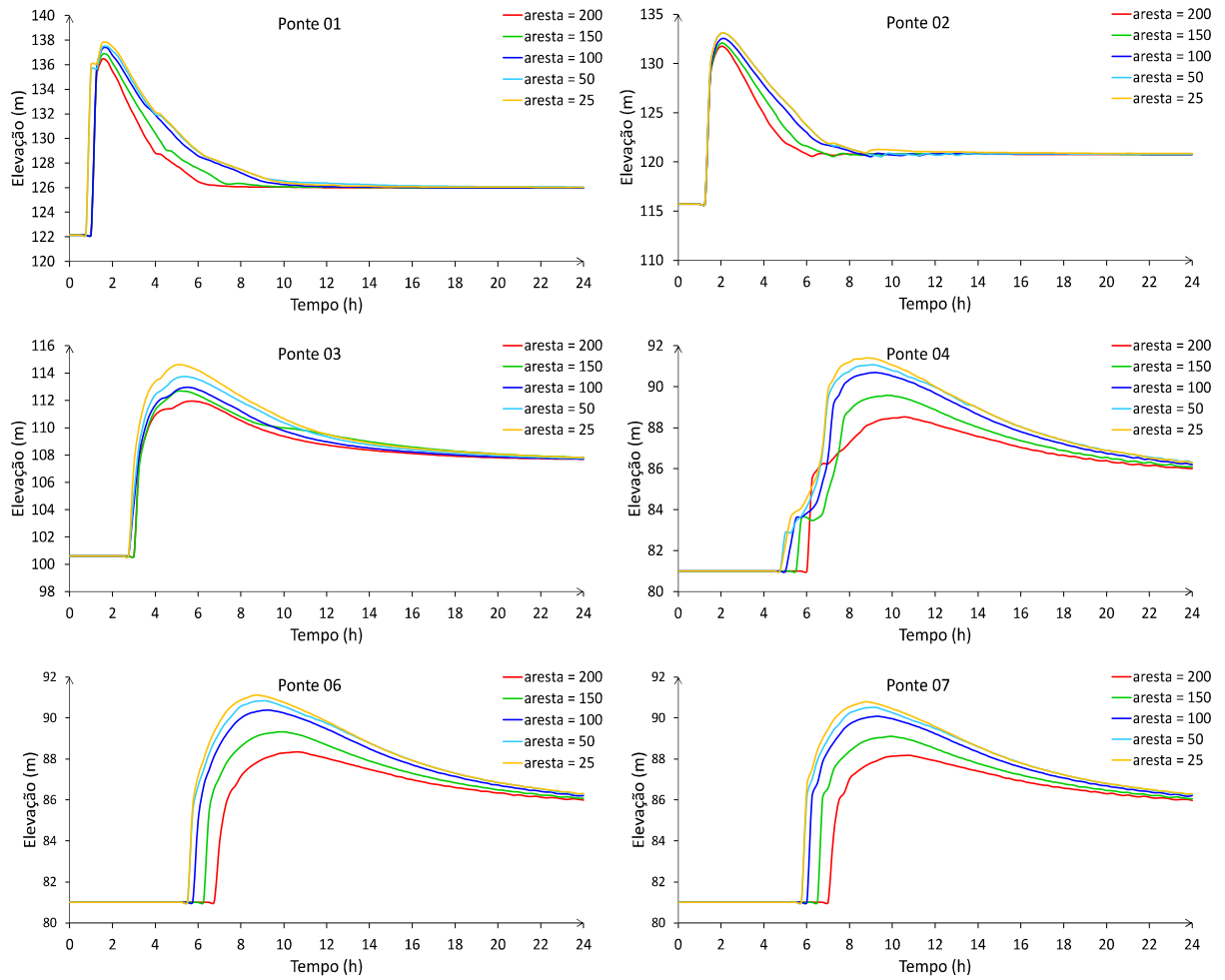


Figura 41 – Ação 01. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial no reservatório.

Fonte: A Autora (2022).

Tais variações nos perfis das elevações da lâmina d'água se devem, também, em decorrência da relação "topografia  $\times$  malha". Quando se usa uma malha com elementos muito grande, a topografia da região não é tão bem retratada.

### 5.2.2 Variação da Malha na Barragem

Na sequência, foi realizada a variação da malha espacial na barragem ("Ação 02"). Tal variação ocorreu no comprimento do volume triangular que representa o elemento da malha, sendo considerados os seguintes tamanhos: 10 m, 5 m e 2 m. Nas demais superfícies, a malha permaneceu constante e inalterada, ou seja, reservatório (elementos de 200 m), planície (elementos de 200 m), rio (elementos de 100 m) e área urbanizada (elementos de 50 m). Na Figura 42, são mostrados os perfis das elevações da lâmina d'água a partir do rompimento da barragem nas pontes tomadas como referência.

Verifica-se que houve uma alteração ao comparar as pontes 01 a 07. Nas pontes 01

e 02, o tempo necessário para a chegada da água foi de, aproximadamente, uma hora a uma hora e meia. Por outro lado, a partir da ponte 04, há um retardo na chegada da onda de cheia para a malha de tamanho 10  $m$ , quando comparado às duas outras malhas. É possível inferir, ainda, que os resultados utilizando a malha com volumes de tamanhos 5  $m$  e 2  $m$  não apresentaram variações significativas.

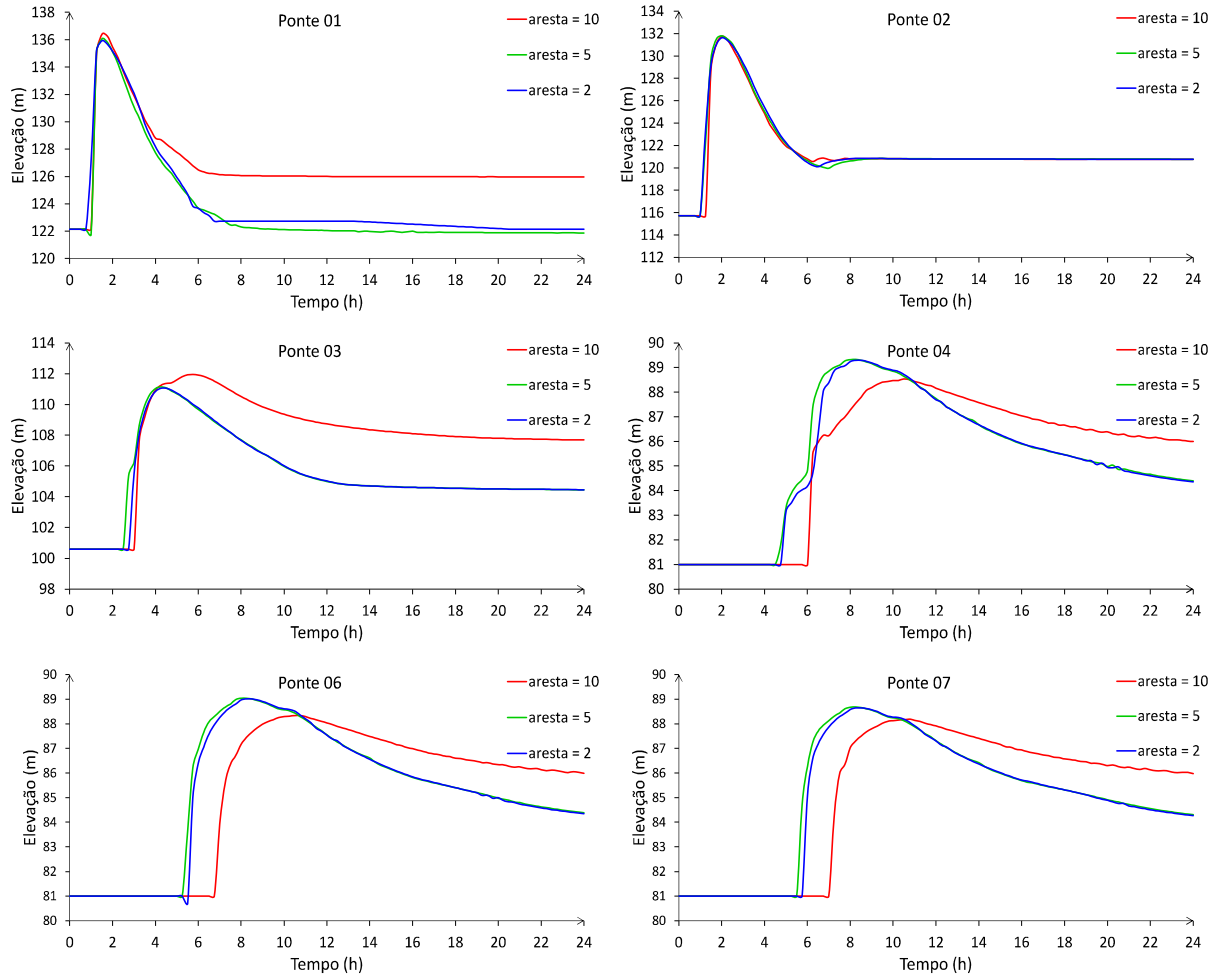


Figura 42 – Ação 02. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial na barragem.

Fonte: A Autora (2022).

### 5.2.3 Variação da Malha no Rio

Na terceira etapa de investigações, "Ação 03", foi analisada a variação da malha do rio, sendo realizadas quatro simulações com volumes de comprimento iguais a 100  $m$ , 50  $m$ , 25  $m$ , e 12,5  $m$ , respectivamente. Nas demais superfícies, a malha permaneceu constante e inalterada, ou seja, reservatório (elementos de 200  $m$ ), planície (elementos de 200  $m$ ), área urbanizada (elementos de 50  $m$ ) e barragem (elementos de 10  $m$ ). Na Figura 43, são apresentados os perfis das elevações da lâmina d'água ao longo do trecho analisado, considerando as 6 pontes de passagem de veículos construídas ao longo do percurso.

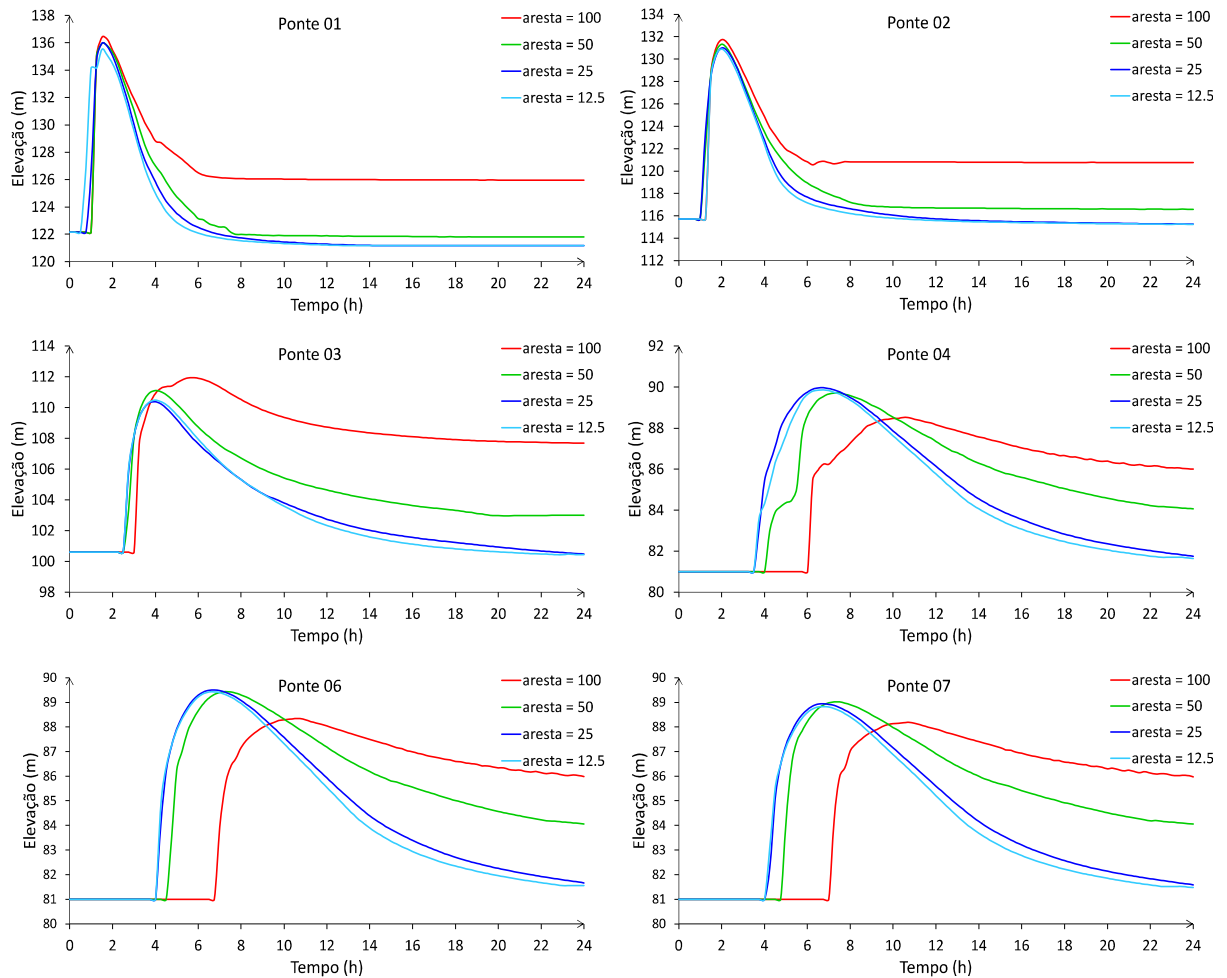


Figura 43 – Ação 03. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial no rio.

