



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO
AMBIENTAL

MARLON BRAGA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA
BARRAGEM DE TUCURUÍ-PA COM O AUXÍLIO DO *SOFTWARE*
MIKE FLOOD**

TUCURUÍ – PA
2017

MARLON BRAGA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM
DE TUCURUÍ-PA COM O AUXÍLIO DO *SOFTWARE* MIKE FLOOD**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.
Orientadora: Prof.^a Dra. Viviane Almeida dos Santos.
Coorientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia

TUCURUÍ – PA

2017

MARLON BRAGA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM
DE TUCURUÍ-PA COM O AUXÍLIO DO *SOFTWARE* MIKE FLOOD**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.
Orientadora: Prof.^a Dra. Viviane Almeida dos Santos.
Coorientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia

Tucuruí, 10 de outubro de 2017.

Aprovado por:

Prof.^a Dra. Viviane Almeida dos Santos (PEBGA – UFPA)

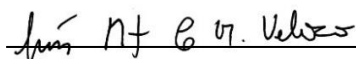
Orientadora

Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia (PEBGA – UFPA)

Coorientadora

Prof.^o Dr. Aarão Ferreira Lima Neto (PEBGA – UFPA)

Examinador interno



Prof.^o Dr. Luís Augusto Conte Mendes Veloso (ITEC – UFPA)

Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237a Santos, Marlon Braga dos
Análise computacional do rompimento hipotético da barragem de Tucuruí-PA com o auxílio do software MIKE FLOOD / Marlon Braga dos Santos. - 2017.
118 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (PEBGA), Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

Orientação: Profa. Dra. Viviane Almeida dos Santos
Coorientação: Profa. Dra. Fernanda Pereira Gouveia.

~~1. Segurança de barragens. 2. Rompimento de barragem. 3. Simulação hidrodinâmica. 4. MIKE FLOOD.~~
I. Santos, Viviane Almeida dos, *orient.* II. Título

CDD 624

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amados pais e minha irmã, pelo carinho, amor, apoio constante e por seus inúmeros esforços para que tudo pudesse dar certo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre me guiar e me dar forças nos momentos mais difíceis desta caminhada. À Ele toda honra e toda glória, agora e para sempre.

Aos meus pais, Dinaldo e Maria, que são os meus maiores incentivadores e que não pouparam esforços (e não foram poucos) para que eu pudesse começar e finalizar este trabalho. A minha gratidão e amor por vocês é imensurável. Também agradeço às minhas irmãs Dayara e Silvia, que mesmo distantes, sempre estiveram torcendo por mim.

À toda minha família, especialmente àqueles que estiveram ao meu lado, que sofreram e comemoraram comigo ao longo desta etapa. Ao meu querido Matheus Gondim, por todo companheirismo, amor e confiança. Obrigado por sempre me dar forças e não me deixar desistir, pelos melhores conselhos e por cuidar de mim tão bem durante todo esse período, só você, assim como eu, sabe o quanto foi difícil.

À família que construí em Tucuruí (Jedson, Marília, Letícia, Vanessa Souza), agradeço todo o carinho e apoio que vocês sempre me deram, vocês são uma parte importante de mim. Aproveito para agradecer também aos alunos Álvaro e Hugo pelo auxílio e incentivo na elaboração dessa dissertação.

À minha amiga Taís e ao pequeno José Luís, que sempre me ouvem, incentivam e acreditam em mim. Não posso deixar de agradecer também aos meus eternos amigos do Thiara e Cia.

À Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí e ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia pela oportunidade ofertada. À todo corpo docente do PEBGA e, de maneira especial, deixo meu muito obrigado à minha coorientadora prof.^a Dr.^a Fernanda Pereira Gouveia, pela dedicação, disponibilidade e profissionalismo, além da motivação e confiança.

À prof.^a Dr.^a Viviane pela orientação, por aceitar o desafio imposto pela pesquisa, assim como pela confiança depositada em mim para a realização deste trabalho. À prof.^a Me. Aline Louzada, suas dicas e sugestões foram essenciais para a gênese dessa pesquisa.

Aos meus parceiros de Mestrado, Raphaela, Davi, Grazielle, Jaqueline, Micheli, Rogério, Lucas pelo companheirismo durante as disciplinas e auxílios nos diversos trabalhos, dividindo angústias e alegrias e tornando essa etapa de nossas vidas acadêmicas muito mais agradável e, de certa forma, inesquecível.

À Eletrobras Eletronorte, na figura dos senhores Acer Viana e Gean, pelo fornecimento de informações de extrema relevância e que foram imprescindíveis para a conclusão desse trabalho. À DHI, especialmente ao Felipe Bier e ao Rafael Medeiros, pela concessão do *software* e pela oportunidade de desenvolver uma pesquisa tão relevante com uma ferramenta do mais alto nível.

Agradeço a todos que contribuíram de maneira direta para a pesquisa, seja com sugestões e críticas construtivas, seja com palavras motivadoras, as quais foram essenciais para que eu alcançasse o objetivo final.

“Escolha sempre o caminho que pareça o melhor, mesmo que seja o mais difícil; o hábito brevemente o tornará fácil e agradável.”

(Pitágoras)

RESUMO

O presente trabalho busca elaborar mapas de inundação e realizar a análise da onda de cheia decorrente do rompimento hipotético da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí) utilizando o *software* comercial MIKE FLOOD. Para tal, considera-se o cenário de galgamento (*overtopping*) e a ruptura total da barragem de concreto da UHE Tucuruí. A metodologia adotada para a pesquisa consistiu na coleta de informações técnicas a respeito do barramento, além do estudo hidrológico das áreas à montante e à jusante da barragem, essenciais para a definição dos parâmetros de entrada no modelo computacional a ser elaborado. A modelagem hidrodinâmica computacional foi realizada em três etapas: a primeira consistiu em uma análise unidimensional no *software* MIKE 11; posteriormente, com o *software* MIKE 21, gerou-se a malha de cálculo triangular para a análise bidimensional; e por fim, procedeu-se à análise acoplada dos dois modelos desenvolvidos anteriormente com o *software* MIKE FLOOD. Os resultados apontaram áreas de inundação de até 84,71 km² para os primeiros cento e dez minutos após o término da formação da brecha de ruptura, com um tempo de resposta de aproximadamente oito minutos para a população residente na área urbana de Tucuruí, indicando alto potencial de perda de vidas humanas. Destaca-se que a mancha de inundação hipotética abrange zonas residenciais e o centro comercial da cidade, assim como diversos equipamentos urbanos e órgãos públicos e uma das mais importantes vias de acesso à cidade, a BR 422, o que restringe a definição de rotas de fuga para evacuação da população afetada. Deste modo, conclui-se que as consequências do rompimento da UHE Tucuruí para o cenário analisado justificam a elaboração de um Plano de Ação de Emergência que garanta a segurança da população à jusante e que minimize os impactos econômicos e ambientais decorrentes de tal evento.

Palavras-chave: Segurança de barragens. Rompimento de barragem. Simulação hidrodinâmica. MIKE FLOOD.

ABSTRACT

Present work seeks to elaborate flood maps and to perform the flood wave analysis, due to the hypothetical break of the dam of the Tucuruí Hydroelectric Power Plant (Tucuruí HPP), using commercial software MIKE FLOOD. For such purpose, are considered, the overtopping scenario and the total rupture of the Tucuruí HPP concrete dam. Methodology adopted for the research consisted of the collection of technical information regarding the damming, in addition the hydrological study of the areas upstream and downstream of the dam, that are essential for the definition of the input parameters in the computational model to be elaborated. Computational hydrodynamic modeling was carried out in three stages: the first consisted of an one-dimensional analysis in MIKE 11 software; subsequently, with the MIKE 21 software, the triangular calculation mesh was generated for the two-dimensional analysis; and finally, the coupled analysis of the two models previously developed with the MIKE FLOOD software was proceeded. Results indicated areas of flood of up to 84.71 km² for the first one hundred and ten minutes after the rupture gap formation, with a reaction time of approximately eight minutes for the resident population in the urban area of Tucuruí, indicating high potential of loss of human life. It should be noted that the hypothetical floodplain covers residential areas and the commercial center of the city, as well as several urban facilities and public agencies, in addition of one of the most important access roads to the city, BR 422, which restricts the definition of evacuation of the affected population. Thus, it is concluded that the consequences of the rupture of the Tucuruí HPP for the analyzed scenario justify the elaboration of an Emergency Action Plan that guarantees the population security the downstream and that minimizes the economic and environmental impacts resulting from such event.

Keywords: Dam safety. Dam break. Hydrodynamic simulation. MIKE FLOOD.