Fonte: A Autora (2022).

Com base na Figura 43, é possível observar que, devido ao fato da ponte 01 estar mais próxima à barragem, há pouca variação no tempo de chegada da onda de cheia provocada pelo rompimento, quando analisadas as variações dos tamanhos dos volumes e suas respectivas malhas. O mesmo se aplica à ponte 02. Por outro lado, com o refinamento da malha, o tempo real gasto pelo software para realizar a simulação aumentou em cerca de 1 hora. No entanto, os níveis d'água e tempo de chegada da onda não tiveram variações significativas para as malhas com elementos 25 m e 12,5 m de comprimento.

#### 5.2.4 Variação da Malha na Planície

Na "Ação 04" (variação da malha na planície), foram realizadas quatro simulações, sendo considerados volumes triangulares de comprimento iguais a 200 m, 150 m, 100 m e 50 m, respectivamente. Nas demais superfícies, a malha permaneceu constante e inalterada, ou seja, reservatório (elementos de 200 m), rio (elementos de 100 m), área urbanizada



(elementos de 50 *m*) e barragem (elementos de 10 *m*). Na Figura 44, são mostrados os perfis das elevações da lâmina d'água, tomando como referência a localização das 6 pontes ao longo do curso d'água.

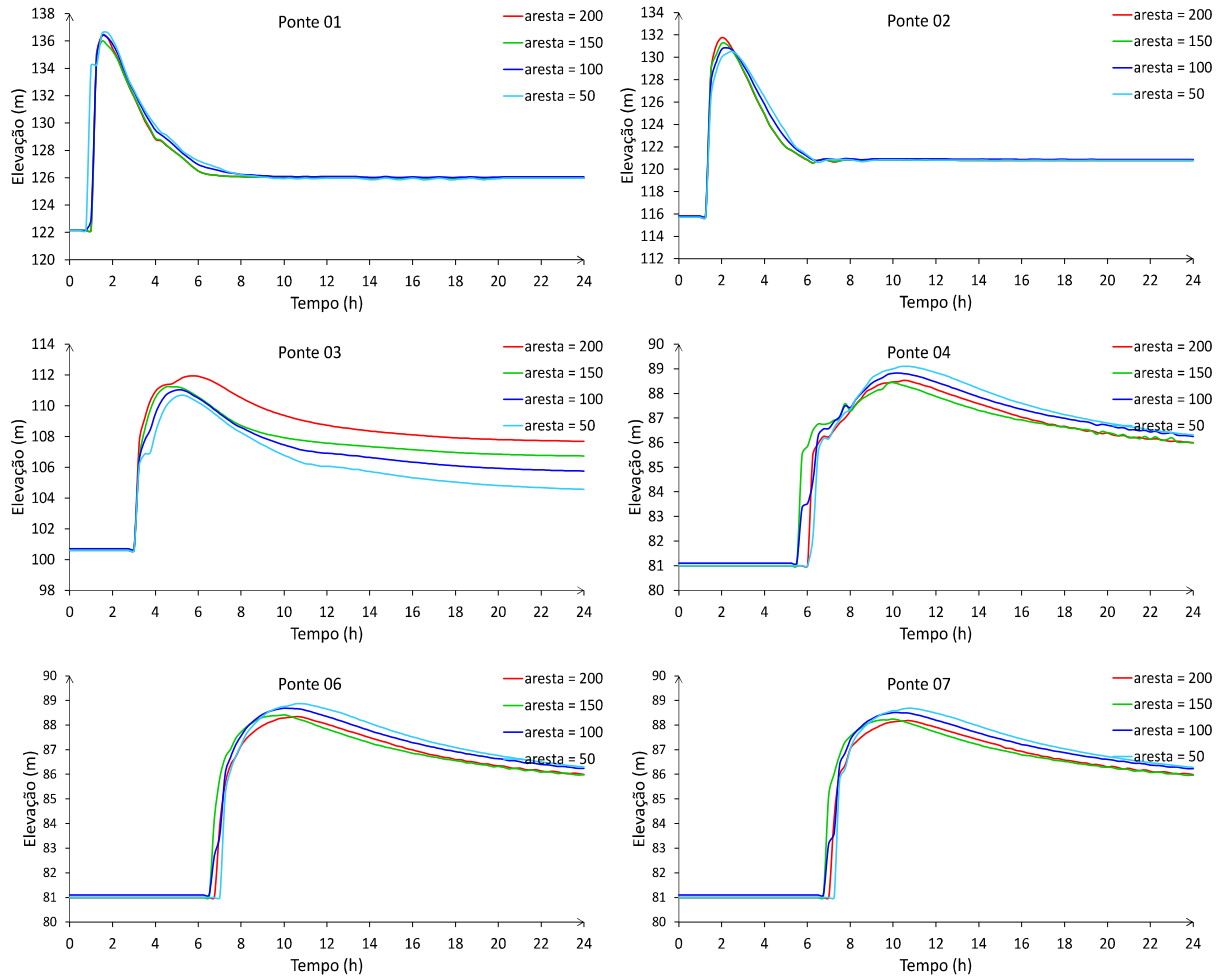


Figura 44 – Ação 04. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial no planície.

Fonte: A Autora (2022).

Diferentemente das simulações feitas anteriormente para a análise da variação da malha no reservatório, barragem e rio, onde uma redução do tamanho dos volumes levou a uma diminuição do tempo de chegada da onda de cheia nas pontes tomadas como referência, verifica-se que, para esta simulação (variação da malha na planície), conforme mostrado na Figura 44, uma redução dos elementos da malha não ocasionou uma variação significativa no perfil da onda de cheia, bem como no retardo do tempo de chegada da mesma nas respectivas pontes, considerando os diferentes volumes. Isso se deve ao fato da maior parte do volume de água oriundo do reservatório fluir na região onde está localizado o leito do rio. Nesta simulação, a maior diferença entre as malhas é vista no perfil descendente da onda de cheia na ponte 03.

### 5.2.5 Variação da Malha na Área Urbanizada

Já, na "Ação 05", foram levados em consideração exclusivamente os efeitos decorrentes da variação da malha na área urbanizada, adotando-se quatro tamanhos para os volumes, a saber: 50 *m*, 25 *m*, 12,5 *m* e 7 *m*. Nas demais superfícies, a malha permaneceu constante e inalterada, ou seja, reservatório (elementos de 200 *m*), planície (elementos de 200 *m*), rio (elementos de 100 *m*) e barragem (elementos de 10 *m*). Na Figura 45, são apresentados os perfis das elevações da lâmina d'água para as distintas malhas investigadas.

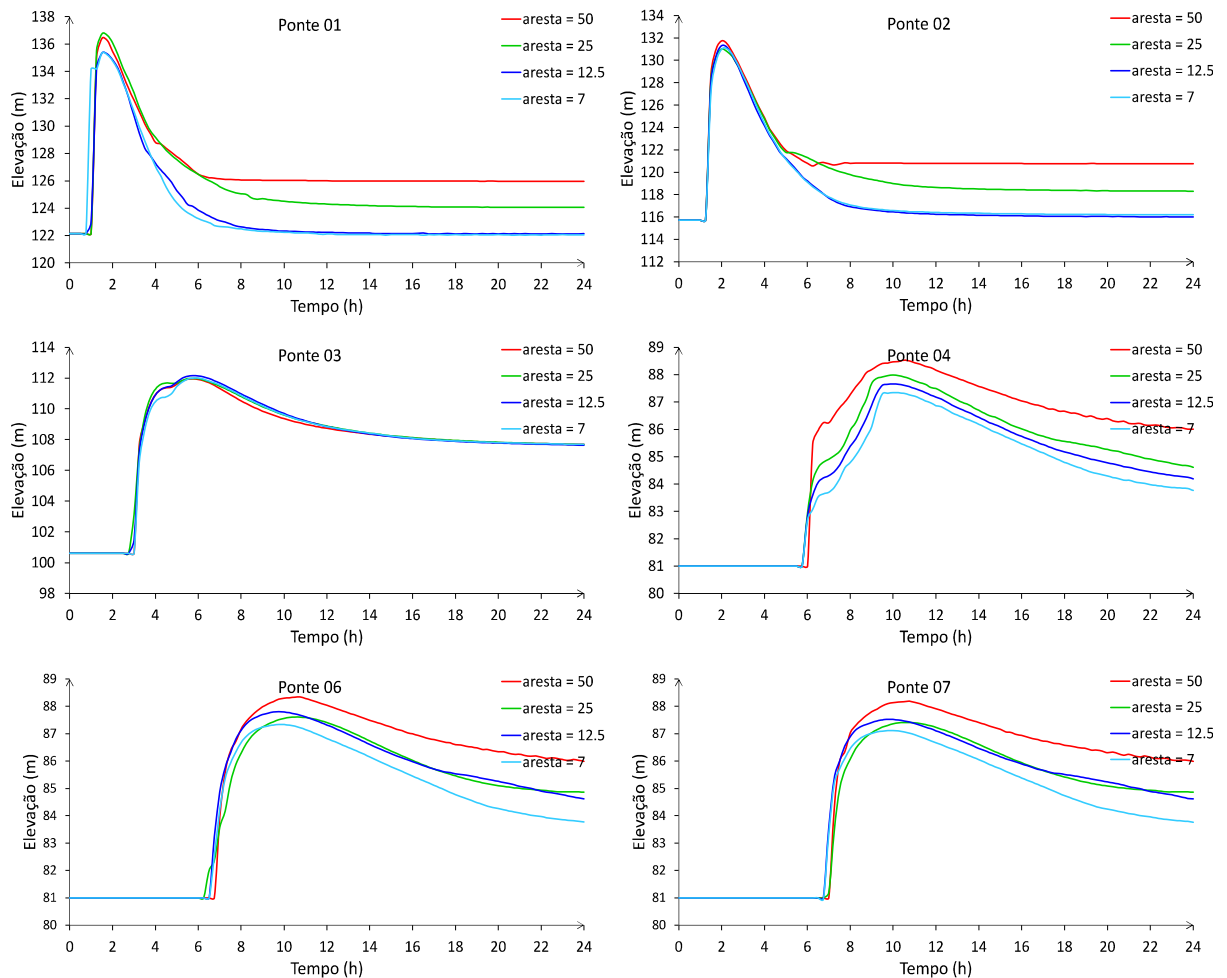


Figura 45 – Ação 05. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação da malha espacial na área urbanizada.

Fonte: A Autora (2022).

É possível verificar, na Figura 45 que, assim como nas demais simulações, nas pontes 01 e 02, a água leva, aproximadamente, entre uma hora a uma hora e meia para chegar às mesmas. Além disso, a maior discrepância de valores no que se refere ao pico da onda de cheia, ocorre a partir da ponte 04, enquanto, no que se refere ao período descendente da onda, apenas na ponte 03 não há alterações significativas.

Ressalta-se, ainda, que nas seis pontes, o comportamento dos perfis da lâmina d'água oscilam para os diferentes volumes adotados. Em algumas pontes, não houve variação significativa entre os perfis para as malhas com volumes de tamanho iguais a 25 *m* e 12,5 *m*. Já, em outras, as malhas com volumes de 12,5 *m* e 7 *m*, apresentaram maior estabilidade nos resultados obtidos para a elevação da lâmina d'água.

### 5.3 Variação do Coeficiente de Rugosidade

Além da variação da malha espacial, conforme relatado na Seção 5.2, também foi realizada a análise do coeficiente de rugosidade ao longo da região de estudos.

Para isso, foi utilizada a simulação base descrita na Seção 5.1, ou seja, uma malha não estruturada com elementos triangulares de tamanho 200 *m* no reservatório e planície, enquanto na barragem, rio e área urbanizada, adotou-se, respectivamente, elementos de tamanhos iguais a 10 *m*, 100 *m* e 50 *m*. Aos coeficientes de rugosidade de Manning, assim como ocorrido na Seção 5.1, foram atribuídos os valores de 0,025 *s/m*<sup>1/3</sup> (reservatório, barragem e rio), 0,050 *s/m*<sup>1/3</sup> (planície) e 0,150 *s/m*<sup>1/3</sup> (área urbanizada).

Na sequência, são analisados os efeitos da variação dos referidos coeficientes no níveis d'água decorrentes da onda de cheia ocasionada pelo rompimento da barragem da UHE Barra do Braúna.

#### 5.3.1 Variação do Coeficiente de Rugosidade do Reservatório, Barragem e Rio

Primeiramente, foi realizada a análise da variação simultânea do coeficiente de rugosidade do reservatório, barragem e rio ("Ação 06"). Para isso, aplicou-se uma alteração de  $\pm 50\%$  do valor base (0,025 *s/m*<sup>1/3</sup>), obtendo com isso, os valores de 0,013 *s/m*<sup>1/3</sup> e 0,038 *s/m*<sup>1/3</sup>, respectivamente. Por outro lado, os valores do coeficiente de rugosidade de Manning da planície (0,050 *s/m*<sup>1/3</sup>) e área urbanizada (0,150 *s/m*<sup>1/3</sup>), mantiveram-se inalterados. Na Figura 46, são mostrados os valores dos níveis d'água após a variação dos coeficientes.

Verifica-se que a variação do coeficiente de rugosidade do reservatório, barragem e rio não ocasionou um impacto significativo no tempo de chegada da onda de cheia nos pontos onde se realizou a comparação das elevações da lâmina d'água. As maiores alterações ocorreram nas pontes localizadas mais à jusante da barragem.

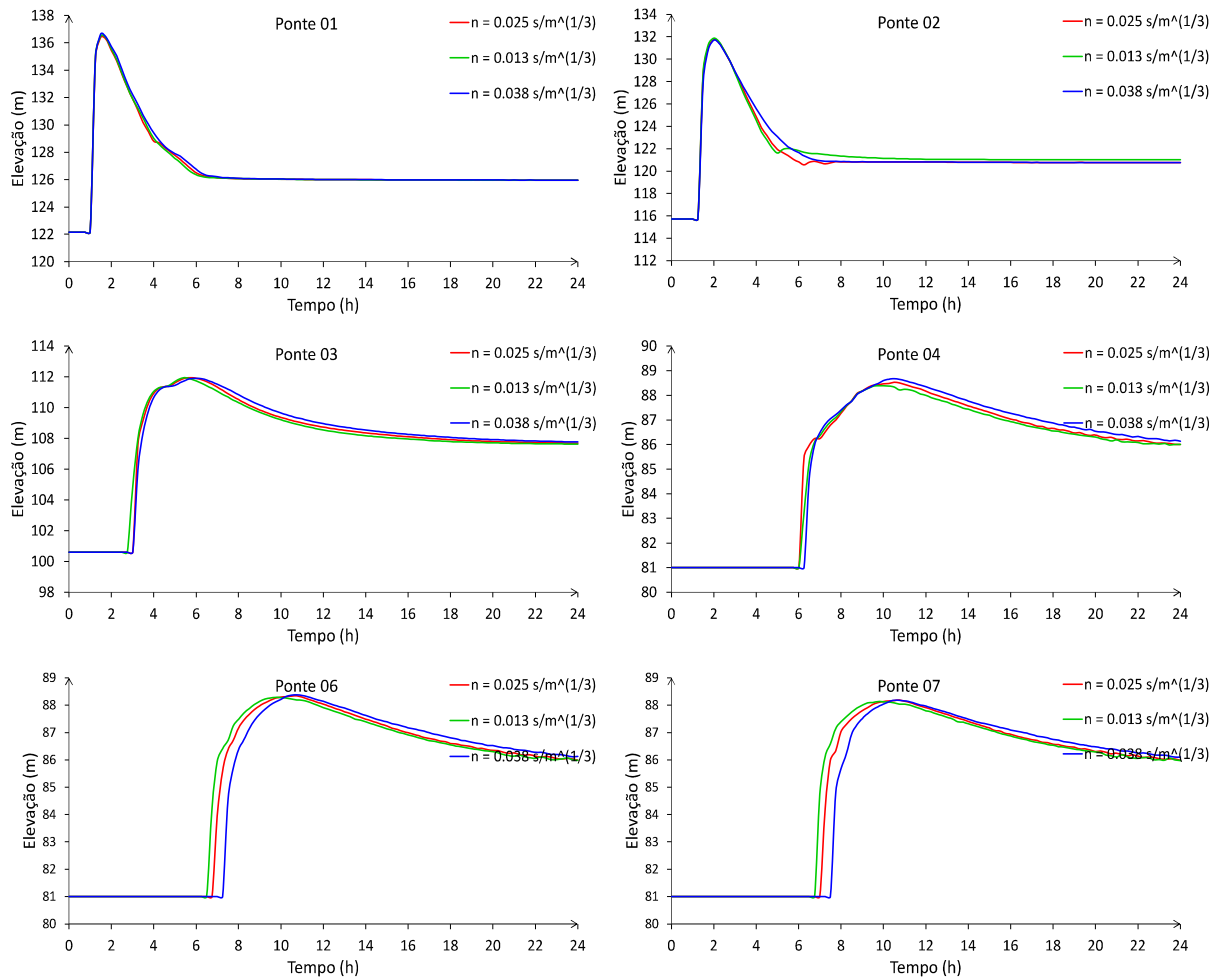


Figura 46 – Ação 06. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação do coeficiente de rugosidade do reservatório.

Fonte: A Autora (2022).

### 5.3.2 Variação do Coeficiente de Rugosidade da Planície

Já, na "Ação 07", foram levados em consideração os efeitos decorrentes da variação do coeficiente de rugosidade da planície. Nesse sentido, foi realizada a alteração de  $\pm 50\%$  do valor base ( $0,050 \text{ s/m}^{1/3}$ ), obtendo, assim, os valores de  $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$  e  $0,075 \text{ s/m}^{1/3}$ , respectivamente. Nessa simulação, os valores do coeficiente de rugosidade de Manning do reservatório, barragem e rio ( $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$ ) e área urbanizada ( $0,150 \text{ s/m}^{1/3}$ ), mantiveram-se inalterados. Na Figura 47, são mostrados os valores das elevações das lâminas d'água após a variação dos valores base dos coeficientes.

Assim como na "Ação 06", a maior divergência dos resultados no que se refere ao tempo de chegada da onda de cheia ocasionada pelo rompimento da barragem, decorre a partir da ponte 04.

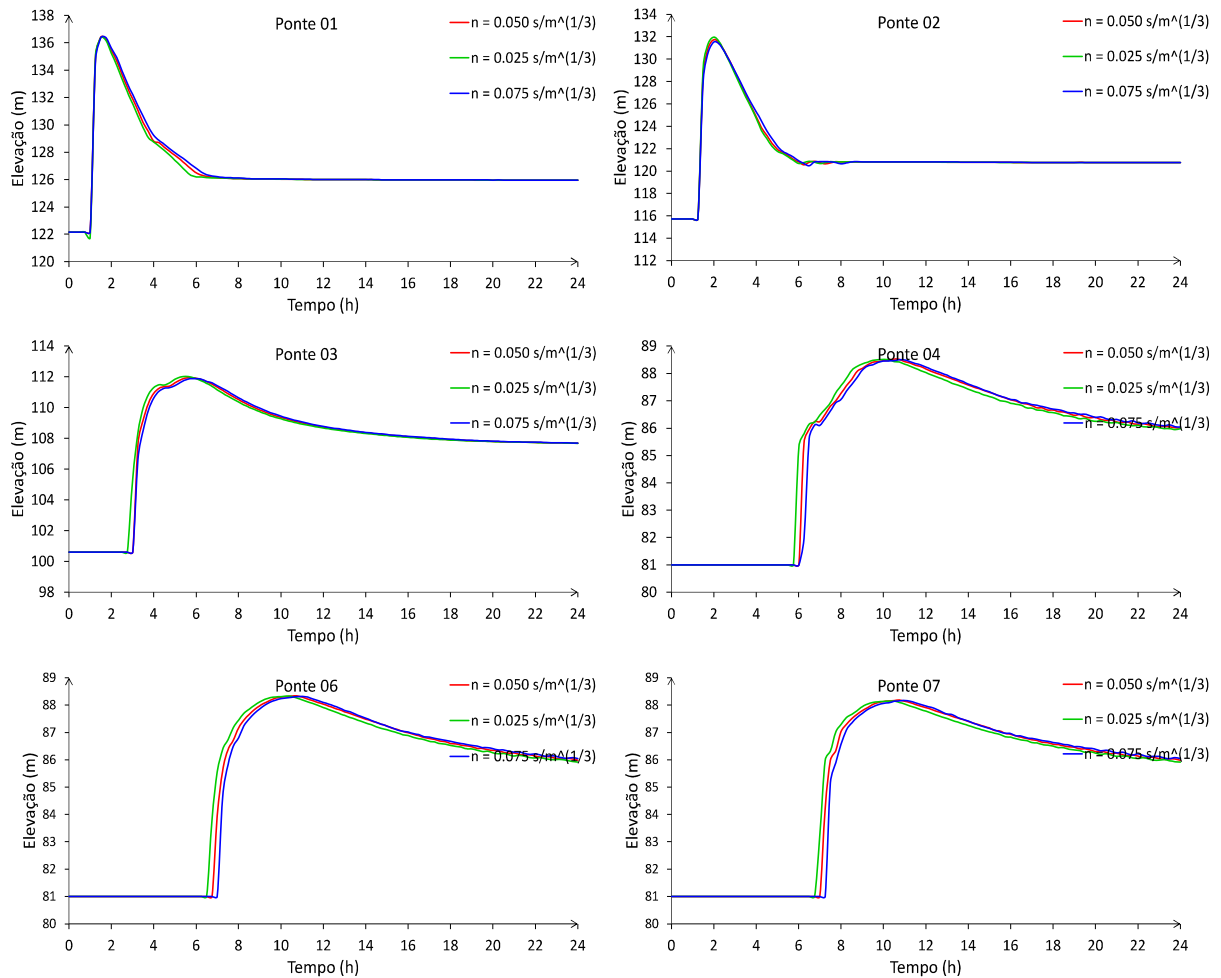


Figura 47 – Ação 07. Perfis das elevações da lâmina d'água nas 6 pontes com base na variação do coeficiente de rugosidade da planície.

Fonte: A Autora (2022).

### 5.3.3 Variação do Coeficiente de Rugosidade da Região Urbanizada

Por fim, na "Ação 08", são retratados os efeitos decorrentes do coeficiente de rugosidade da região urbanizada. Para essa simulação, foi realizada a alteração de  $\pm 50\%$  do valor base ( $0,150 \text{ s/m}^{1/3}$ ), obtendo-se os valores de  $0,075 \text{ s/m}^{1/3}$  e  $0,225 \text{ s/m}^{1/3}$ , respectivamente. Já os valores do coeficiente de rugosidade de Manning do reservatório, barragem e rio ( $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$ ) e planície ( $0,050 \text{ s/m}^{1/3}$ ), mantiveram-se inalterados. Na Figura 48 são mostrados os valores das elevações da lâmina d'água após a variação dos valores base dos coeficientes.

Novamente, seguindo a tendência do comportamento apresentado durante a "Ação 06" e "Ação 07", a variação do coeficiente de rugosidade de Manning, na região classificada como área urbanizada, não teve impactos significativos nos perfis das elevações da lâmina d'água.