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Maior barragem de gravidade do mundo: Barragem de Três Gargantas (China).....	12
Fotografia 2 – Exemplo de barragem em arco.....	12
Fotografia 3 – Exemplo de barragem de contraforte.....	13
Fotografia 4 – Dimensões finais da brecha de ruptura considerada.....	52
Fotografia 5 – Arranjo geral das estruturas de concreto da UHE Tucuruí.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de uma barragem de terra zoneada.....	10
Figura 2 – Seção transversal típica de uma barragem de enrocamento.....	10
Figura 3 – Seção transversal típica de barragem de terra-enrocamento.....	11
Figura 4 – Principais estruturas associadas de uma barragem de geração de energia hidrelétrica.....	15
Figura 5 – Principais órgãos fiscalizadores de barragens em território nacional.....	21
Figura 6 – Formação da brecha em caso de galgamento (<i>overtopping</i>).....	26
Figura 7 – Representação do processo de formação da brecha de ruptura.....	27
Figura 8 – Mapa de inundação obtido com auxílio do MIKE FLOOD.....	41
Figura 9 – Sequência de métodos da pesquisa.....	43
Figura 10 – Curvas de descarga do vertedouro.....	46
Figura 11 – Delimitação do trecho estudado do rio Tocantins à jusante da UHE Tucuruí.....	47
Figura 12 – Sequência de procedimentos adotados na simulação hidrodinâmica.....	54
Figura 13 – Seções transversais inseridas no <i>software</i> MIKE 11.....	55
Figura 14 – Malha flexível de cálculo elaborada no MIKE 21.....	57
Figura 15 – Distribuição do coeficiente de Manning na planície de inundação.....	58
Figura 16 – Localização da UHE Tucuruí.....	60
Figura 17 – Configuração final dos modelos 1D e 2D acoplados.....	65
Figura 18 – Mancha de inundação seis minutos após o início da ruptura.....	66
Figura 19 – Mancha de inundação quinze minutos após o início da ruptura.....	67
Figura 20 – Mancha de inundação sessenta minutos após o início da ruptura.....	68
Figura 21 – Mancha de inundação cento e dez minutos após o início da ruptura.....	69
Figura 22 – Exemplo de análise de dissipação da onda de cheia.....	71
Figura 23 – Tempos para atingir a cota máxima de inundação.....	73
Figura 24 – Tempo de duração da inundação.....	74
Figura 25 – Visualização dos resultados no módulo MIKE Animator Plus.....	75
Figura 26 – Arranjo geral das estruturas componentes da UHE Tucuruí.....	92
Figura 27 – Corte esquemático da casa de força 1.....	92
Figura 28 – Corte esquemático da casa de força 2.....	93
Figura 29 – Detalhe de áreas inundadas no centro da cidade de Tucuruí.....	97
Figura 30 – Detalhe de áreas inundadas na Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes médios de rugosidade para planícies de inundação.....	31
Tabela 2 – Formulações matemáticas para a determinação da vazão de pico.....	33
Tabela 3 – Hidrogramas de ruptura.....	34
Tabela 4 – Curva cota x área x volume do reservatório da UHE Tucuruí.....	46
Tabela 5 – Coeficientes de rugosidade (n) utilizados no estudo.....	48
Tabela 6 – Parâmetros essenciais de geometria e tempo de formação da brecha de ruptura....	51
Tabela 7 – Vazões de pico calculadas para diferentes equações empíricas.....	52
Tabela 8 – Seções transversais principais inseridas no <i>software</i> MIKE 11.....	54
Tabela 9 – Características técnicas do barramento da UHE Tucuruí.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Levantamento de ocorrências com barragens de usinas hidrelétricas.....	19
Quadro 2 – Matriz de classificação de barragens para geração de energia.....	22
Quadro 3 – Parâmetros para a formação da brecha em barragens de concreto.....	28
Quadro 4 – Modelo de planilha utilizada para a classificação da barragem.....	44
Quadro 5 – Classificação da barragem de Tucuruí quanto à categoria de risco e ao DPA.....	63
Quadro 6 – Pontuação para classificação da UHE Tucuruí.....	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Número de grandes barragens por país.....	7
Gráfico 2 – Porcentagem de barragens cadastradas pela ICOLD classificadas de acordo com seu uso.....	8
Gráfico 3 – Porcentagem de grandes barragens de acordo com seu material e técnica construtiva.....	14
Gráfico 4 – Série histórica de vazões defluentes da UHE Tucuruí.....	49
Gráfico 5 – Hidrograma de ruptura adotado na simulação hidrodinâmica.....	53
Gráfico 6 – Curva chave para a estação fluviométrica de Tucuruí.....	56
Gráfico 7 – Níveis d’água medidos e simulados para o ano de 2012 na estação fluviométrica de Tucuruí.....	64
Gráfico 8 – Hidrograma da seção transversal 6.034,35 (centro da cidade de Tucuruí-PA).....	70
Gráfico 9 – Níveis d’água da seção transversal 6.034,35 (centro da cidade de Tucuruí-PA)..	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer</i>
BIG	Banco de Informações da Geração
CBDB	Comitê Brasileiro de Grandes Barragens
CBRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DHI	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
ICOLD	<i>International Commission On Large Dams</i>
IML	Instituto Médico Legal
MDE	Modelo Digital de Elevação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NPDP	<i>National Performance of Dams Program</i>
NWS	<i>National Weather Service</i>
OGHTC	Setor de Manutenção Civil da Superintendência de Geração Hidráulica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAE	Plano de Ação Emergencial
PAEBM	Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
RAS	<i>River Analysis System</i>
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

MW	Megawatt
n	Coeficiente de rugosidade ou de Manning
m	Metro
km	Quilômetro
Q	Vazão
h	Altura da coluna d'água
h_{bm}	distância vertical entre a base inferior da brecha de ruptura e a fundação da barragem
x	Distância ao longo do rio
t	Tempo
A	Altura de abertura dos vertedouros
L	Largura da superfície de água
K	Capacidade de transporte
g	Aceleração da gravidade
q	Fluxo lateral
β	Fator de distribuição do fluxo
Q_p	Descarga máxima defluente da barragem em ruptura
V	Volume do reservatório para o NA máximo
A_s	Área do reservatório para o NA máximo
B_d	Largura da barragem
H_d	Altura da barragem
B_b	Largura final da brecha
H_b	Altura final da brecha
$Y_{médio}$	Profundidade média no reservatório no instante da ruptura
T_p	Tempo de formação da brecha
T_b	Tempo de base
K	Fator de ponderação para o hidrograma de ruptura
z	Parâmetro de forma da brecha de ruptura

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.1.1. Objetivo Geral	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. JUSTIFICATIVA	3
1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA	4
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1. BARRAGENS: ASPECTOS GERAIS	6
2.1.1. Tipos de barragens	7
2.1.2. Barragens para geração de energia hidrelétrica	14
2.2. SEGURANÇA DE BARRAGENS	16
2.2.1. Acidentes com barragens	17
2.2.2. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)	20
2.2.2.1. <i>Sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por DPA</i>	21
2.2.2.2. <i>Plano de Segurança de Barragem</i>	23
2.3. ROMPIMENTO DE BARRAGENS	25
2.3.1. Parâmetros de formação da brecha	27
2.3.2. Hidrograma defluente e mapas de inundação	29
2.3.2.1. <i>Fatores determinantes</i>	29
2.3.2.2. <i>Cenários de ruptura</i>	31
2.3.2.3. <i>Determinação da vazão máxima e hidrogramas de ruptura</i>	32
2.3.2.4. <i>Elaboração de mapas de inundação</i>	35
2.4. MODELOS HIDRODINÂMICOS COMPUTACIONAIS	35
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA	42
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA UHE TUCURUÍ	43
3.2. COLETA DE DADOS HIDROLÓGICOS E TOPOBATIMÉTRICOS	45
3.2.1. Dados hidrológicos	45
3.2.1.1. <i>Volume do reservatório</i>	45
3.2.1.2. <i>Curva de descarga das estruturas extravasoras</i>	46
3.2.1.3. <i>Canal à jusante</i>	47
3.2.2. Dados topobatimétricos	49

3.3.	DEFINIÇÃO DO CENÁRIO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	50
3.3.1.	Brecha de ruptura.....	51
3.3.2.	Cálculo do hidrograma de ruptura	52
3.4.	SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COMPUTACIONAL	53
3.4.1.	MIKE 11	54
3.4.1.1.	<i>Seções transversais</i>	54
3.4.1.2.	<i>Condições de contorno</i>	55
3.4.1.3.	<i>Calibração do modelo 1D</i>	56
3.4.2.	MIKE 21	57
3.4.3.	MIKE FLOOD.....	58
3.4.3.1.	<i>Comportamento da onda de cheia</i>	59
3.4.3.2.	<i>Elaboração do mapa de inundação georreferenciado</i>	59
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS		60
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DA UHE TUCURUÍ.....	60
4.1.1.	Aspectos operacionais das estruturas extravasoras	62
4.1.2.	Classificação da barragem quanto à categoria de risco e DPA	63
4.2.	SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COMPUTACIONAL	64
4.2.1.	Calibração e configuração final do modelo hidrodinâmico.....	64
4.2.2.	Mapas de inundação georreferenciados.....	65
4.2.2.1.	<i>Análise das áreas inundadas</i>	65
4.2.2.2.	<i>Análise do hidrograma de ruptura</i>	70
4.2.2.3.	<i>Tempo para atingir a cota máxima de inundação</i>	72
4.2.2.4.	<i>Duração da inundação</i>	73
4.2.3.	Desempenho do <i>software</i> MIKE FLOOD	74
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS....		76
5.1.	CONCLUSÕES	76
5.1.1.	Caracterização da UHE Tucuruí.....	76
5.1.2.	Simulação hidrodinâmica computacional (rompimento hipotético)	76
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		79
ANEXO A – CRITÉRIOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS – RESOLUÇÃO ANEEL N° 696/2015.....		85

ANEXO B – ARRANJO GERAL DAS ESTRUTURAS E CORTE ESQUEMÁTICO DAS CASAS DE FORÇA 1 E 2 DA UHE TUCURUÍ91

APÊNDICE A – TABELA DE PONTUAÇÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM DA UHE TUCURUÍ CONFORME RESOLUÇÃO ANEEL N° 696/201594

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO NA ÁREA CENTRAL DA CIDADE DE TUCURUÍ E NA VILA RESIDENCIAL DA ELETROBRÁS ELETRONORTE96

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou líquidas e sólidas, compreendendo não só o barramento, mas também suas estruturas associadas (BRASIL, 2010). Tais estruturas são construídas para os mais diversos fins, destacando-se a acumulação de água para o aproveitamento hidrelétrico, controle de cheias e inundações e irrigação.

O rompimento de barragens é um fenômeno complexo e que traz prejuízos econômicos, sociais e ambientais ao vale à jusante e à montante do barramento. No Brasil e no mundo, diversos são os eventos de ruptura de barragens, que quase sempre culminam em perda de vidas humanas e provocam prejuízos econômicos e ambientais às localidades afetadas. Em 2015, no Brasil, o rompimento da barragem de Fundão contendo rejeitos minerais da empresa Samarco Mineração S.A., no município de Mariana-MG, provocou um dos maiores desastres ambientais da história do país, além de deixar dezoito vítimas fatais e uma pessoa desaparecida (MARTA-ALMEIDA *et al.*, 2016).

Para Cheng *et al.* (2011) pelo risco a que a população está exposta, deve-se aumentar o interesse na gestão de segurança de barragens. Tal segurança pode ser garantida através de um gerenciamento integrado de risco e emergência (VERÓL *et al.*, 2013). Diante de tal necessidade e visando diminuir os acidentes envolvendo tais estruturas em território nacional, o Governo Federal promulgou, em 2010, a lei nº 12.334 que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A PNSB estabelece como instrumentos de suporte à sua implementação o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado, o Plano de Segurança da Barragem e o Relatório de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010). Dentre estes, destaca-se o Plano de Segurança da Barragem, que deve conter informações sobre o empreendedor e dados técnicos da estrutura, manuais de procedimentos, roteiros de inspeção das estruturas e, se necessário, o Plano de Ação de Emergência (PAE).

Para barragens destinadas à geração de energia hidrelétrica, a resolução normativa nº 696/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece o prazo legal para aquelas classificadas em categoria de risco alta e média, conforme classificação apresentada pela resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 143/2012, elaborarem

seu PAE. Tal documento deve conter as hipóteses de ruptura da barragem, estudo da onda de cheia e mapa de áreas inundadas, além de ações que deverão ser tomadas pela sociedade e órgãos da Defesa Civil nas áreas afetadas.

A simulação de ruptura de uma barragem é uma operação complexa e que exige o levantamento de uma grande quantidade de dados, especialmente hidrológicos e topográficos. Nesse sentido, há dois parâmetros de grande relevância para a obtenção de resultados satisfatórios, que são a formação da brecha e a modelagem da onda de cheia que será formada no vale à jusante. Para Lodhi e Agrawal (2012) a escolha do modelo de simulação vai depender das condições que prevalecem no local analisado e da disponibilidade de dados existentes.

Historicamente, a modelagem do comportamento hidráulico após a ruptura tem sido realizada em duas abordagens principais: modelos unidimensionais (1D), que consideram o fluxo de água apenas na direção de escoamento do rio, desprezando as suas margens ou bidimensionais (2D), onde o fluxo tem comportamento distinto na calha do rio e nas margens do mesmo (MARZOCCHI *et al.*, 2014). Vale destacar, o desenvolvimento de *softwares* comerciais que facilitam o processo de cálculo e que reduzem significativamente o tempo de simulação. Além disso, os mais recentes incluem o processo de formação da brecha, o hidrograma defluente e seu comportamento no vale à jusante, além de proporcionar soluções práticas com equações simplificadas, porém eficazes, para descrever o fenômeno em análise (TSAKIRIS e SPILIOTIS, 2013).