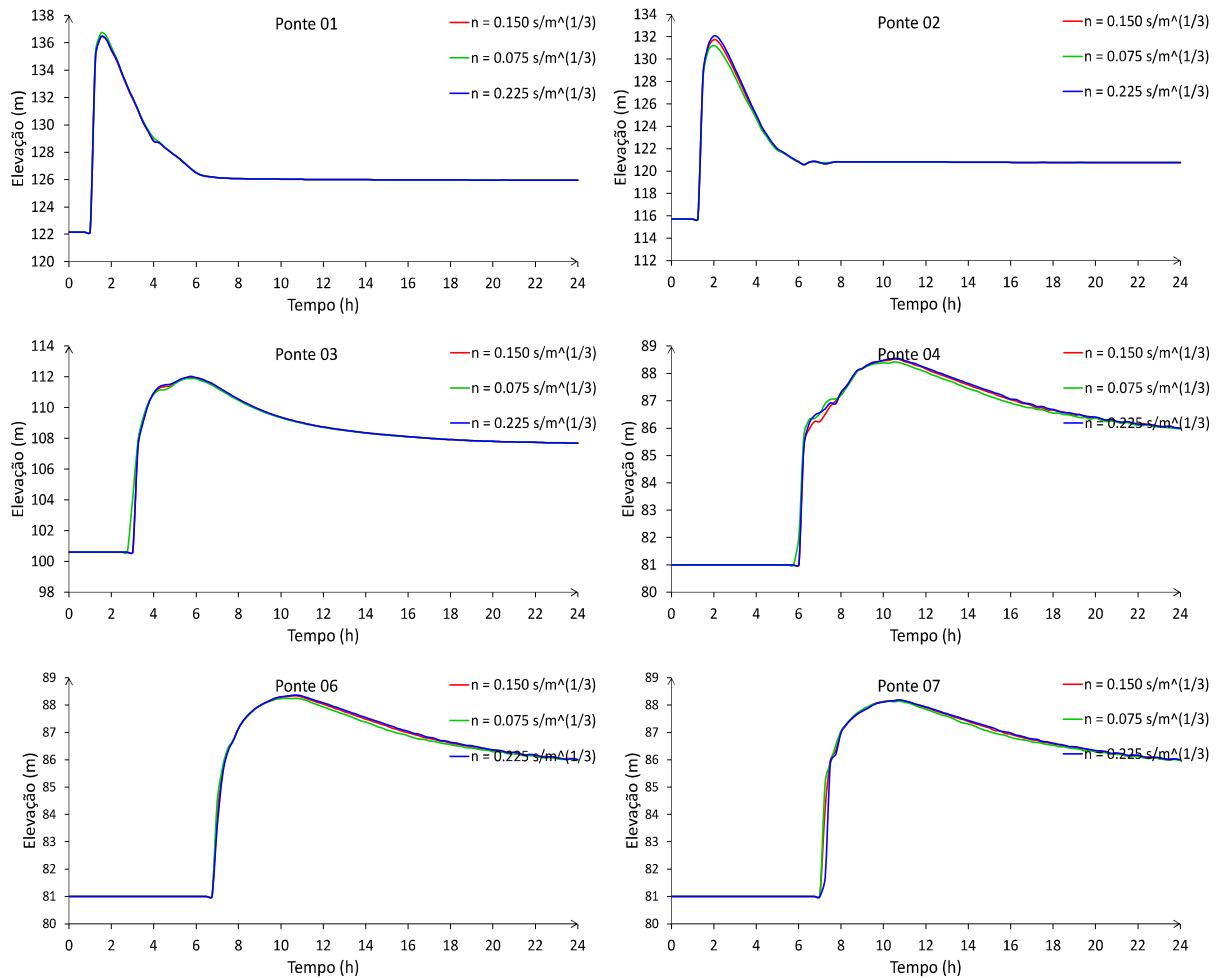


Figura 48 – Ação 08. Perfis das elevações da lâmina d’água nas 6 pontes com base na variação do coeficiente de rugosidade da região urbanizada.

Fonte: A Autora (2022).

## 5.4 Calibração e Validação do Modelo

Após vários testes realizados no que se refere à variação da malha espacial, para este trabalho, optou-se por adotar a seguinte configuração para o tamanho dos elementos, de acordo com as superfícies construídas, a saber: 25 *m* (reservatório), 5 *m* (barragem), 25 *m* (rio), 100 *m* (planície) e 12,5 *m* (área urbanizada). No que se refere aos valores do coeficiente de rugosidade, foram utilizados os valores *default* presentes no software IBER, uma vez que a variação dos mesmos não apresentou impactos significativos nas análises realizadas na Seção 5.3.

Com base na configuração de malha e coeficientes de rugosidade adotados, foi realizada a simulação de um evento de inundação ocorrido na cidade de Santo Antônio de Pádua para calibrar e validar o modelo frente a um cenário real envolvendo uma onda de cheia na região sob análise. Nesse sentido, conforme dito na Seção 4.3.2, foram utilizados dados de estações de monitoramento da ANA para caracterizar o evento de



cheia do rio Pomba no período de 24 a 28 de janeiro de 2020. Nas Figuras 49-51, é apresentada a comparação entre os resultados numéricos obtidos no software IBER e os dados experimentais oriundos da estação de monitoramento da ANA/INEA.

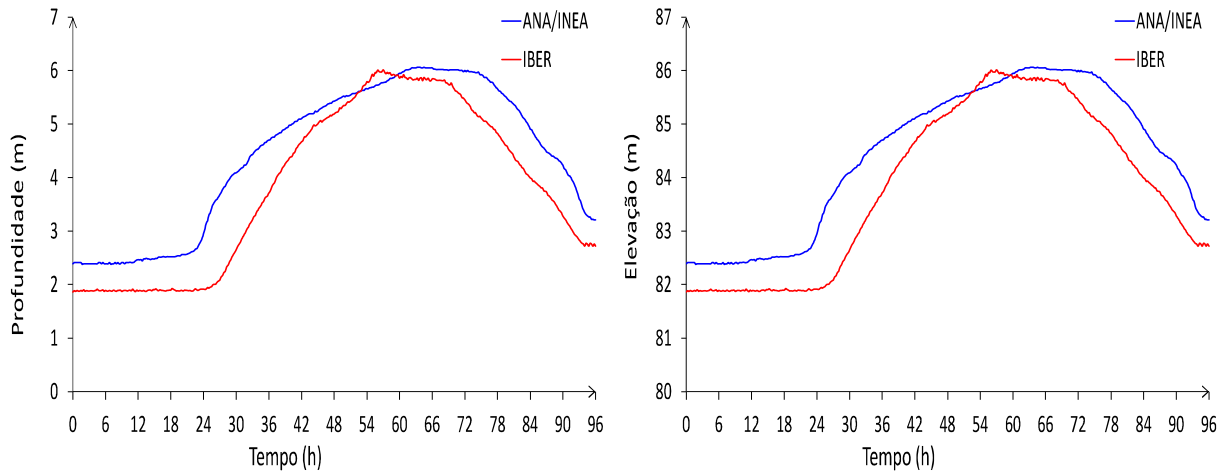


Figura 49 – Perfis da profundidade e elevação da lâmina d'água na estação da ANA/INEA.  
Fonte: A Autora (2022).

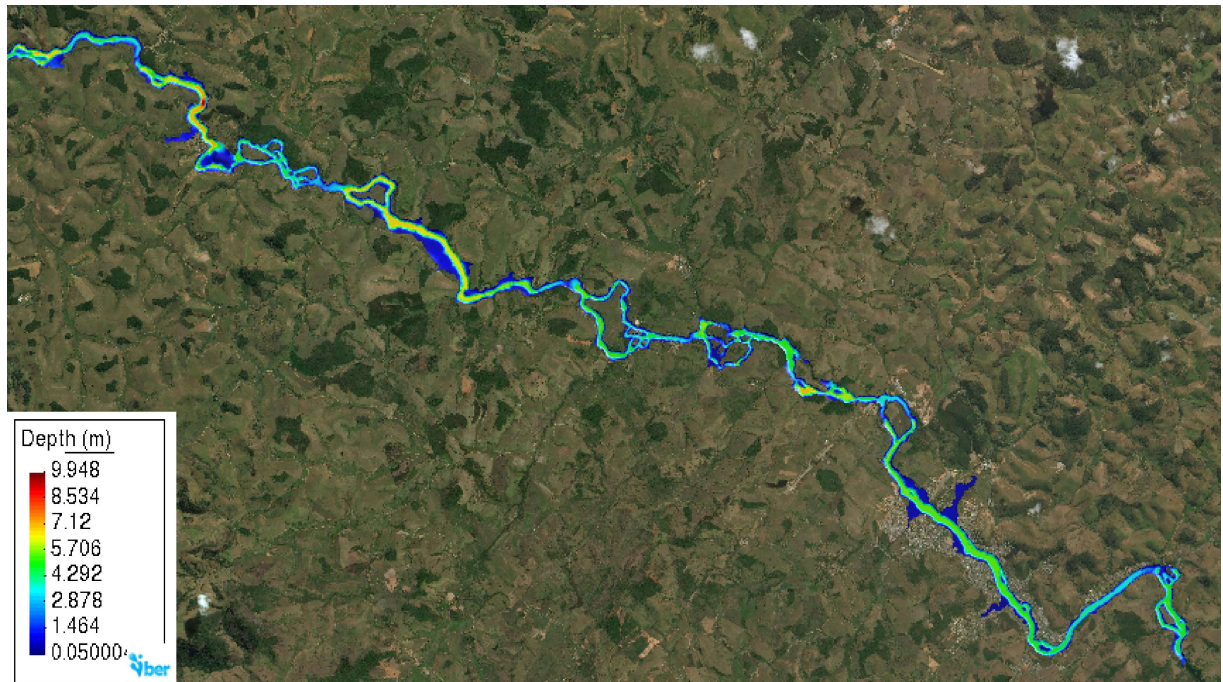


Figura 50 – Perfis da profundidade máxima da lâmina d'água no rio Pomba na região analisada.  
Fonte: A Autora (2022).

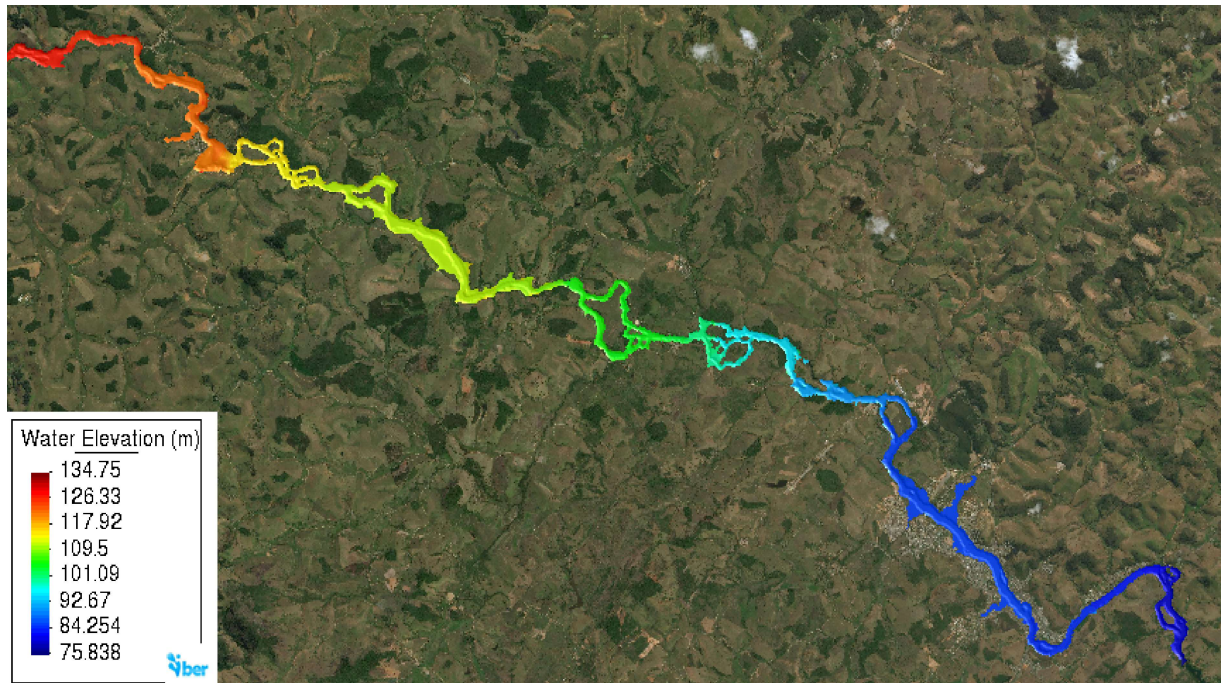


Figura 51 – Perfis da elevação máxima da lâmina d’água no rio Pomba na região analisada.  
Fonte: A Autora (2022).

De acordo com as Figuras 49-51, verifica-se que o modelo desenvolvido no software IBER conseguiu simular o pico da onda de cheia de forma satisfatória quando comparado com os dados experimentais obtidos no site da ANA/INEA, pois mostrou o pior momento da onda de cheia na cidade de Santo Antônio de Pádua. No entanto, subestimou os níveis d’água antes e após o referido pico. Verifica-se, ainda, que a maior profundidade da lâmina d’água atingida tanto no software, quanto nos dados obtidos na estação da ANA/INEA, localizada próxima à zona urbanizada de Santo Antônio de Pádua, esteve próxima a 6 m, a qual ficou estabelecida entre um dado instante de tempo de 55 h a 65 h, aproximadamente, numa elevação em torno de 86 m.

### 5.5 Simulação de Cenários Hipotéticos de Rompimento de Barragem

Com base na configuração descrita na Seção 5.4, foram simulados quatro cenários para o rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna, para os quais foram tomados como referência os dados disponíveis no trabalho de Daru et al. (2013).

Para a simulação dos quatro cenários de rompimento hipotético da barragem descritos na Tabela 3, foi considerado um tempo total de simulação igual a 24 horas. Já o rompimento total variou de acordo com o tempo de ruptura descrito na Tabela 3, contados a partir do instante inicial da simulação, o qual também foi considerado como o início da formação da brecha. Na Figura 52, são apresentados os perfis das elevações da lâmina d’água para os quatro cenários simulados.

Tabela 3 – Dados utilizados para as simulações do rompimento hipotético da barragem de Barra do Braúna obtidos no trabalho de Daru et al. (2013).

| Cenário | Largura Média<br>da Brecha<br>( <i>m</i> ) | Tempo de Ruptura<br>da Barragem<br>( <i>h : min</i> ) | Elevação da Lâmina<br>d'Água no Reservatório<br>( <i>m</i> ) |
|---------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| A       | 91,5                                       | 1:00                                                  | 154,5                                                        |
| B       | 84,0                                       | 0:56                                                  | 152,0                                                        |
| C       | 266,0                                      | 2:21                                                  | 154,5                                                        |
| D       | 200,0                                      | 2:07                                                  | 152,0                                                        |

Fonte: A Autora (2022).

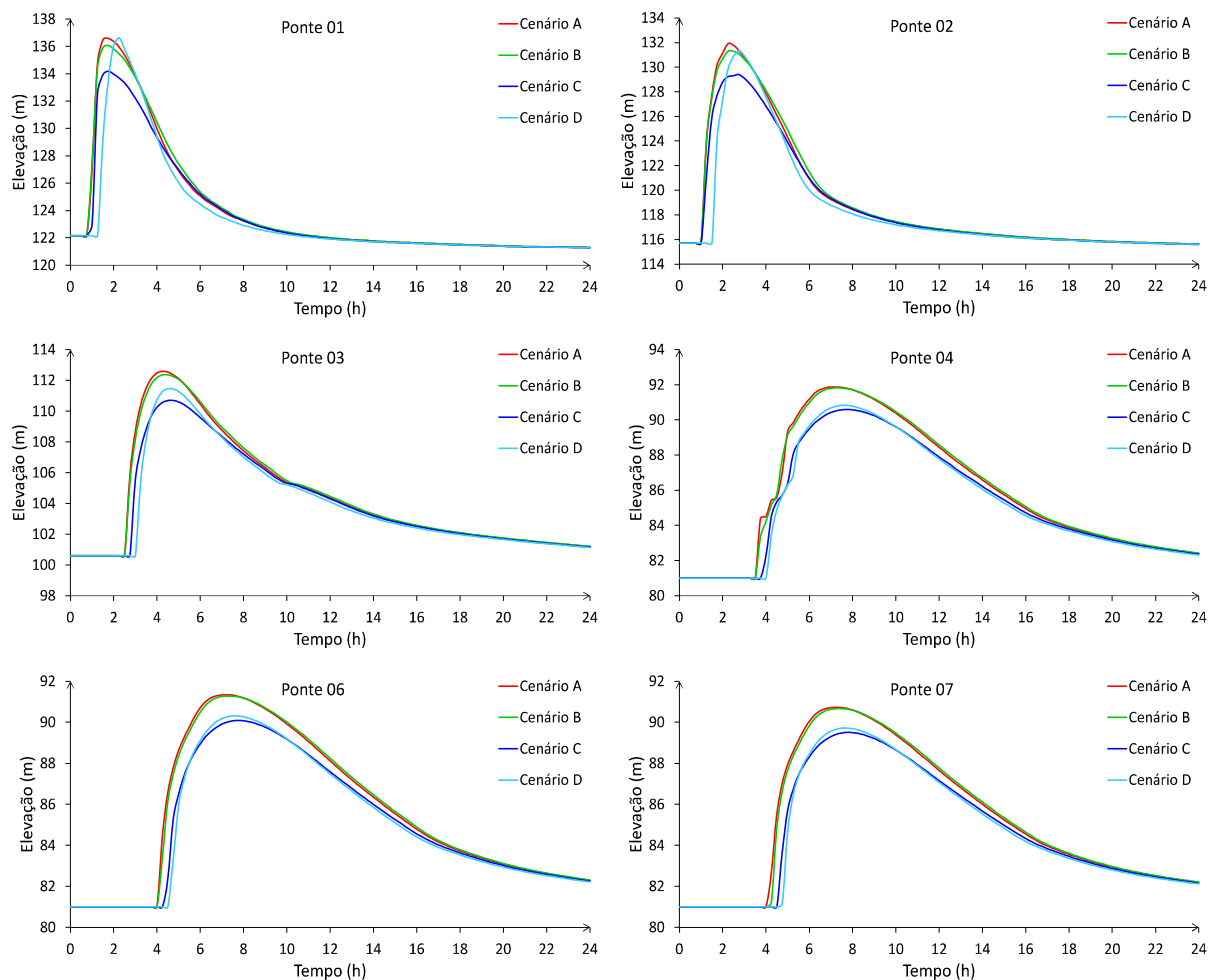


Figura 52 – Perfis das elevações da lâmina d'água nos quatro cenários com base nos diferentes rompimentos simulados ao longo de um período de 24 horas.

Fonte: A Autora (2022).

Além dos perfis das elevações da lâmina d'água nos locais onde estão localizadas as seis pontes de passagem de veículos ao longo do trecho analisado, considerando os quatro cenários simulados, também foi realizada uma análise dos mapas de máximos para as



profundidades e elevações da lâmina d'água, conforme mostrado nas Figuras 53 a 60.

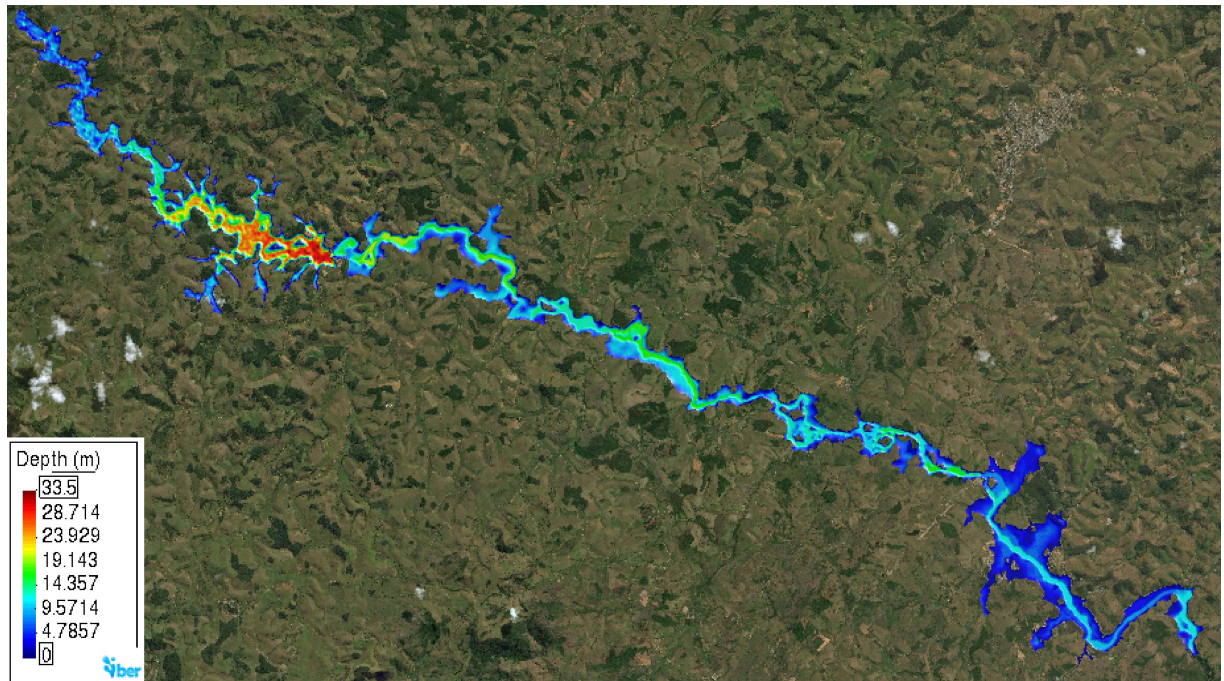


Figura 53 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d'água referente a simulação do Cenário A.

Fonte: A Autora (2022).

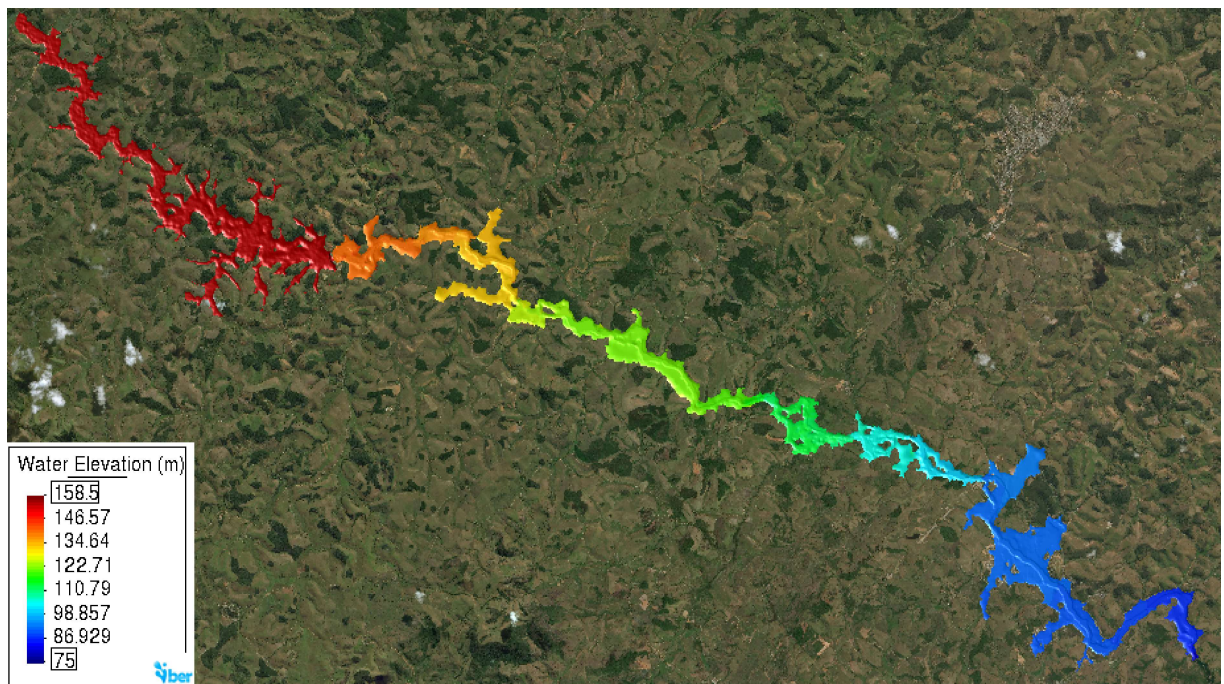


Figura 54 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d'água referente a simulação do Cenário A.

Fonte: A Autora (2022).