Diante do exposto, o presente trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: o que aconteceria e quais áreas seriam inundadas caso ocorresse o rompimento da barragem de concreto da Usina Hidrelétrica de Tucuruí? Para tal, realiza-se uma análise computacional do rompimento hipotético da referida barragem, utilizando o *software* comercial MIKE FLOOD, a fim de obter áreas aproximadas de inundação e embasar estudos futuros, inclusive fornecendo subsídios para a definição de diretrizes do PAE.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral elaborar mapas de inundação e analisar a onda de cheia decorrente do rompimento hipotético considerando o cenário de galgamento (*overtopping*) da barragem de concreto da Usina Hidrelétrica de Tucuruí – PA com o auxílio do *software* comercial MIKE FLOOD.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a barragem em estudo e proceder a sua classificação segundo a categoria de risco e dano potencial associado;
- Realizar o estudo hidrológico da área de drenagem das bacias contribuintes, assim como dos dados topobatimétricos da área analisada;
- Definir os parâmetros de formação da brecha e de calibração do modelo a ser adotado para a ruptura da barragem;
- Utilizar o *software* comercial MIKE FLOOD, da empresa dinamarquesa Danish Hydraulic Institute (DHI), para simular a dissipação da onda de cheia e gerar os mapas de inundação da área à jusante do barramento, verificando assim a eficiência de seu uso em tais estudos.

1.2. JUSTIFICATIVA

A Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída pela lei nº 12.334/2010, estabelece o sistema nacional de classificação de barragens, que deve respeitar o disposto na resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 143/2012, onde os barramentos são classificados de acordo com sua categoria de risco, seu Dano Potencial Associado (DPA) e volume de reservatório. Nesse contexto, a Usina Hidrelétrica de Tucuruí deve, obrigatoriamente, elaborar seu Plano de Ação de Emergência até dezembro de 2017, conforme a resolução nº 696/2015 da ANEEL.

Apesar da obrigatoriedade, a UHE Tucuruí, que tem potência instalada de 8.535 MW, ou cerca de 10% da capacidade hidrelétrica atual no país, sendo uma das maiores usinas hidrelétricas do mundo (NOGUEIRA, 2016), ainda não possui pesquisas orientadas para a análise do seu rompimento hipotético, com avaliação das áreas atingidas e danos ocasionados por tal evento, o que prejudica a sua gestão de segurança e a articulação de medidas para a elaboração do PAE.

A existência de área urbana a poucos quilômetros à jusante do barramento agrava os danos econômicos, sociais e ambientais que ocorrerão na área alagada e em suas adjacências. Nesse sentido, a definição das áreas que serão inundadas se torna relevante para articular medidas que irão mitigar os impactos ocasionados pela ruptura da barragem, dando suporte às ações dos órgãos públicos de Defesa Civil em situação de emergência em conjunto com a população possivelmente atingida.

A utilização de modelos hidrodinâmicos computacionais para estudos de rompimento hipotético de barragens agrega diversas vantagens ao processo de simulação e possibilita representações mais realísticas dos fenômenos físicos envolvidos no processo. O uso do *software* comercial MIKE FLOOD nesta pesquisa se deve, principalmente, à sua vantagem de análise acoplada, tendo assim os benefícios fornecidos pelas abordagens uni e bidimensionais, minimizando as limitações de cada uma delas individualmente e permitindo um menor tempo de computação.

1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A simulação hidrodinâmica será realizada considerando apenas uma hipótese de ruptura, ou seja, há uma limitação de cenários analisados. Porém, por se tratar de uma pesquisa que visa primordialmente validar a utilização de um *software* comercial recente para os estudos de rompimento hipotético de barragens, tal limitação não inviabiliza a obtenção dos resultados.

Segundo Lara (2016), os estudos de ruptura de barragens focam no pior caso e cenário de ruptura do barramento, quase sempre baseados em metodologias determinísticas, o que pode gerar uma superestimação das áreas inundadas. Sendo assim, o ideal seria utilizar metodologias probabilísticas, principalmente para estimar a formação da brecha, para que a

estimativa de área inundada seja aprimorada e se aproxime da realidade. Porém, o presente estudo utilizará a metodologia determinística para estimativa desse parâmetro.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, que serão sucintamente descritos a seguir, com uma pequena abordagem da temática principal presente em cada um deles:

Capítulo 2 – Referencial teórico – expõe-se revisão da literatura a cerca de: barragens, seus tipos e usos; segurança de barragens, levantamento de acidentes ocorridos nos últimos anos e enfoque na PNSB; parâmetros essenciais nos estudos de ruptura hipotética de barragens; e, por fim, uma análise dos principais modelos hidrodinâmicos computacionais utilizados nos estudos de rompimento hipotético.

Capítulo 3 – Metodologia da Pesquisa – apresenta as principais etapas para a elaboração da pesquisa, como os procedimentos para a obtenção de dados hidrológicos e topobatimétricos; definição de parâmetros de formação da brecha e outros necessários para a calibração da simulação computacional; a abordagem utilizada na análise da onda de cheia e dos mapas de inundação.

Capítulo 4 – Apresentação e discussão dos resultados – expõem-se os resultados obtidos para a caracterização da barragem da UHE Tucuruí e a simulação hidrodinâmica computacional de rompimento hipotético realizada com o auxílio do *software* comercial MIKE FLOOD, com enfoque nos mapas de inundação georreferenciados e análise dos tempos para atingir as cotas máximas em cada ponto de controle.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros - apresenta as conclusões gerais observadas a partir dos resultados obtidos na simulação de rompimento, verificando o atendimento aos objetivos propostos por este trabalho. Além disso, sugerem-se temas para futuras pesquisas na área.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os usos e tipos de barragens, com ênfase naquelas utilizadas para a geração de energia hidrelétrica e suas estruturas associadas, a importância da elaboração de planos de segurança de barragens e do Plano de Ação de Emergência, os principais aspectos que devem ser considerados em estudos de rompimento hipotético, além do estudo de modelos hidrodinâmicos computacionais para realizar a simulação do mesmo.

2.1. BARRAGENS: ASPECTOS GERAIS

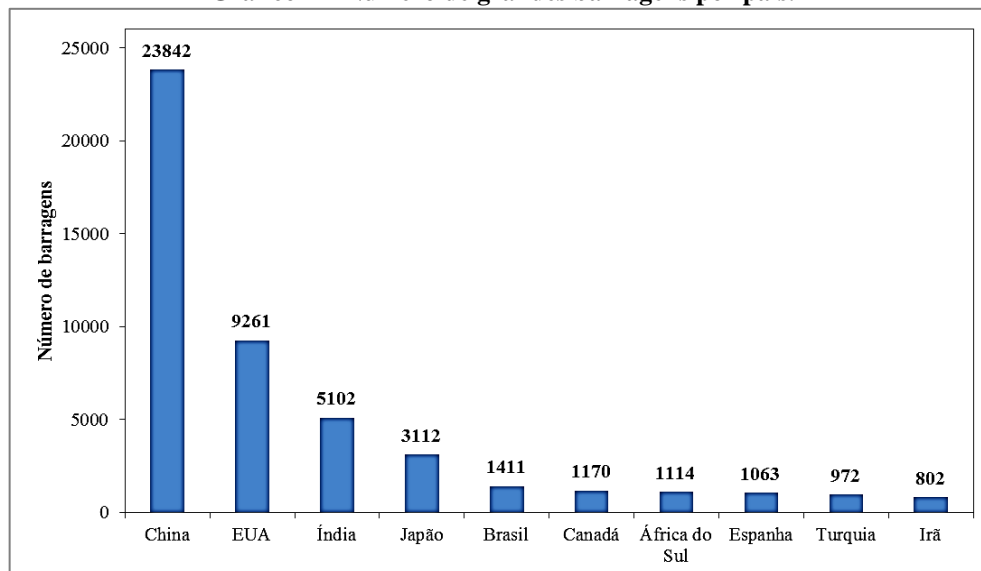
As barragens são definidas como estruturas que cruzam córregos, rios ou canais para confinar e controlar o fluxo de água nos mesmos (ICOLD, 2008). Para o CNRH (2012), além de controlar o fluxo de água, as barragens podem acumular substâncias líquidas ou mistura de líquidos e sólidos, compreendendo não somente o barramento, mas também estruturas associadas. As principais estruturas associadas são: casa de força, estruturas de descarga, eclusas e tomadas d'água.

As barragens sempre desempenharam papel vital para o desenvolvimento humano. Historicamente, elas são utilizadas para inibir a irregularidade e imprevisibilidade do fluxo de água, que pode ocasionar inundações severas em alguns anos e condições de seca em anos subsequentes. O armazenamento de água é fundamental para todas as nações, especialmente para aquelas em desenvolvimento, onde esse pode ser o único meio de desenvolver economicamente tal recurso (JESUS, 2011). Nesse sentido, as barragens agregam diversos benefícios para a sociedade, tais como: controle de inundações, geração de energia elétrica e abastecimento de água (PENG; ZANG, 2012).

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2011) define grandes barragens como aquelas que possuem quinze ou mais metros de altura do ponto mais baixo da fundação até a crista, ou altura entre cinco e quinze metros e capacidade de represar volumes maiores que três milhões de metros cúbicos. O Registro Mundial de Barragens da ICOLD possui 58.519 barramentos de grande porte cadastrados em países de todo o mundo, sendo a principal fonte de dados da área. Vale ressaltar, que esse número pode ser bastante superior, uma vez que empreendimentos que não possuem cadastro são ignorados pela base de dados.

No Gráfico 1 são apresentados os dez países com o maior número, e suas respectivas quantidades, de grandes barragens.

Gráfico 1 – Número de grandes barragens por país.



Fonte: Adaptado de ICOLD (2016).

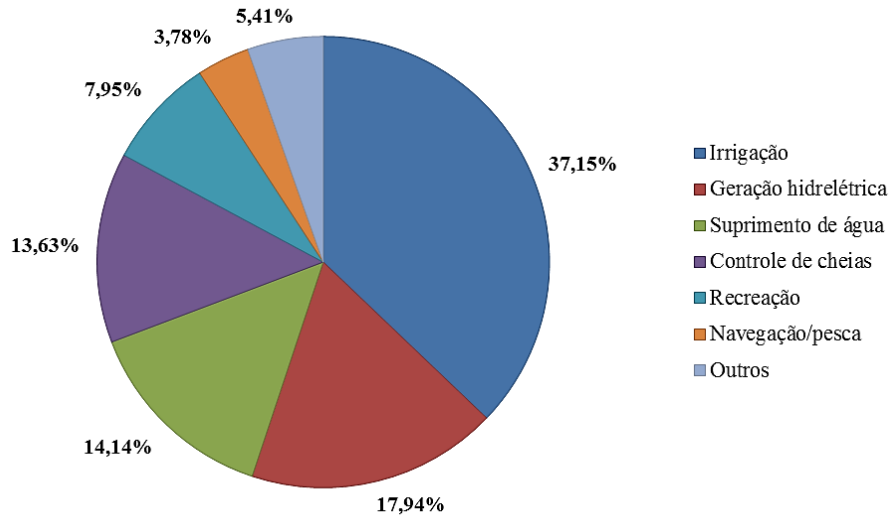
Nota-se pelo Gráfico 1, que o Brasil figura entre os cinco primeiros colocados no *ranking* de países com o maior número de grandes barragens, com cerca de 2,4% do total de barragens cadastradas pela ICOLD. Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), as dimensões das barragens podem variar desde pequenos maciços de terra, geralmente localizados em áreas rurais, a enormes estruturas de concreto ou de aterro. O desenvolvimento de empreendimentos desse tipo em território nacional se deu basicamente para combater os efeitos da seca na região nordeste, a partir do século XIX e também, com o intuito de geração hidrelétrica e contenção de rejeitos da atividade mineradora, principalmente na região sudeste (CBDB, 2011).