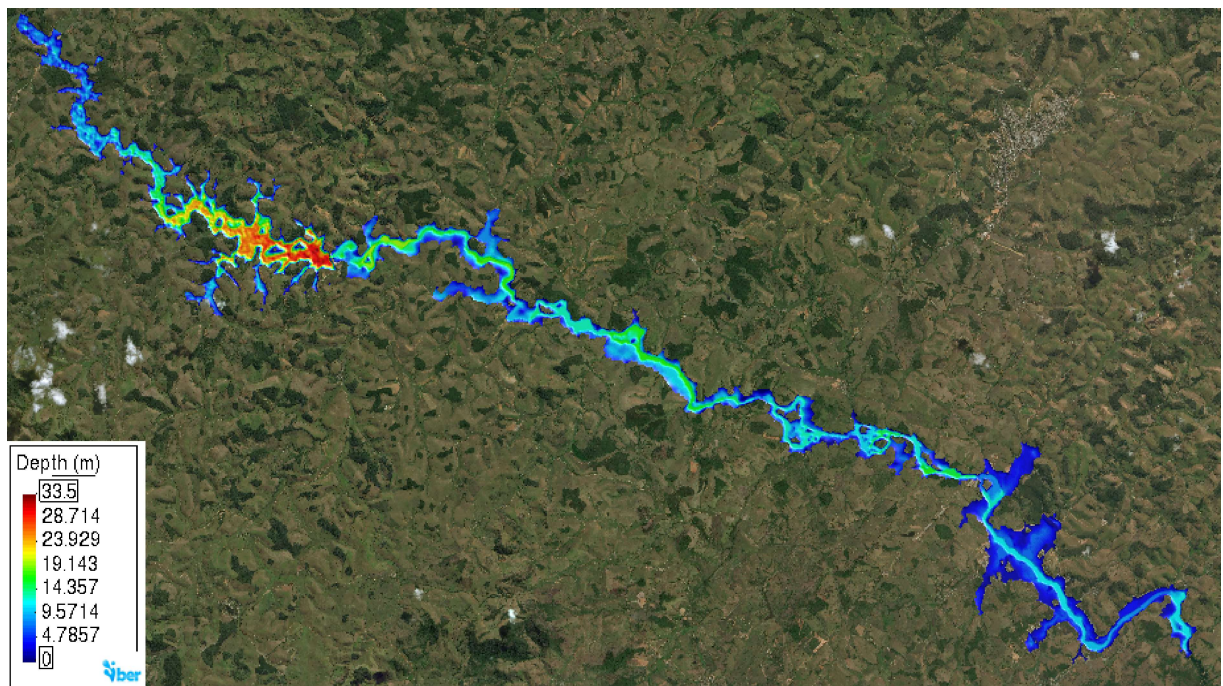


Figura 55 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d'água referente a simulação do Cenário B.

Fonte: A Autora (2022).

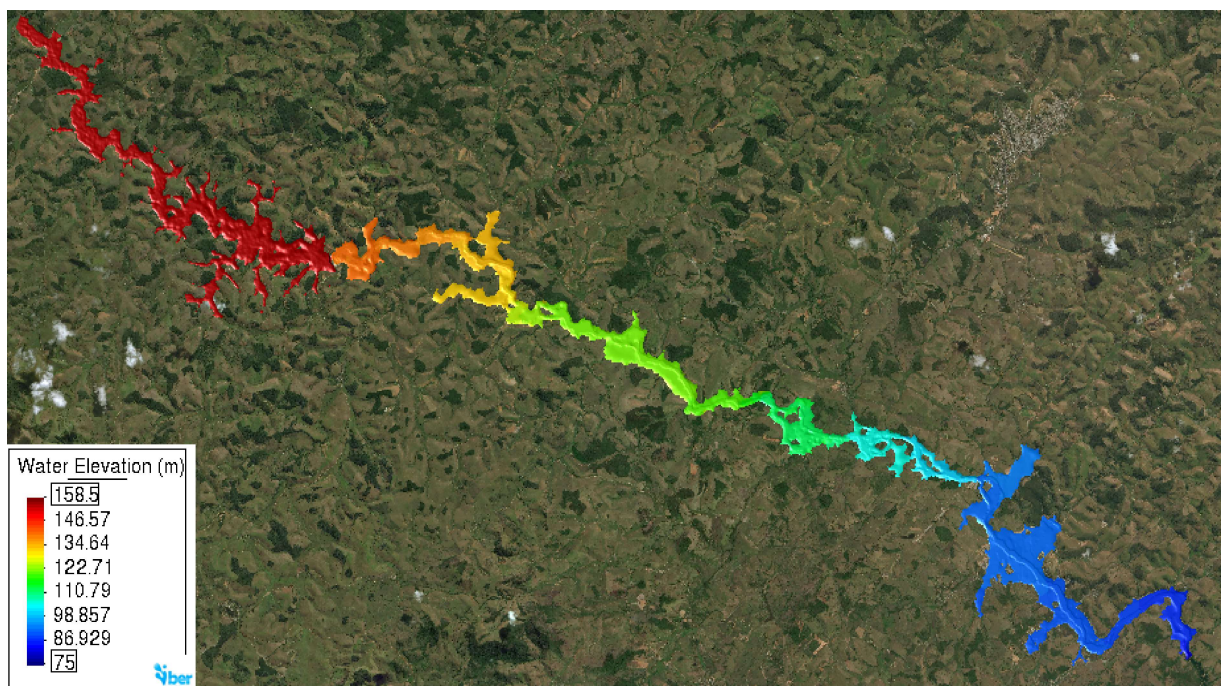


Figura 56 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d'água referente a simulação do Cenário B.

Fonte: A Autora (2022).



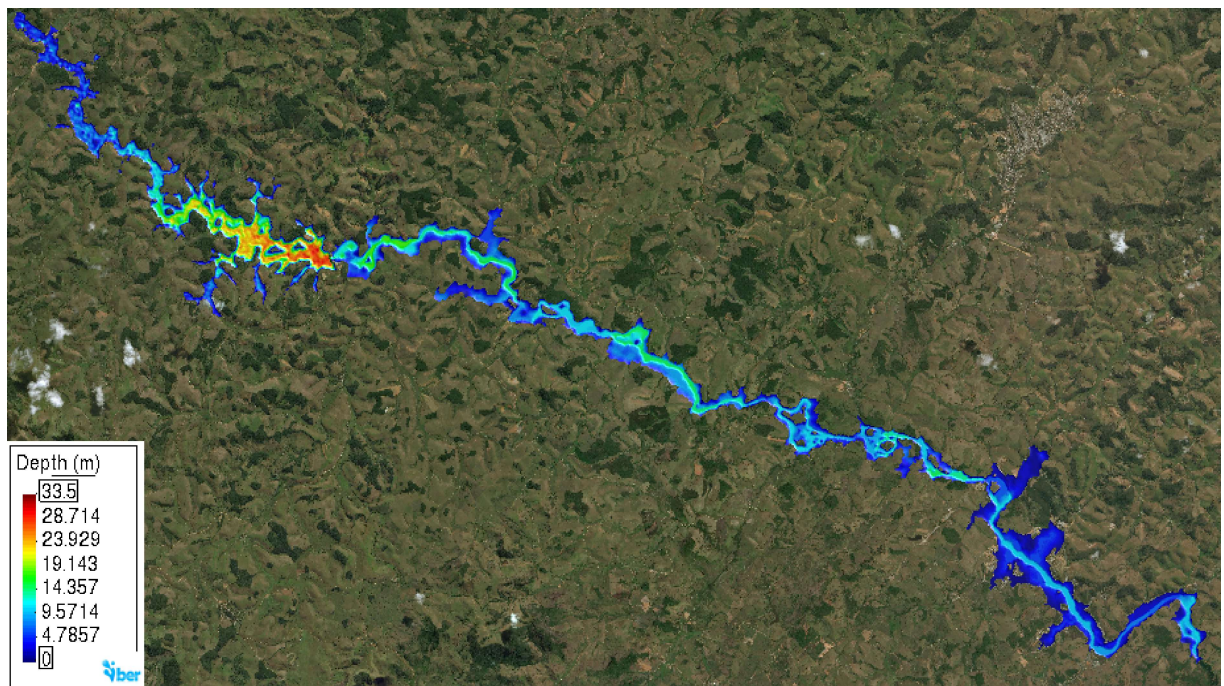


Figura 57 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d'água referente a simulação do Cenário C.

Fonte: A Autora (2022).

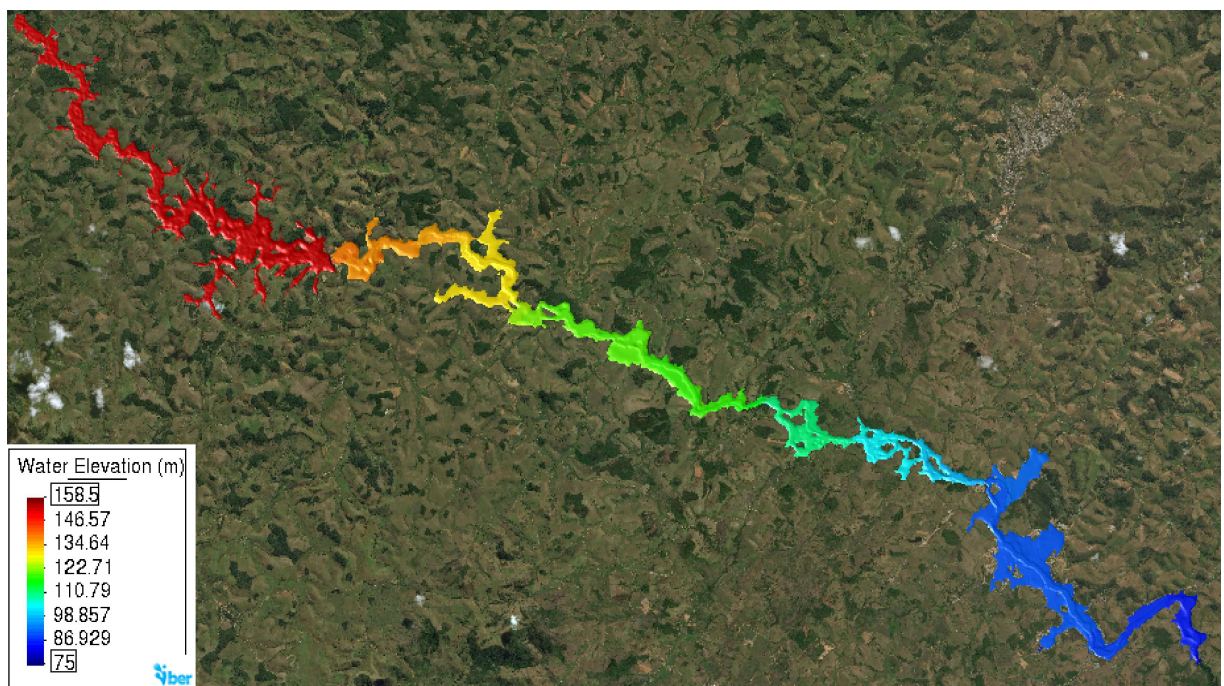


Figura 58 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d'água referente a simulação do Cenário C.

Fonte: A Autora (2022).



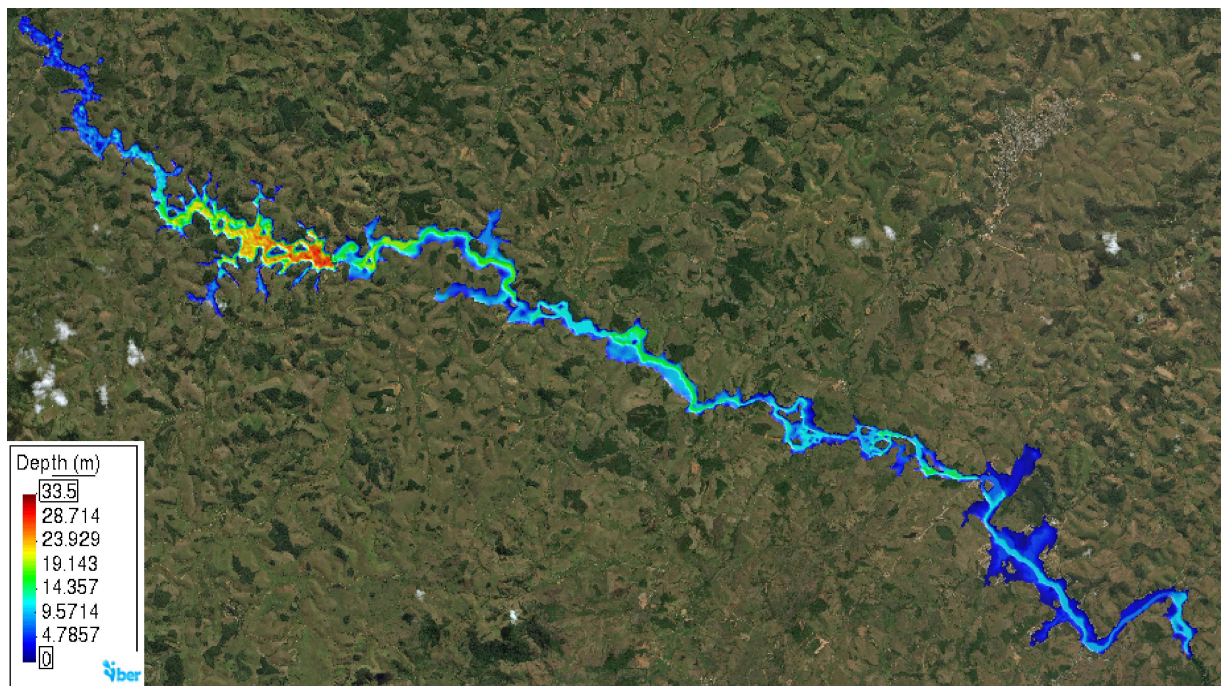


Figura 59 – Mapa de máximo para a profundidade da lâmina d'água referente a simulação do Cenário D.