2.1.1. Tipos de barragens

A ICOLD apresenta uma classificação abrangente para as diversas barragens existentes, a qual leva em consideração o uso do reservatório. Nesse sentido, as barragens podem ser de uso único ou podem ter múltiplos usos. Os projetos de barragens de usos múltiplos são especialmente importantes e economicamente viáveis para países em desenvolvimento, uma vez que a população recebe vários benefícios domésticos e econômicos a partir de um único investimento (ICOLD, 2008). O Gráfico 2 apresenta o percentual de barragens cadastradas pela ICOLD de acordo com seu uso, destacam-se as

seguintes funções: irrigação, geração de energia hidrelétrica, suprimento de água para uso doméstico e industrial, navegação interior, controle de cheias e recreação.

Gráfico 2 – Porcentagem de barragens cadastradas pela ICOLD classificadas de acordo com seu uso.



Fonte: Adaptado de ICOLD (2016).

O *Bureau of Reclamation* (1987) utiliza a classificação de barragens de acordo com características técnicas e de construção, destacando-se duas categorias de análise: a finalidade de sua construção e a constituição do corpo do barramento, ou seja, quais os materiais e técnicas construtivas que são empregados em cada empreendimento.

a) Segundo a finalidade:

As barragens para formar reservatórios permitem a captação e armazenamento de água durante períodos de cheias, de modo que o volume armazenado neste período possa suprir a demanda nos períodos de estiagem, sendo muito utilizada em pequenos empreendimentos, como açudes (QUINTELA, 1990 *apud* MARCELINO, 2015).

As barragens de retenção se caracterizam por conter grande parte do material sólido afluente ou deter temporariamente cheias, restituindo uma vazão compatível com a capacidade de transporte do curso d'água existente à jusante, evitando assim inundações em determinadas zonas (QUINTELA, 1990 *apud* MARCELINO, 2015). Uma vez que criam reservatórios, podem ser utilizadas para a geração de energia hidrelétrica e constituir vias navegáveis.

Barragens de desvio são aquelas que se destinam a criar condições para captar água para canais ou áreas específicas, para os mais diversos usos, como o consumo público, a irrigação, assim como a produção de energia elétrica sem inundar grandes áreas à montante do barramento – usinas a fio d'água (QUINTELA, 1990 *apud* MARCELINO, 2015).

b) Segundo seu material de construção e tipologia construtiva

De acordo com este critério, os barramentos podem ser divididos em dois grupos: barragens de aterro e barragens de concreto. As barragens de aterro são construídas em vales largos, onde haja áreas de empréstimo de material próximas para compor o corpo do barramento, normalmente são solos argilosos ou arenosos sobre uma fundação com características geotécnicas deficientes. Caracterizam-se ainda, por uma base de grandes dimensões, principalmente quando comparadas às barragens em concreto, garantindo uma distribuição de tensões uniforme e o alívio de pressões na fundação (RAMOS, 2011).

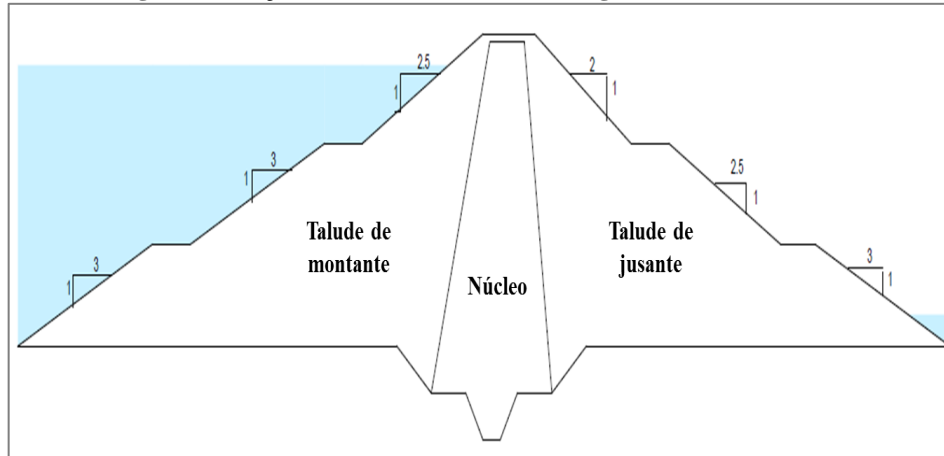
Vale destacar que as barragens de aterro não podem ser galgadas pela água ou pelo fluído que estiver sendo armazenado, uma vez que tal fenômeno pode ocasionar seu colapso estrutural. Logo, na fase de projeto, deve-se considerar a cota de coroamento superior ao nível máximo de cheia previsto para o reservatório (MARCELINO, 2015). Também é essencial proceder ao revestimento dos paramentos à montante e à jusante da barragem, evitando seu desgaste excessivo e, por conseguinte, a ocorrência de erosão interna ou percolação excessiva de água no interior do maciço.

O paramento à montante, que é exposto à ação natural da água do reservatório, deve ser revestido com uma camada de enrocamento (rochas de diferentes granulometrias) ou placas de concreto, o que possibilita estruturas mais altas e com taludes mais inclinados, aumentando a economia de material. Já no paramento à jusante, o objetivo é reduzir efeitos erosivos que são ocasionados pela precipitação, em geral, utilizam-se revestimentos em enrocamento ou com a aplicação de camada vegetal (SOUSA, 2011).

As barragens de aterro podem ser executadas em terra, enrocamento, ou ainda, numa associação dos dois materiais. Quando classificadas como de terra, devem apresentar mais de 50% de seu corpo constituído por solo compactado. Podem ser homogêneas, quando há predominância de um único material ou zoneadas, nas quais são feitos zoneamentos terrosos

em função das características de permeabilidade do material, priorizando o núcleo argiloso impermeável (Figura 1).

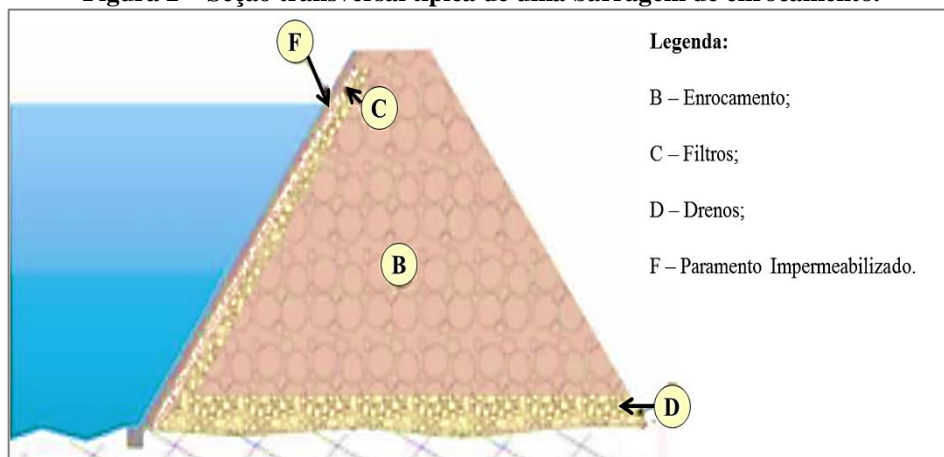
Figura 1 – Seção transversal de uma barragem de terra zoneada.



Fonte: Adaptada de Raja e Maheshwari (2016).

As barragens de enrocamento devem apresentar mais de 50% do volume de seu corpo constituído por tal material. A estabilidade da estrutura é garantida pela ação gravitacional no maciço granular (particulado, de dimensões variáveis e com significativa permeabilidade) devidamente compactado, e pela correta inclinação dos taludes. Além disso, há uma zona impermeável no talude à montante que assegura a estanqueidade e evita a erosão interna da barragem (Figura 2).

Figura 2 – Seção transversal típica de uma barragem de enrocamento.

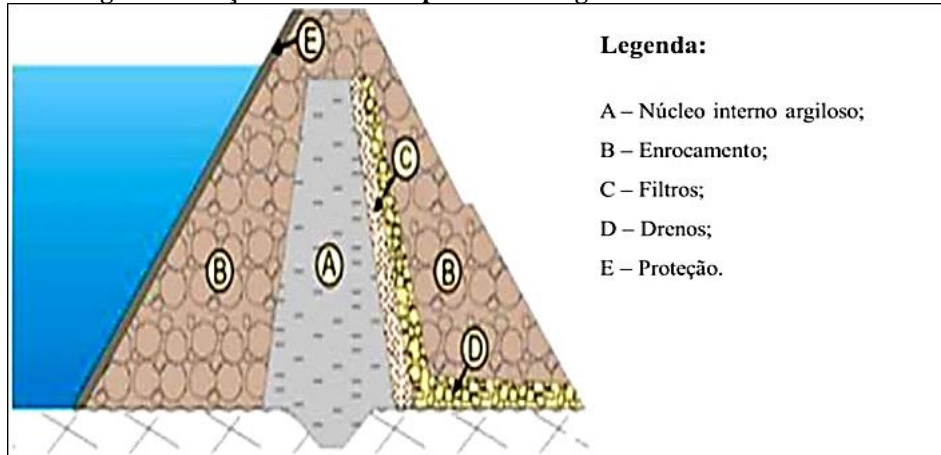


Fonte: Adaptado de Marcelino (2015).

As barragens de terra-enrocamento (Figura 3) são construídas em regiões onde existe escassez de material para a integral construção do aterro e a utilização de concreto pode tornar a obra demasiadamente cara e mais demorada (RAMOS, 2011). Portanto, utilizam-se solos

com diferentes permeabilidades e granulometria, priorizando o núcleo argiloso central impermeabilizante e os paramentos à montante e à jusante compostos por enrocamento.

Figura 3 – Seção transversal típica de barragem de terra-enrocamento.



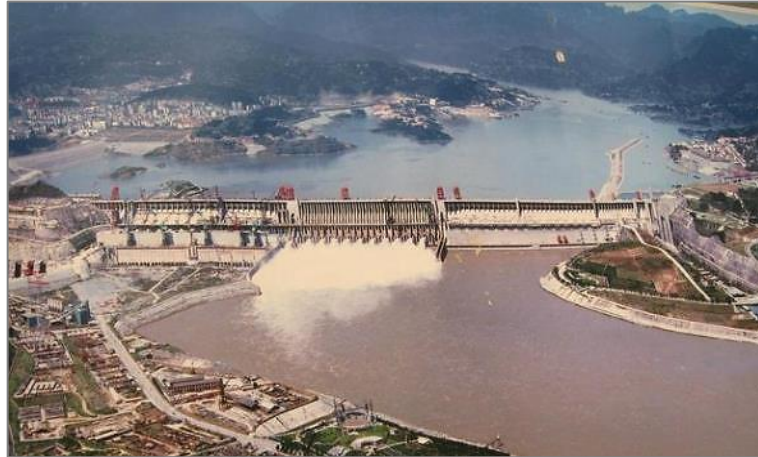
Fonte: Adaptado de Ramos (2011).

Para Ramos (2011) as barragens de concreto são construções muito resistentes, no entanto, exigem maior rigor na elaboração e execução do projeto, uma vez que pequenos erros podem levar à redução da resistência mecânica do concreto e, conseqüentemente, o rompimento da estrutura. A literatura técnica aponta três tipologias principais: barragens de gravidade, em arco e de contrafortes.

As barragens de gravidade são aquelas em que a resistência ao impulso hidrostático, provocado pela ação da água no reservatório, é garantida pelo seu peso próprio e os esforços são diretamente transmitidos ao solo de fundação. Deste modo, a análise e tratamento dos maciços da base e a execução das fundações se tornam ainda mais importantes neste tipo de estrutura. Quanto à geometria, é frequente a adoção de perfil triangular, o que aumenta a área de concreto na seção de contato com o terreno, assim, garante-se maior estabilidade da estrutura e um comportamento mais satisfatório em relação às ações de deslizamento (SOUSA, 2011).

Quanto ao processo construtivo, as barragens de gravidade podem ser executadas em concreto convencional (processo mais antigo), com aplicação de concreto massa e vibração tradicional ou em concreto compactado com rolo (CCR). Na Fotografia 1 é mostrada a maior barragem de gravidade do mundo, a Barragem de Três Gargantas (*Three Gorges Dam*), localizada no maior rio da China, o Yang-Tsé. O corpo do barramento tem mais de mil e seiscentos metros de extensão e altura total de cento e oitenta e seis metros, sua geração hidrelétrica tem a maior potência instalada do mundo com 18.200 MW.

Fotografia 1 – Maior barragem de gravidade do mundo: Barragem de Três Gargantas (China).



Fonte: Herrmann (2011).

As barragens em arco (Fotografia 2) são construídas em vales estreitos, o que permite que sua altura seja, por vezes, maior que o comprimento de seu corpo. O funcionamento e a estabilidade da estrutura são garantidos por sua geometria, uma vez que o arco resiste com facilidade a cargas uniformemente distribuídas em seu dorso (explorando a boa resistência à compressão do concreto). Para sua viabilidade técnica devem existir condições naturais especiais, como margens altas constituídas por rocha resistente e são (SOUSA, 2011; RAMOS, 2011).

Fotografia 2 – Exemplo de barragem em arco.



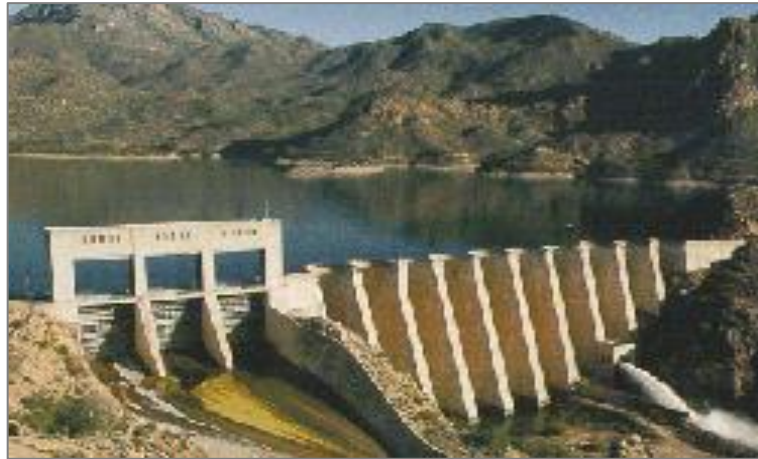
Fonte: United States Society on Dams (2017).

Diferente do que acontece em barragens de gravidade, onde o peso próprio da estrutura garante a sua estabilidade estrutural, o arranjo construtivo em arcos exige maior rigor na seleção de materiais, uma vez que se deve assegurar a capacidade resistente às tensões de tração e compressão que atuarão sobre o arco. Outra vantagem desse tipo de barragem em relação às de gravidade é que devido à sua esbeltez (relação

altura/comprimento), o volume de concreto utilizado é reduzido. Sua principal desvantagem está no fato de que o projeto e a execução são bem mais complexos (MARCELINO, 2015).

Em uma barragem de contraforte, o comportamento estrutural assemelha-se ao de uma laje na posição vertical (à montante), suportada por vários apoios (contrafortes), onde as cargas atuantes no corpo da barragem são transmitidas aos contrafortes e encaminhadas para o terreno de fundação, conforme mostra a Fotografia 3. Nesse tipo de barragem, pequenas infiltrações de água não colocam em risco a sua segurança (SOUSA, 2011). Por outro lado, o seu uso exige maior controle e tratamento dos solos de fundação, pois é necessário que o solo tenha boa resistência, além do emprego de mão de obra altamente qualificada.

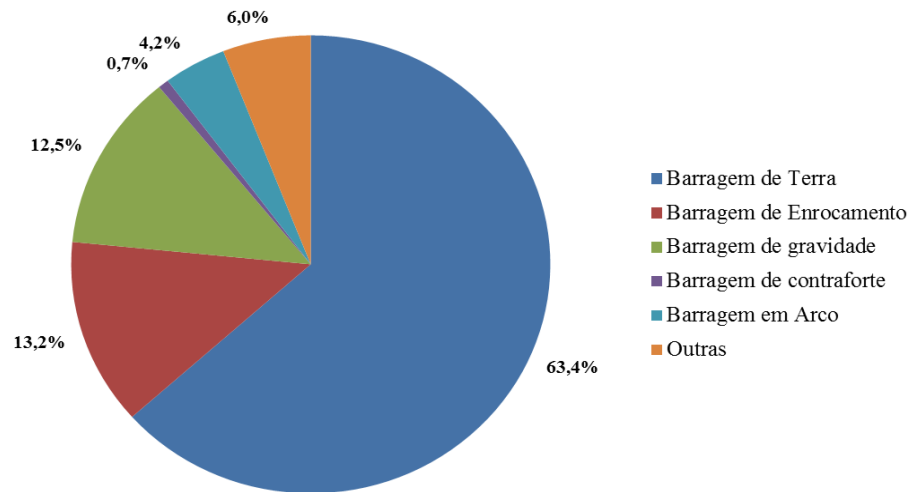
Fotografia 3 – Exemplo de barragem de contraforte.



Fonte: United States Society on Dams (2017).

Atualmente, as barragens de aterro (terra e/ou enrocamento) são as mais numerosas em todo o mundo, correspondendo a pouco mais de 75% das grandes barragens registradas pela ICOLD. Trata-se do tipo de barramento mais antigo, tanto que algumas estruturas de civilizações passadas permanecem em funcionamento até hoje, sendo preferíveis em relação a barragens de concreto de gravidade devido à sua construção simples e relativa vantagem econômica, proporcionada pela disponibilidade local de materiais e utilização de mão de obra menos qualificada (RAJA; MAHESHWARI, 2016). Para as barragens de concreto, as mais numerosas são as de gravidade, uma vez que possuem menores exigências das condições naturais do solo de fundação e das margens. O Gráfico 3 apresenta a porcentagem de grandes barragens construídas no mundo de acordo com o seu material e técnica construtiva.

Gráfico 3 – Porcentagem de grandes barragens de acordo com seu material e técnica construtiva.



Fonte: Adaptado de ICOLD (2016).

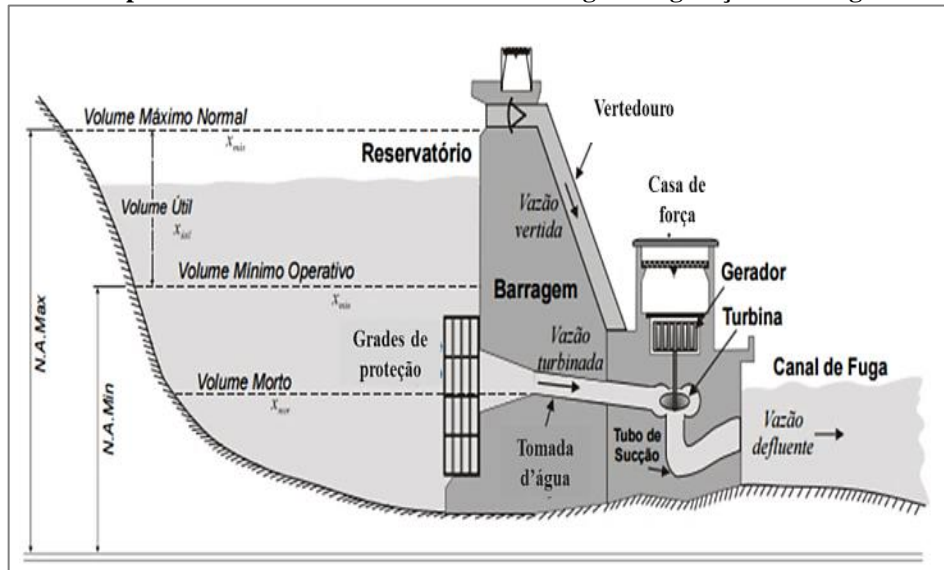
2.1.2. Barragens para geração de energia hidrelétrica

O segundo maior uso para as grandes barragens no mundo é para a geração de energia hidrelétrica ou hidráulica, sendo superado apenas pela utilização para irrigação (ICOLD, 2016). A energia hidráulica é proveniente da irradiação solar através da evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre, e da energia potencial gravitacional, originada pela declividade natural do curso d'água ou artificialmente, com o auxílio de usinas ou centrais hidrelétricas (ANEEL, 2008).

A construção de um barramento no curso d'água proporciona a criação de um reservatório à montante e possibilita o desvio de uma vazão para o circuito hidráulico da central hidrelétrica, que é o conjunto de equipamentos necessários para a transformação da energia potencial gravitacional em energia elétrica. A quantidade de eletricidade que uma central é capaz de produzir depende da quantidade de água que passa pela turbina (vazão turbinada) e da altura da qual a água cai (MARQUES, 2015).

Além da barragem propriamente dita, uma usina hidrelétrica é composta também por estruturas complementares, que desempenham diferentes funções e são essenciais no processo de geração e distribuição da energia elétrica, sendo denominadas estruturas associadas. O posicionamento e dimensões de tais estruturas variam conforme o projeto e os materiais que são utilizados no barramento. A Figura 4 apresenta as principais estruturas associadas e a seguir, procede-se a uma breve descrição das mesmas, conforme Ferreira (2006):

Figura 4 – Principais estruturas associadas de uma barragem de geração de energia hidrelétrica.



Fonte: Adaptado de SILVA FILHO (2003).