Fonte: A Autora (2022).

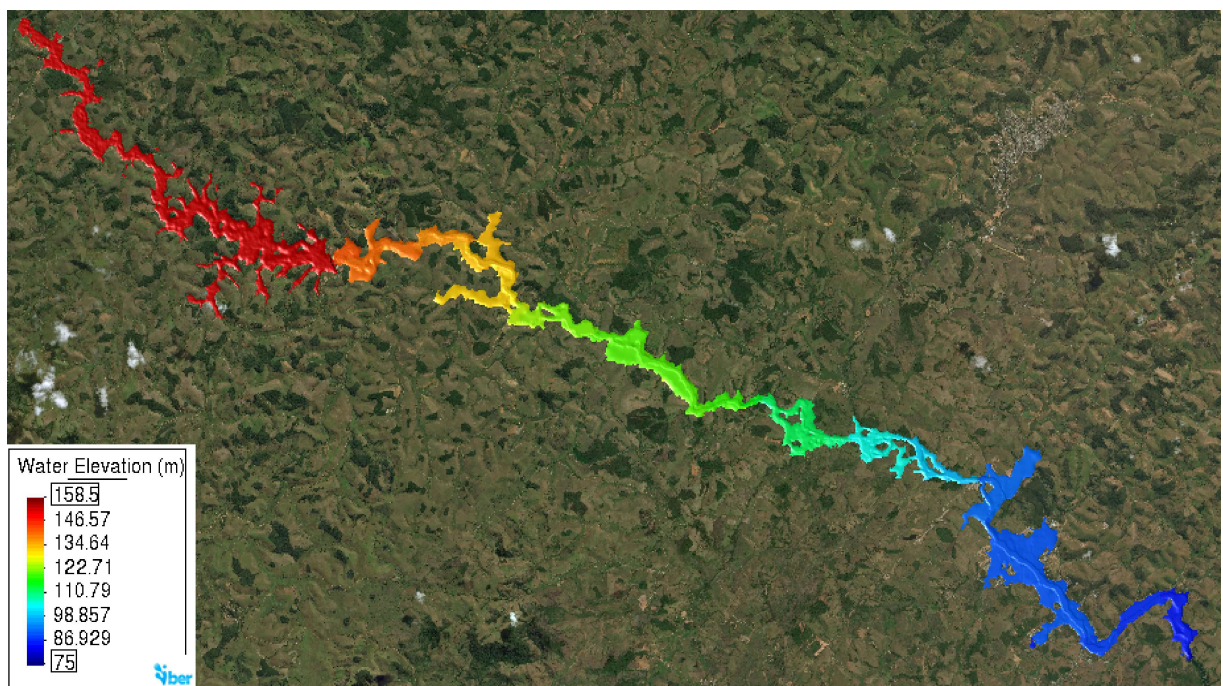


Figura 60 – Mapa de máximo para a elevação da lâmina d'água referente a simulação do Cenário D.

Fonte: A Autora (2022).

Com o intuito de melhor avaliar as diferenças entre os picos das ondas de cheias originados pelos distintos cenários de rompimentos hipotéticos simulados, foram elaboradas as Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Valores da profundidade máxima da lâmina d’água para os distintos cenários analisados.

| Ponte | Cenário A      | Cenário B      | Cenário C      | Cenário D      |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1     | 15,38 <i>m</i> | 14,85 <i>m</i> | 12,97 <i>m</i> | 15,42 <i>m</i> |
| 2     | 16,41 <i>m</i> | 16,57 <i>m</i> | 14,67 <i>m</i> | 16,61 <i>m</i> |
| 3     | 12,96 <i>m</i> | 12,74 <i>m</i> | 11,08 <i>m</i> | 11,84 <i>m</i> |
| 4     | 11,87 <i>m</i> | 11,82 <i>m</i> | 10,59 <i>m</i> | 10,58 <i>m</i> |
| 6     | 11,33 <i>m</i> | 11,27 <i>m</i> | 10,09 <i>m</i> | 10,30 <i>m</i> |
| 7     | 10,72 <i>m</i> | 10,66 <i>m</i> | 9,50 <i>m</i>  | 9,71 <i>m</i>  |

Fonte: A Autora (2022).

Tabela 5 – Valores da elevação máxima da lâmina d’água para os distintos cenários analisados.

| Ponte | Cenário A       | Cenário B       | Cenário C       | Cenário D       |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1     | 136,58 <i>m</i> | 136,06 <i>m</i> | 134,17 <i>m</i> | 136,63 <i>m</i> |
| 2     | 131,90 <i>m</i> | 131,29 <i>m</i> | 129,39 <i>m</i> | 131,32 <i>m</i> |
| 3     | 112,58 <i>m</i> | 112,36 <i>m</i> | 110,69 <i>m</i> | 111,45 <i>m</i> |
| 4     | 91,87 <i>m</i>  | 91,82 <i>m</i>  | 90,60 <i>m</i>  | 90,82 <i>m</i>  |
| 6     | 91,33 <i>m</i>  | 91,27 <i>m</i>  | 90,08 <i>m</i>  | 90,30 <i>m</i>  |
| 7     | 90,72 <i>m</i>  | 90,66 <i>m</i>  | 89,50 <i>m</i>  | 89,71 <i>m</i>  |

Fonte: A Autora (2022).

De acordo com os dados da Tabela 4, onde são apresentados os valores máximos da profundidade da lâmina d’água e, da Tabela 5, a qual contém os valores das respectivas elevações máximas, considerando os Cenários A a D, verifica-se que a maior profundidade ocorreu na ponte 02 do Cenário D, enquanto a menor profundidade deu-se na ponte 07 do Cenário C. Já, no que se refere à análise das elevações máxima e mínima obtidas, tem-se que as mesmas se deram na ponte 01 (Cenário D) e ponte 07 (Cenário C), respectivamente.

Quanto à área mais urbanizada de Santo Antônio de Pádua, onde estão localizadas as duas últimas pontes (pontes 06 e 07), verifica-se que o pior cenário dentre todas simulações realizadas é caracterizado através do Cenário A, o qual gerou as maiores profundidades, e consequentes elevações, da lâmina d’água nas referidas pontes.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são feitos alguns apontamentos com base nos estudos realizados ao longo desse trabalho, bem como nos resultados descritos no capítulo anterior no que diz respeito à modelagem e simulação do rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna, através das informações obtidas pelas simulações e gráficos, como o mapa de inundação a jusante da barragem.

### 6.1 Conclusões

Com o intuito de modelar e investigar o problema abordado nessa dissertação, foi utilizado o software IBER, o qual tem como base a solução das equações de águas rasas (equações de Saint Venant) de forma numérica, utilizando para essa finalidade, o Método dos Volumes Finitos (MVF) e uma discretização do domínio espacial com malhas não estruturadas composta por elementos triangulares.

O critério dos cálculos adotados sobre a propagação da onda de cheia provocada pela ruptura hipotética da barragem sob análise se baseou nas fronteiras a jusante da mesma. Além de um cenário considerado de extrema ruptura, foram realizadas modelagens hidrodinâmicas, gerando os mapas de inundação relacionados às consequentes cheias ocasionadas pelo fluxo de água oriundo do reservatório.

De uma maneira geral, a análise do rompimento hipotético da barragem UHE Barra do Braúna mostrou a necessidade indispensável da fiscalização dos responsáveis técnicos no decorrer e, posteriormente, à sua construção, bem como por órgãos competentes, uma vez que a sua ocorrência acarreta problemas de ordem irreversível, na maioria das vezes.

As primeiras simulações foram responsáveis pela variação do tamanho dos elementos da malha nas superfícies que representam o reservatório, a barragem, o rio, a planície e a área urbanizada. As demais simulações representaram a variação dos coeficientes de rugosidade tanto da região formada simultaneamente pelo reservatório, barragem e rio, quanto da planície e região urbanizada. De acordo com as simulações, foi verificado que um refinamento da malha não estruturada implicou em uma maior consistência nos resultados obtidos, levando, consequentemente, a uma maior estabilidade do modelo.

Da análise dos resultados representados no Capítulo 5, obteve-se as seguintes conclusões:

- As simulações obtidas pelo modelo foram consideradas satisfatórias para representar o escoamento do rio ao longo do seu percurso;

- Os resultados obtidos por meio da solução numérica das equações de Saint Venant tornam-se válidos nos ensaios relacionados à zona estudada quando se usa o software IBER, visto que este representa bem os fenômenos ambientais considerados complexos;
- A verificação do comportamento da lâmina d'água no tempo de ocorrência da onda de cheia provocada pelo rompimento hipotético da barragem ocasiona severos impactos à zona urbana do município de Santo Antônio de Pádua, independente do cenário simulado.

Quanto aos perfis das profundidades e elevações da lâmina d'água apresentados pelos gráficos plotados, algumas conclusões também foram estabelecidas, como:

- Ao analisar a variação da malha espacial no reservatório (Figura 41), conclui-se que o tempo necessário para que a onda de cheia alcançasse a elevação máxima aumentava a partir da ponte 03, quanto maior eram os tamanhos dos elementos adotados;
- Com base na variação da malha espacial na barragem (Figura 42), verificou-se que, assim como ocorrido no reservatório, houve uma redução do tempo necessário para que a onda de cheia chegasse nos pontos tomados como referência (pontes). No entanto, cabe ressaltar, que a malha com elementos de 5 *m* ocasionou a chegada um pouco mais rápida da água nas pontes, quando comparado com a malha de elementos de 2 *m*, fato que, intuitivamente, não era esperado e carece de maior investigação;
- Ao verificar a variação da malha espacial do rio (Figura 43), foi constatado que a ponte, quanto mais próxima da barragem, apresenta menor variação no tempo de chegada da onda de cheia devido ao rompimento da mesma. Constata-se também que o perfil da elevação da lâmina d'água tende a uma estabilidade a partir da malha com elementos de tamanho 25 *m*;
- Na variação da malha na planície (Figura 44), há uma oscilação no tempo de chegada da onda de cheia quando adota-se distintos tamanhos de elementos. Verifica-se, ainda, que as variações na elevação da lâmina d'água são menos representativas para os diferentes elementos adotados quanto comparada com as simulações da variação da malha no reservatório, barragem e rio;
- No que se refere à variação da malha na área urbanizada (Figura 45), percebe-se pouca oscilação em relação tempo de chegada da onda de cheia, diferentemente do que ocorre na elevação da lâmina d'água após o pico da mesma, não sendo possível traçar um perfil do comportamento de ambos em relação ao tamanho de cada elemento adotado, uma vez que diferentes pontes apresentaram maior estabilidade nos resultados para distintos volumes adotados;



- Quanto à variação dos coeficientes de rugosidade de Manning para as respectivas regiões adotadas nesse trabalho (Figuras 46 a 48), entende-se que não houve impactos significativos no que se refere ao tempo de chegada da onda de cheia e elevação da lâmina d'água;
- Com relação ao evento de inundação real simulado no software IBER (Figuras 49 a 51), verifica-se que o modelo conseguiu representá-lo de maneira satisfatória, o que indica uma boa robustez da metodologia aqui proposta para a região investigada;
- Segundo as simulações referentes ao perfil da elevação da lâmina d'água nas pontes analisadas (Figura 52), verificou-se também a resposta à simulação de quatro cenários hipotéticos do rompimento da barragem, tendo como base os dados extraídos do trabalho de Daru et al. (2013), onde foi possível constatar um aumento significativo nas elevações, independentemente do tipo de condição e ruptura investigada;
- No que diz respeito aos mapas de máximo das simulações (Figuras 53 a 60), relacionados à profundidade e à elevação da lâmina d'água, estas atingiram seu maior valor em 16,61 *m* e 136,63 *m*, respectivamente.

Diante das simulações realizadas no software IBER, é possível assegurar a viabilidade do modelo usado para o estudo, considerando-o de grande valia de cunho ambiental, em virtude de promover a simulação dos diferentes cenários e, com isso, fazer do seu uso uma ferramenta auxiliar no processo para a tomada de decisões, em se tratando de eventos de ordem catastrófica, como as ondas de cheias, ocasionadas pelo volume de água oriundo do rompimento de uma barragem.

Assim, nessa perspectiva, todo o trabalho é considerado uma ferramenta de suma importância a fim de avaliar o impacto ambiental, social, econômico, dentre outros, decorrentes das inundações provenientes da ruptura da referida barragem.

Desse modo, a segurança de barragens se apoia em pilares básicos, formados por projeto, construção e monitoramento de forma constante, uma vez que a gestão de segurança de barragens é uma metodologia de minimização dos riscos e tomada de decisões futuras.