- a) Reservatório: é o lago formado a partir da construção da barragem, elevando o nível do curso d'água e, portanto, criando as condições necessárias para o aproveitamento hidrelétrico;
- b) Vertedouro ou extravasor: é um dispositivo de segurança, que admite a passagem direta da água da montante para a jusante, permitindo assim o controle do nível do reservatório. São necessários para descarregar as cheias e evitar que a barragem sofra algum dano estrutural. Há diversos tipos de vertedouros, sendo os principais de escoamento livre ou com utilização de comportas;
- c) Comportas: são equipamentos mecânicos ou eletromecânicos que regulam a abertura dos vertedouros, de tomadas d'água e dispositivos de transposição. Existem, basicamente, dois tipos de comportas: corta-fluxo e ensecadeira. O primeiro tipo de comporta é um equipamento móvel que corta o fluxo d'água em uma tomada d'água, trabalhando totalmente aberta ou totalmente fechada e, também, pode ser utilizada no vertedouro com possibilidade de aberturas parciais, controlando a vazão da água. Já as comportas do tipo ensecadeira servem para isolar a água do sistema final de produção de energia elétrica, permitindo eventuais trabalhos de manutenção nos equipamentos;
- d) Tomada d'água: é a estrutura que permite, controla, deriva e regula a captação da água que será encaminhada às turbinas, por uma entrada construída à montante e que dispõe

- de grades de proteção, evitando a passagem de materiais sólidos que possam danificar as turbinas;
- e) Conduitos forçados: são canalizações que ligam a tomada d'água a uma turbina hidráulica, ou bomba do reservatório à montante;
 - f) Casa de máquinas ou de força: é o local onde são instaladas as turbinas hidráulicas, os geradores elétricos, os reguladores de velocidade e de tensão, painéis e outros equipamentos do sistema de geração;
 - g) Canal de Fuga: é o local em que ocorre a saída da água após a movimentação das turbinas;
 - h) Subestação: é a instalação elétrica de um conjunto de equipamentos dispostos e conectados convenientemente, para a conexão e desconexão seletiva de linhas de transmissão e de geradores de energia elétrica.

No Brasil, de acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) da ANEEL, em março de 2017, existiam em operação 1257 usinas que exploram o potencial hídrico dos rios do país, com potência total de 98.062,76 MW. Sendo assim, as usinas hidrelétricas, independentemente de seu porte, respondem, por 61,3% da potência total de 158.861,17 MW consumida pelo país. Logo, tendo em vista a importância dos empreendimentos hidrelétricos para a matriz energética brasileira e, por conseguinte, para o desenvolvimento econômico nacional, além da crescente instalação de novos aproveitamentos, com 199 usinas em planejamento ou em construção (ANEEL, 2017), deve-se aumentar também a preocupação com fatores de segurança, principalmente aqueles relacionados a eventos críticos, como por exemplo, a ruptura da estrutura de um barramento.

2.2. SEGURANÇA DE BARRAGENS

Segundo o Manual de segurança e inspeção de barragens (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002), a segurança é a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. Para Balbi (2008), a Engenharia de monitoramento e observação de obras hidráulicas se desenvolveu bastante nas últimas

décadas, produzindo um importante avanço tecnológico e influenciando nos critérios de projeto, construção e operação de barragens.

Segundo Sampaio (2016), apesar de toda tecnologia disponível atualmente, ainda não se pode garantir integralmente a segurança de uma barragem, uma vez que diversas são as variáveis relacionadas a essa questão e que tornam o projeto e gestão do empreendimento mais complexa, como por exemplo, as características do terreno de fundação, os materiais empregados no barramento e a velocidade e as condições de enchimento do reservatório. Porém, isso não significa que não seja possível desenvolver projetos seguros e realizar controles efetivos nas etapas de execução e operação que reduzam significativamente as possibilidades de ocorrência de acidentes.

No caso de barragens já existentes, a segurança deve ser avaliada de maneira regular através de reavaliações das condições de todas as estruturas e instalações constituintes de acordo com seu DPA. Nesse sentido, para evitar ou reduzir os danos provocados por acidentes ou incidentes, torna-se essencial a correção de qualquer deficiência prevista ou constatada, a garantia de operação segura, continuada, de manutenção e de inspeção e a preparação adequada para emergências (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

Devido ao grande volume de água ou rejeitos concentrados em seus reservatórios, as consequências de um acidente ou incidente em uma barragem apresentam, em geral, impactos econômicos, sociais e ambientais elevados, não somente ao próprio empreendimento, mas principalmente às áreas urbanizadas imediatamente ou a poucos quilômetros à jusante do mesmo. Veról *et al.* (2013) afirmam que a segurança do vale à jusante de barragens pode ser garantida através da adoção de medidas de sistemas de gerenciamento integrados de risco e emergência.

2.2.1. Acidentes com barragens

As anomalias que podem ocorrer em barragens são classificadas em acidentes ou incidentes. De acordo com a resolução nº 144/2012 do CNRH, considera-se acidente o comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa. Já incidente é qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa

que, se não for controlada, pode causar um acidente. Tais definições são fundamentais para a elaboração de planos de ação e medidas de controle e segurança do empreendimento.

O debate sobre a necessidade de se estabelecer leis e regulamentos que balizem a segurança de barragens nas fases de construção, operação e manutenção, emergiu após a ocorrência de graves acidentes, vitimando dezenas e até milhares de pessoas, como nos casos históricos de rompimento das barragens de Malpasset (1959), Vajont (1963) e Teton (1956), localizadas na França, Itália e Estados Unidos, respectivamente. Tais acidentes tiveram grande importância para o desenvolvimento das políticas de segurança de barragens e de vales à jusante das mesmas e dos estudos de ruptura e propagação de onda de cheia em seus respectivos países (BALBI, 2008).

Historicamente, os países que possuem o maior número de barramentos também são os que apresentam o maior número de casos de acidentes e incidentes. Na China, por exemplo, as estatísticas mostram que, de 1954 a 2003, ocorreram 3.481 eventos de falha de barragem, resultando em mais de 30.000 mortes, a perda de mais de cinco milhões de casas e a inundação de 10.000 km² de terras agrícolas (CHENG *et al.*, 2011).

No Brasil, segundo Menescal (2009) e corroborado por estudos realizados pelo Grupo de Trabalho de Segurança de Barragens do CNRH, até 2011 foram registrados pelo menos quatrocentos acidentes envolvendo obras hidráulicas, sendo que entre os anos de 2003 e 2007, o rompimento de barragens, especificamente, vitimou mais de 24 pessoas. Balbi (2008) chama a atenção para os casos de rompimento na mineração Rio Verde, em Minas Gerais, em 2001, da barragem de rejeitos da indústria de papel Cataguases, em 2003, e da barragem de Camará-PB, em 2004, que evidenciaram a necessidade de uma legislação de segurança específica a nível nacional.

Para Menescal (2009) mesmo quando se trata de barragens para a geração de energia hidrelétrica, onde há um alto padrão de controle de segurança, com a sustentabilidade financeira das usinas, podem surgir problemas que culminam em acidentes ou incidentes graves. Diante disso, Silva (2012) elenca as principais ocorrências com barragens de usinas hidrelétricas no Brasil, até o ano de 2011 (Quadro 1). As informações do Quadro 1 são complementadas pelos registros de acidentes divulgados pela ANA nos Relatórios de Segurança de Barragens dos anos de 2011 a 2015.

Quadro 1 – Levantamento de ocorrências com barragens de usinas hidrelétricas.

Barragem	UF	Ano	Anomalia observada
Limoeiro	SP	1957	Galgamento durante a construção
Euclides da Cunha	SP	1977	Galgamento
Limoeiro	SP	1977	Galgamento
Santa Branca	RJ	1998	Falha durante a manutenção
Rio de Pedras	SP	1997	Galgamento
Manso	MT	2002	Rachaduras durante o 1º enchimento
Manso	MT	2002	Problemas com regra operacional
Serra da Mesa	GO	2003	Liberação súbita de vazão através da abertura das comportas
Corumbá IV	DF	2004	Ameaça de galgamento durante o 1º enchimento
Barra Grande	RS/SC	2004	Morte de operário em conflito com reassentados
Boa Esperança	PI	2005	Morte da equipe de manutenção
Salto Caxias	PR	2005	Rachadura e vazamentos
Salto	SC	2005	Rachadura
Campos Novos	SC	2005	Infiltração em um dos túneis de desvio
Campos Novos	SC	2006	Ruptura do emboque do túnel de desvio do rio
Apertadinho	RO	2008	Ruptura por <i>piping</i> na região do vertedouro
Espora	GO	2008	Ruptura por <i>piping</i> no contato do maciço de terra e estrutura de concreto
São João I e II	MS	2008	Ruptura por cheia superior à capacidade do vertedouro
Cabixi	RO	2008	Ruptura por <i>piping</i>
Castro Alves	RS	2008	Galgamento
Itaipu	PR	2011	Rachaduras na estrutura de uma das turbinas
Salto Osório	PR	2011	Uma das comportas acidentalmente se soltou
Pedra Furada	PE	2011	Rompimento da ombreira esquerda da barragem
Piedade	MG	2012	Rompimento de um trecho da manta de PEAD do canal de adução junto à tomada d'água
Santo Antônio do Jari	PA/AP	2014	Galgamento
Cachoeira Caldeirão	AP	2015	Rompimento controlado de enscadeira para passagem de cheia
Inxu	MT	2015	Rompimento da manta de PEAD do canal de adução

Fonte: Silva (2012); ANA (2013, 2015a, 2015b e 2016).

Em 05 de novembro de 2015 ocorreu no município de Mariana-MG, o rompimento da barragem de rejeitos da mineração de Fundão, resultando em 19 vítimas, entre mortos e

desaparecidos, além de imensos impactos ambientais, sociais e econômicos na bacia do Rio Doce, atingindo 35 cidades no estado de Minas Gerais e 3 no Espírito Santo (ANA, 2016). Com base no exposto, percebe-se que é imperioso além do estabelecimento de diretrizes específicas para garantir a segurança de empreendimentos que disponham de barragens através de legislação específica, também proceder à fiscalização dos mesmos para verificar se estão cumprindo integralmente o disposto em tal legislação.

2.2.2. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)

A PNSB foi instituída pela lei nº 12.334, no ano de 2010 e representa o expoente da legislação brasileira em relação a este tema. Até a promulgação da lei, não existiam no Brasil padrão nacional e compromisso legal para a gestão de barragens, apenas se dispunha de manuais, diretrizes e procedimentos. Nesse contexto, a PNSB definiu um sistema que envolve o governo, o empreendedor e a sociedade, indicando atribuições, responsabilidades e competências.

A PNSB abrange todas as barragens brasileiras com altura igual ou superior a quinze metros, capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos, que acumulem resíduos perigosos e/ou possuam DPA médio ou alto. Dentre seus objetivos, destacam-se a garantia à observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências, além da regulamentação de ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional, fomentando inclusive a cultura de segurança e a gestão de riscos (BRASIL, 2010).

Um grande avanço da lei se refere à atribuição da responsabilidade legal pela segurança da barragem ao empreendedor, que como tal deve promover ações para garanti-la. No que se refere à fiscalização, cabe aos órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), conforme o apresentado na Figura 5. Tais órgãos são definidos conforme o uso do reservatório da barragem em consonância com o disposto na Lei nº 12.334/2010. Além destes, todo órgão ou entidade que fornece licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais, torna-se responsável por sua fiscalização.

Figura 5 – Principais órgãos fiscalizadores de barragens em território nacional.



Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

A lei nº 12.334/2010 também estabelece alguns instrumentos para que a PNSB possa ser integralmente implantada em território nacional, dentre os quais se pode destacar o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, o plano de segurança de barragem, o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e o Relatório de Segurança de Barragens (RSB). O SNISB compreende um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas. Por sua vez, o RSB deve ser elaborado, anualmente, sob a coordenação da ANA e aval do CNRH, com o objetivo de apresentar à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens brasileiras, com a implementação da PNSB, e na melhoria da gestão da segurança (ANA, 2016).

2.2.2.1. *Sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por DPA*

A resolução do CNRH nº 143/2012 estabelece os critérios para a classificação de barragens por categoria de risco, DPA e volume do reservatório, cabendo aos órgãos fiscalizadores realizar essa classificação nos empreendimentos sob sua jurisdição. Tal classificação se torna muito relevante para a gestão do empreendimento, uma vez que não existe risco zero para acidentes e incidentes, portanto, deve-se gerenciá-lo por meio de ações

orientadas a mantê-lo em níveis socialmente aceitáveis e também prever soluções específicas para mitigar os impactos em situação de emergência (BALBI, 2008).

A classificação por categoria de risco deve ser efetuada considerando os aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, como suas características técnicas, estado de conservação e o seu plano de segurança. A quantificação do DPA deve levar em consideração o volume do reservatório, o potencial de perdas de vidas humanas, impactos ambientais e socio-econômicos na área diretamente afetada. Segundo a resolução do CNRH nº 143/2012, quanto ao volume do reservatório, as barragens para acumulação de água podem se enquadrar em quatro categorias:

- a) pequena: reservatório com volume inferior ou igual a cinco milhões de metros cúbicos;
- b) média: reservatórios com volume superior a cinco milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a setenta e cinco milhões de metros cúbicos;
- c) grande: reservatório com volume superior a setenta e cinco milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a duzentos milhões de metros cúbicos; e
- d) muito grande: reservatório com volume superior a duzentos milhões de metros cúbicos.

Para as barragens destinadas à geração de energia hidrelétrica, a resolução normativa da ANEEL nº 696/2015 indica a classificação por classes, seguindo os critérios de categoria de risco, DPA e volume do reservatório, sendo cada classe definida de acordo com a matriz de classificação demonstrada no Quadro 2. O Anexo A desta pesquisa apresenta a metodologia utilizada pela ANEEL para classificar suas barragens.

Quadro 2 – Matriz de classificação de barragens para geração de energia.

Categoria de Risco	Dano potencial associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Fonte: ANEEL (2015).

2.2.2.2. *Plano de Segurança de Barragem*

O plano de segurança de barragem é o documento técnico que deve conter a identificação do empreendedor e os dados técnicos referentes ao empreendimento, a estrutura organizacional e a qualificação técnica da equipe de segurança, a descrição de todos os procedimentos operacionais, de manutenção e de segurança da barragem, os relatórios e as revisões periódicas de segurança e, quando necessário, o PAE, sendo responsabilidade do empreendedor a sua elaboração (BRASIL, 2010).

Tal documento é imprescindível para a gestão da segurança do empreendimento e sua periodicidade de atualização, qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento, segundo a Lei nº 12.334/2010, deverão ser estabelecidos pelo órgão fiscalizador. As revisões devem indicar as ações a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança da barragem, compreendendo, o exame de toda a documentação da barragem, em particular dos relatórios de inspeção; o exame dos procedimentos de manutenção e operação da barragem; e a análise comparativa do desempenho da barragem em relação às revisões efetuadas anteriormente (BRASIL, 2010).

O PAE é parte integrante do plano de segurança da barragem e estabelece ações a serem executadas pelo empreendedor, na hipótese do nível de segurança for categorizado como de emergência, ou seja, quando forem detectadas anomalias que representem risco de ruptura iminente, exigindo providências para prevenção e mitigação de danos humanos e materiais (ANEEL, 2015; ICOLD, 2011). Conforme o disposto na lei nº 12.334/2010, o PAE deve conter no mínimo:

- identificação e análise das possíveis situações de emergência;
- procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou condições potenciais de ruptura;
- procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados, assim como seus responsáveis; e
- estratégias e meio de divulgação e alerta para as comunidades afetadas em situação de emergência.

O PAE é obrigatório para barragens de hidrelétricas que tenham classificação A ou B segundo a matriz de classificação da ANEEL, ou ainda, quando essa considerar que seja necessária sua elaboração, independentemente da classificação da barragem, mediante fundamentação. É imprescindível que o documento esteja disponível no próprio empreendimento, bem como seja encaminhado às autoridades competentes (prefeituras) e aos órgãos de defesa civil. O prazo para apresentação do documento para usinas hidrelétricas existentes depende do número de usinas sob responsabilidade do empreendedor, sendo:

- dezembro de 2017: empreendedor com até cinco barragens;
- dezembro de 2018: empreendedor entre seis e quinze barragens; e
- dezembro de 2019: empreendedor com mais de quinze barragens.

Para barragens da mineração, a portaria do DNPM nº 526/2013 estabelece o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM). A portaria inclui no conteúdo mínimo do PAEBM, o estudo de cenários, que deve caracterizar adequadamente as possíveis situações que ocorrerão em virtude de uma eventual ruptura da barragem; além do mapa de cenários, que compreende a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas. Apesar da portaria acima mencionada legislar apenas no caso de barragens da mineração, tais recomendações podem se estender a barragens que desempenham outras funções.

Embora recente e englobe diversas vertentes relacionadas à segurança de barragens, a legislação brasileira apresenta algumas falhas e pontos que podem ser melhorados. Sampaio (2016) aponta como principal falha na legislação, a não obrigatoriedade de supervisão do conteúdo do PAE, assim como uma análise minuciosa das disposições técnicas e dos cálculos aplicados, por autoridade competente, uma vez que estabelece apenas o seu envio para as prefeituras e agências de defesa civil.

Ressalta-se ainda, a falta de uma metodologia para a elaboração do PAE, que oriente os estudos de rompimento hipotético e quais hipóteses que devem ser consideradas, além da definição de modelos padronizados para os formulários de registros e comunicações internas e/ou externas (CARDIA *et al.*, 2015). Na contramão da integral implementação da PNSB, tem-se a falta de corpo técnico especializado para a fiscalização e avaliação do cumprimento dos requisitos de segurança por parte dos empreendedores.

Diante do exposto e para a elaboração de um PAE que efetivamente minimize os impactos negativos (especialmente as perdas sociais, econômicas e ambientais) e que oriente as ações dos diversos atores envolvidos em uma situação de emergência, torna-se essencial o conhecimento das formas de ruptura de barragens, dos cenários que devem ser estudados, dos parâmetros de formação e da geometria da brecha de ruptura, do estudo da propagação da onda de cheia no vale à jusante e dos procedimentos para a elaboração de mapas de inundação georreferenciados. As informações geradas pela mancha hipotética de inundação têm relevância para se estimar cotas máximas de água nas áreas afetadas e o tempo de chegada da onda de cheia em cada ponto da área inundada, sendo assim, também são essenciais para o desenvolvimento do PAE (DAY, 2016).

2.3. ROMPIMENTO DE BARRAGENS

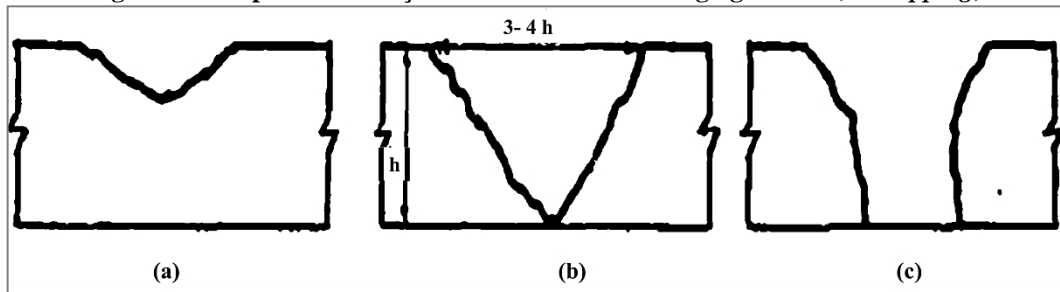
O rompimento de uma barragem pode ser entendido como a perda de sua integridade estrutural, podendo ocorrer uma liberação incontrolável do conteúdo de seu reservatório, ocasionada pelo colapso da própria barragem ou de algum de seus constituintes (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002). Para Balbi (2008), as consequências da ruptura de uma barragem são geralmente de alta magnitude, que só a possibilidade de falha já implica em uma altíssima responsabilidade, tanto para a equipe de segurança encarregada do seu projeto, operação e controle, que devem se esforçar ao máximo para minimizar esse risco, quanto para as autoridades públicas competentes, que devem assegurar os recursos humanos e econômicos imprescindíveis para sua gestão.

Para Dincergok (2007 *apud* XIONG, 2011), estudos de caso comprovam que há diferentes formas de rompimento de uma barragem, como: falhas na fundação, erosão interna (*piping*), galgamento (*overtopping*) e a liquefação ocasionada por eventos sísmicos. As principais causas para falhas são: eventos hidrológicos extremos, infiltrações, instabilidade dos taludes, mau gerenciamento, atividades humanas inadequadas ou uma combinação dos mesmos (ZHONG; SUN; LI, 2011). Em estudos específicos, todas essas causas de rompimento devem ser analisadas, desprezando-se os casos impossíveis e concentrando-se nos casos possíveis, mesmo que com baixa probabilidade (ELETROBRÁS, 2003).

O galgamento (*overtopping*) é apontado pela ICOLD como o principal precursor da ruptura da estrutura do barramento. O processo inicia com a passagem da água de montante

para a jusante sobre a crista da barragem, a parede da barragem começa a erodir a partir do topo e a forma da estrutura erodida assemelha-se à mostrada na Figura 6 (a). Com a continuação da inundação, a erosão torna-se mais dramática com a forma mudando para a mostrada na Figura 6 (b) e, eventualmente, à da Figura 6 (c). A largura da seção sobreposta é tipicamente 3 a 4 vezes a altura da barragem (CLEARY *et al.*, 2015). Geralmente, ocorre galgamento (*overtopping*) quando há insuficiência de descarga das estruturas extravasoras, ou ainda, de bordo livre. Suas causas podem ser erros no dimensionamento das estruturas extravasoras, bloqueio dos vertedouros por detritos e principalmente pela ocorrência de cheia superior à prevista no projeto.

Figura 6 – Etapas da formação da brecha em caso de galgamento (*overtopping*).