Por fim, chegou-se a conclusão de que as consequências geradas com um possível rompimento hipotético da barragem da UHE Barra do Braúna podem atingir grande parte dos, aproximadamente, 43 mil habitantes, bem como diversas edificações e áreas rurais da cidade de Santo Antônio de Pádua, estado do Rio de Janeiro, interferindo completamente na economia local. Logo, entende-se que tal evento, caso venha a ocorrer, representa significativo risco para a população e construções localizadas a jusante à barragem.



## 6.2 Trabalhos Futuros

Como forma de validar a metodologia aqui apresentada, devem ser realizadas investigações quanto à utilização de novos modelos digitais de terreno, bem como novas condições de contorno e também, iniciais (elevação da lâmina d'água inicial no reservatório e curso d'água), além de usar uma malha não estruturada composta de outros elementos geométricos, bem como distintos tamanhos de elementos, visto que a discretização do domínio e consequente aplicação do Método dos Volumes Finitos (MVF) é totalmente dependente da malha adotada.

Como recomendação para trabalhos futuros, são listadas algumas propostas para estudos e, assim, buscar continuidade e aperfeiçoamentos para esta pesquisa realizada:

- Estudar os efeitos produzidos ao variar o ponto de inserção da brecha com a utilização do modelo aplicado neste trabalho;
- Realizar um estudo comparativo do tempo de CPU e dos resultados através de outros softwares voltados às simulações relacionadas à dinâmica fluvial e avaliar seus tempos computacionais;
- Sugere-se, ainda, o prosseguimento das pesquisas propostas neste trabalho, as quais vão além das discussões básicas e iniciais aqui expostas.

## REFERÊNCIAS

- AGEVAP. *4º Relatório sobre a Execução do Contrato de Gestão*. Resende: [s.n.], 2006.
- ALMEIDA, L. Rompimento de barragem da mineradora rio pomba cataguases afeta qualidade da água em mg e no rj. *Revista Brasil Mineral*, Belo Horizonte, 2012.
- ALMEIDA, R. S. *Influências da Implantação da Gestão da Qualidade Total na Cultura e na Identidade Organizacional: Estudo Comparativo de Casos em Duas Organizações Agroindustriais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2001.
- ARASHIRO, L. M. *Topodata: Modelo Digital de Variáveis Topográficas do Brasil*. São José dos Campos: INPE, 2006.
- BASSANEZI, R. C. *Ensino - aprendizagem com Modelagem matemática*. Monografia (Bacharelado em Matemática) — Universidade de Campinas, Campinas, Brasil, 2002.
- BATISTA, B. M. F.; SÁNCHEZ, D. C. M.; SILVA, J. V.; MARTINEZ, D. T.; PASA, M. C. Revisão dos impactos ambientais gerados na fase de instalação das hidrelétricas: Uma análise da sub-bacia do alto juruena- mt. *Biodiversidade*, Universidade Federal do Mato Grosso, v. 11, n. 1, p. 69–85, 2012.
- BRASIL. *Lei Federal nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens*. Brasil: Presidência da República, 2010.
- CESTARI, W. A. *Plano de Ação de Emergência - PAE Barragem da UHE Barra do Braúna - Rio Pomba - Recreio – MG*. Ilha Solteira: Geometrisa, 2020.
- CHARGEL, L. T. *Avaliação do Uso de Modelos Hidrodinâmicos, suas Limitações, Efeitos de Escala e da Representação Topográfica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.
- CONEJO, J. G. L. *Superintendência de Regulação (SRE)*. Brasil: Agência Nacional de Águas, 2016.
- DARU, R. L.; SILVEIRA, R. M.; HAINOSZ, F. S.; BURAS, M. Propagação de ondas de ruptura e plano de ações emergenciais - uhe barra do braúna. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves (RS), 2013.
- ENGEORPS. *Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, RSC - C01 - Relatório dos serviços de campo de cartografia*. Brasília: ANA, SUM/SPR, 2012.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de saint-venant. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, v. 19, n. 04, p. 137–147, 2014.
- FERREIRA, A. R.; JUNIOR, M. C.; SOUZA, M. M. F. Análise dos impactos ambientais na bacia hidrográfica do rio paraguai – cáceres/mt: Risco ecológico para o pantanal matogrossense. *FÓRUM DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO UNIFUNECS*, Santa Fé do Sul (SP), n. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2017.

FERREIRA, D. M.; FERNANDES, C. V. S.; KAVISKI, E. Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, 2016.

FERREIRA, R. Classificação das barragens. *Coletânea nacional sobre engenharia de produção 5: pesquisa operacional*, Goiás, Brasil, 2007.

FONTENELLE, A. S. *Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens do Nordeste Brasileiro - Estudo de Caso: Barragens do Estado do Ceará*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2007.

FRANCO, C. S. S. P. A. *Segurança de Barragens: aspectos relatórios*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2008.

FREITAS, F. F. *Modelagem de Brecha de Barragens de Terra: aplicação do Modelo Breach no Rompimento Hipotético da Barragem do Cipó*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2018.

FUJITA, E. G. *Relatório Técnico - Bacia do Rio Paraíba do Sul - Subsídios às Ações de Melhoria da Gestão 2011*. Brasil: Agência da Bacia do Rio Paraíba do Sul, 2011.

FUSARO, T. C. *Curso Segurança de Barragens*. Brasil: Agência Nacional de Águas, 2011.

GUTSTEIN, D. *Projeto de Estruturas de Barragens de Gravidade de Concreto por meio de Métodos Computacionais: Visão Geral e Metodologia*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2011.

IBER. *Manual de Referencia Hdráulico: Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas*. Espanha: [s.n.], 2014.

JÚNIOR, C. A. N. *Um estudo comparativo analítico-numérico de tensões locais e globais em barragens gravidade de concreto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

LEITE, S. R. *Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Brasília, Brasília, Brasil, 2019.

MACHADO, L. V. T.; AZEEZ, D. G. Incidentes e acidentes em barragens. *7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 355–358, 2018.

MAGRO, G. R. *Modelagem Numérica e Computacional da Hidrodinâmica de Reservatórios utilizando as Equações Bidimensionais de Saint-Venant*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MENDES, L. C. *Usos Múltiplos da Represa formada pela UHE Barra do Braúna em Laramjal - MG*. Monografia (Bacharelado em Geografia) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2016.

- MONTE-MOR, R. C. A. *Mapeamento de Áreas Inundáveis Associadas à Ruptura de Barragens - Estudo de Caso: Barragem de Ninho da Águia - MG*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2004.
- MONTEIRO, C. R. L. *Construção de Modelos Físicos de Barragens de Terra para aula prática*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.
- MONTEIRO, S. M. *Hidrogeoquímica dos elementos maiores e traço no sistema estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim*. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Aracruz, Brasil, 2015.
- MOTA, K. R. R. *Rompimento Hipotético e Delimitação da Área de Inundação da Barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- MOURA, F. M. P. *Estudo Comparativo da Verificação da Estabilidade de Barragens de Gravidade de Concreto Compactado a Rolo a Partir de Modelagem em Elementos Finitos e de Métodos Analíticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2016.
- MOURA, G. N. P. *A Relação entre Água e Energia: Gestão Energética nos Sistemas de Abastecimento de Água das Companhias de Saneamento Básico do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- OLIVEIRA, J. A. *Impactos socioambientais provocados pelo rompimento de barragens de contenção de rejeitos de mineração no estado de Minas Gerais*. Monografia (Bacharelado em Gestão Ambiental) — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Três Rios, Brasil, 2019.
- ORTIS, C. F. F.; SILVA, G. R.; ALMEIDA, H. V.; BRITO, I. F. B.; VICENTINI, A. H. Execução de protótipo da barragem de concreto estrutural com contraforte. *FÓRUM DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO UNIFUNEC*, Santa Fé do Sul (SP), v. 11, n. 11, 2020.
- PAES, D. P. <https://www.folha1.com.br/geral/2022/01/1279059-santo-antonio-de-padua-ja-tem-ruas-tomadas-pelas-aguas-do-rio-pomba.html>. 2022. Disponível em: <<https://www.folha1.com.br/geral/2022/01/1279059-santo-antonio-de-padua-ja-tem-ruas-tomadas-pelas-aguas-do-rio-pomba.html>>. Acesso em: 20 de jan. de 2022.
- PEDROSA, L. *Reavaliação do Sistema de Classificação de Barragens realizado pelo DNPM*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2017.
- PEREIRA, P. R. *Modelagem numérica do comportamento tensão-deformação de barragens de terra: estudo de caso da UHE de São Simão*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2014.
- PERINI, D. S. *Estudo dos Processos Envolvidos na Análise de Riscos de Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2009.

PONTES, M. L. B. *Simulação de Rompimento de Bacia de Rejeito de Mineração no Município de Barcarena/PA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil, 2019.

POSSAN, E. Curso de segurança de barragens, módulo i – barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais, unidade 1: Barragens de concreto. Brasília, 2015.

QUINTAS, F. E. G. *Planeamento da Construção de Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Brasil, 2002.

ROOS, D. O lago de itaipu e a problemática ambiental: Uma análise crítica das questões ambientais na região de fronteira entre brasil e paraguai. *Revista Eletrônica Geoaraguaia. Barra do Garças-MT*, UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, v. 2, n. 1, p. 23–50, 2012.

ROSSETTI, E. K. *Gestão Ambiental: Ecoeficiência a caminho da sustentabilidade: O caso do segmento moveleiro da Serra Gaúcha*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

SANTOS, M. B. *Análise Computacional do Rompimento Hipotético da Barragem de Tucuruí-PA com o Auxílio do Software Mike Flood*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Tucuruí, Brasil, 2017.

SANTOS, R. *Estudos sobre a Geração de Energia Elétrica com Águas Urbanas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, Brasil, 2020.

SANTOS, V. O. *Segurança de barragens de concreto: auscultação por instrumentação da barragem da UHE Dona Francisca – RS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SARTORI, R. Z. *Avaliação Comparativa de Modelos Hidrodinâmicos para Previsão de Inundações: Um Estudo de Caso do Município de Getúlio Vargas-RS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Fronteira do Sul, Erechim, Brasil, 2018.

SCHNEIDER, S. A. *Dimensionamento e Análise de Estabilidade de Barragem de Gravidade em Concreto*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, Brasil, 2011.

SILVA, B. M. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica para avaliação de inundações na zona urbana de Caruaru, PE*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2019.

SILVA, R. R. *Bacia do Rio Pomba (MG): Uso e Ocupação do Solo e Impactos Ambientais nos Recursos Hídricos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2014.

SILVA, S. M. C. *Planos de Bacia na prática: uma análise do planejamento dos recursos hídricos no Estado do Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SIMÕES, A. L. A.; BRITO, R. J. R.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. M.; LOBOSCO, R. J. Aspectos numéricos e físicos de soluções de equações de saint-venant. São Paulo, 2015.



SORIANO, E.; VALENCIO, N. F. L. S. Convergências e divergências acerca das interpretações do risco: O caso da uhe itaipu binacional. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, Universidade de São Paulo, v. 24, p. 208–236, 2012.

SOUSA, F. M. L.; NETO, V. S. C.; PACHECO, W. E.; BARBOSA, S. A. Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos: Sistematização conceitual e modelagem funcional. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, Brasil, 2012.

SOUSA, W. L. *Impacto Ambiental de Hidrelétricas: uma análise comparativa de duas abordagens*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

SOUZA, J. G.; SILVA, I. M. C. F. Classificação de barragem quanto à categoria de risco e dano potencial associado – um estudo de caso. *Revista FENEC*, IV Encontro Regional dos Estudantes de Engenharia Civil, Brasil, p. 246–256, 2017.

SOUZA, M. M. *Estudo para O Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

SOUZA, T. S. A. *Evolução histórica da legislação brasileira e do estado de Minas Gerais relacionado ao tema de disposição de rejeitos de mineração em barragens*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2019.

STEINSTRASSER, C. E. *Método Difusivo de LAX Aplicado na Solução das Equações de Saint Venant*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TOPODATA. *Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil*. 2022. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 17 de abr. de 2022.

TOTTI, M. E. F. *Gestão das Águas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul: Governança, Instituição e Atores*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, 2008.

VIANNA, H. A. *Proposta de Um Sistema de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho no campus da Universidade Federal de Viçosa com Ênfase no Setor Florestal*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 2007.

WISEU, M. I. F. *Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos risco*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2006.

WILLINGHOEFER, M. *Avaliação do Risco de Rompimento da Barragem de Uma Pequena Central Hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2015.

WOLKMER, M. F. S.; PIMMEL, N. F. Política nacional de recursos hídricos: governança da água e cidadania ambiental. *Revista Sequência*, Caxias do Sul, Brasil, v. 34, n. 67, 2013.