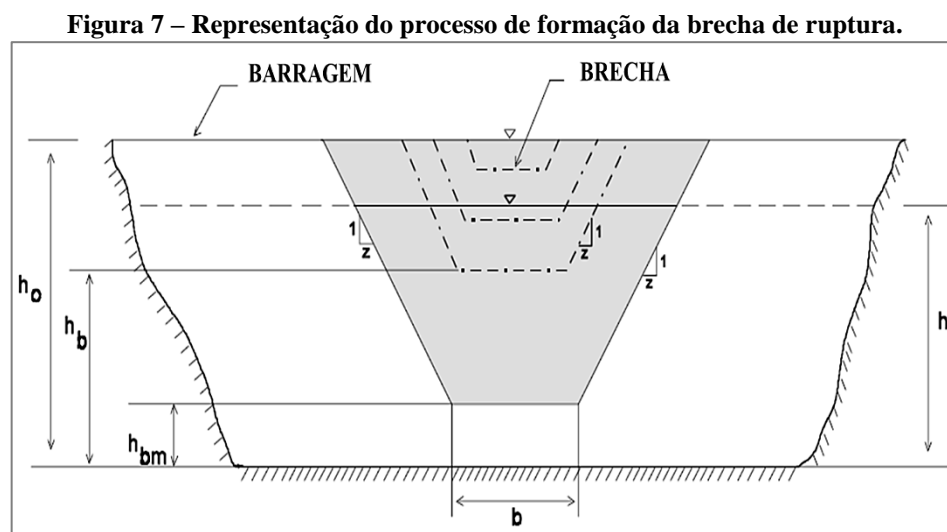
Fonte: Johnson e Illes (1975 *apud* CLEARY *et al.*, 2015).

Segundo Sampaio (2016), como nem sempre é possível assegurar plenamente que um evento de ruptura não aconteça, duas medidas devem ser adotadas. A primeira se trata da existência de um sistema de controle executado pelos meios de auscultação e instrumentos de monitoramento visual. Já a segunda, é aquela preconizada pela legislação de segurança, ou seja, a adoção de um plano de emergência confiável baseado em estudos de cenários de rompimento hipotético.

O estudo do rompimento hipotético de barragem é dividido em etapas. A primeira consiste na avaliação e determinação dos parâmetros de formação e evolução da brecha de ruptura. Posteriormente, deve-se estimar o hidrograma defluente que deve ser propagado para a jusante, ou seja, relacionar a vazão de saída da brecha ao tempo após o evento de ruptura, possibilitando, assim, analisar o potencial da cheia decorrente do processo e estimar as áreas e cotas de inundação (RESENDE *et al.*, 2015).

2.3.1. Parâmetros de formação da brecha

Para Collischonn e Tucci (1997), a brecha é uma abertura na barragem, causada por alguma falha, através da qual a água do reservatório pode escoar, e como resultado de tal escoamento há o aumento da dimensão da abertura inicial. Segundo Monte-Mor (2004) os fatores que mais influenciam na formação da brecha, independente do material que constitui o corpo da barragem, são: forma, tempo de formação ou de falha e taxa de crescimento. A Figura 7 apresenta o processo de formação da brecha de ruptura e seus principais parâmetros de forma.



Fonte: Fread e Lewis (1998).

Nota-se a altura do reservatório à montante da barragem (h), a largura da brecha (b) definida como a medida final de sua base inferior, a profundidade ou altura final da brecha corresponde à distância vertical entre a base inferior, após a sua completa formação, e a fundação da barragem (h_{bm}). Na Figura 7 pode-se observar ainda, a altura da barragem (h_0) e o parâmetro de forma (z) que indica a inclinação das laterais da brecha. Quanto à evolução temporal da brecha, os parâmetros de maior importância são a taxa de crescimento, que é a velocidade de formação da brecha e o tempo de formação ou de falha que corresponde ao intervalo de tempo onde surgem os primeiros indícios de formação de uma brecha até a formação total da brecha de ruptura (WAHL, 1998).

Outro fator que interfere significativamente no processo de formação da brecha, é a tipologia da barragem, no que diz respeito aos materiais empregados em sua construção e à sua geometria. Segundo o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, do inglês *United States Army Corps of Engineers* (USACE, 2014), a determinação de parâmetros de

formação de brecha de ruptura de barragens é mais complexa, do ponto de vista técnico, para de barragens de terra e enrocamento. No caso de barragens de concreto em arco, a brecha se forma de maneira rápida e instantânea, ao contrário de barragens de terra e de concreto por gravidade (FREAD; LEWIS, 1998).

O USACE (2014) recomenda que as dimensões geométricas e o tempo de formação da brecha sejam avaliados numericamente para diferentes cenários e com diferentes equações de regressão, para tal deve-se realizar a análise dos possíveis modos de rompimento, identificação dos locais e/ou estruturas mais sensíveis a problemas estruturais ou de operação e ainda, a análise dos possíveis tipos de problemas estruturais e operacionais condicionados à barragem. Portanto, essa avaliação apresenta as maiores incertezas do processo de simulação de rompimento hipotético de uma barragem (RESENDE *et al.*, 2015).

As equações de regressão disponíveis na literatura são baseadas em casos históricos de acidentes com barragens, e por ter esse caráter empírico apresentam resultados aos quais podem estar associadas grandes incertezas. A Eletrobrás (2003) apresenta um modelo simplificado de cálculos referentes à formação da brecha para barragens de concreto, sendo os parâmetros essenciais de formação obtidos a partir do Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros para a formação da brecha em barragens de concreto.

Tipo de barragem	Arco	Contraforte	Gravidade
Brecha média (\bar{B})	Comprimento da crista	Múltiplos trechos	Um ou mais trechos (usualmente menor do que a metade do comprimento da crista)
Declividade da lateral da brecha (1H:zV)	Entre zero e a declividade do vale	Normalmente zero	Normalmente zero
Tempo para a formação total da brecha (T) em horas	Menor que 0,1 h	Entre 0,1 h e 0,3 h	Entre 0,1 h e 0,3 h

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).

Corroborando o apresentado pela Eletrobrás (2003), Grimaldi e Poggi (2010) afirmam que o rompimento pode ocorrer de maneira gradual ou instantânea, o que depende da causa da falha e do tipo de barragem. Quando ocorre o rompimento instantâneo, uma grande seção ou até mesmo todo o corpo da barragem é removido em um curto intervalo de tempo, dando origem a uma onda de cheia com maior potencial de destruição ao vale à jusante. Uma

aproximação típica para barragens em concreto é assumir o tempo de formação da brecha na ordem de alguns poucos minutos e as dimensões da brecha próximas às dimensões máximas da estrutura (MACDONALD e LANGRIDGE-MONOPOLIS, 1984).

Segundo Goodell (2012) e USACE (2014), os parâmetros de formação da brecha influenciam diretamente o hidrograma defluente (ou de ruptura) decorrente do evento de rompimento da barragem. Portanto, a vazão de pico e a forma de propagação da onda de cheia, inclusive os tempos de chegada da onda, estão diretamente condicionadas ao processo de cálculo da brecha.

2.3.2. Hidrograma defluente e mapas de inundação

2.3.2.1. *Fatores determinantes*

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. Nesse sentido, para Morris e Galland (2000 *apud* BRASIL, 2005), as principais variáveis envolvidas e cuja definição pode levar a erros na simulação, são descritas a seguir:

a) Modelagem do reservatório

Podem-se considerar dois métodos para o esvaziamento do reservatório durante o rompimento da barragem. O primeiro e mais simples assume que o nível d'água é reduzido de maneira progressiva e simultânea ao longo do reservatório. Já o segundo método, tende a produzir um hidrograma de ruptura mais realístico, uma vez que considera que o reservatório responderá dinamicamente ao colapso da barragem. Este último é recomendado nos casos em que o reservatório é relativamente alongado e/ou possui ramificações (BRASIL, 2005).

b) Descrição da topobatimetria da área

Torna-se essencial a obtenção dos perfis longitudinais do curso d'água e de suas seções transversais, indicando a presença de planícies de inundação (zonas de

armazenamento) e a delimitação de áreas rurais e urbanas nas margens, quando necessário. Segundo Cunge *et al.* (1980 *apud* BRASIL, 2005), as seções transversais do curso d'água, para levantamento dos dados topográficos quantitativos, devem ser divididas em três zonas: leito principal, que conduz as vazões de estiagem e pequenas vazões de cheia; leito maior, que conduz vazões de cheia mantendo a direção preferencial do escoamento definida pelo leito principal; e a planície de inundação, onde não se pode identificar uma direção preferencial de escoamento.

Em relação à batimetria, os dados hidrográficos requeridos para o modelo numérico são essenciais para entender o comportamento natural do curso d'água (vazões, capacidade de transporte, velocidades), permitindo a representação mais realística em um modelo computacional e sendo base para a calibração do mesmo. A definição das condições de contorno para a simulação hidrodinâmica também são importantes, em geral, as condições de contorno são definidas por hidrogramas ou fluviogramas, à montante, e por relações cota-descarga, à jusante (BRASIL, 2005).

c) Escolha da rugosidade das diversas áreas

A tipificação das margens do canal é um parâmetro fundamental para a simulação hidrodinâmica, sendo representada pelo coeficiente de rugosidade ou de Manning (n), que descreve a vazão sobre uma superfície a partir de sua rugosidade. Haja vista que uma onda de ruptura tem a capacidade de inundar áreas urbanas e zonas com vegetação densa, com características superficiais bem distintas, devem-se determinar as condições de escoamento nessas superfícies.

A escolha do coeficiente normalmente é realizada com base no padrão de ocupação do solo da região. Conforme Cunge *et al.* (1980 *apud* BRASIL, 2005), quando se trata de áreas urbanas o ideal é avaliar locais com obstruções específicas, como edifícios ou paredes que se interpõem ao fluxo gerando uma perda de quantidade de movimento, adotando-se valores elevados de rugosidade para as demais áreas (entre 0,05 e 0,20). Em relação às áreas rurais, o tipo de vegetação deve ser avaliado. A presença de árvores, arbustos e capinzais nas planícies influencia diretamente no padrão de escoamento superficial. A Tabela 1 apresenta diferentes valores médios do coeficiente de rugosidade de acordo com o tipo de vegetação existente.

Tabela 1 – Coeficientes médios de rugosidade para planícies de inundação.

Tipos de planície de inundação		Coeficiente de rugosidade médio (n)
Pastagem	Gramma baixa	0,030
	Gramma alta	0,035
Áreas Cultivas	Nenhum cultivo	0,030
	Colheita desenvolvida	0,040
Mato	Esparso, com muitas plantas rasteiras	0,050
	Ralo	0,060
	Mediano a denso	0,100
Árvores	Grande porte (salgueiro, mangueira, etc.)	0,150
	Terreno limpo, com tocos e com algumas plantas rasteiras	0,040
	Terreno limpo, com tocos e com muitas plantas rasteiras	0,060
	Fileira densa, com nível de inundação abaixo dos galhos	0,100
	Fileira densa, com nível de inundação acima dos galhos	0,120

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

2.3.2.2. Cenários de ruptura

De acordo com a portaria do DNPM nº 526/2013, para a elaboração do PAEBM deve-se apresentar estudos de cenários contendo os possíveis impactos à jusante resultantes da ruptura hipotética da barragem, com seu associado mapa georreferenciado. A recomendação da portaria pode ser aplicada também a estudos relacionados às barragens de geração de energia hidrelétrica, pois em geral, percebe-se a impossibilidade de validação de um estudo de ruptura com um único conjunto de parâmetros (BRASIL, 2005). Diante do exposto, para a elaboração do PAE, Cardia *et al.* (2015) consideram importante o estudo dos seguintes cenários:

- Ruptura por galgamento (*overtopping*): acontecimento da vazão de projeto (normalmente decamilenar), através da formação de brecha máxima, com reservatório no nível d'água (NA) máximo maximorum;
- Ruptura por acidente (*Sunny Day*): falha ocasionada por problema técnico estrutural (erosão hídrica e/ou *piping*; escorregamento de talude e/ou de fundação; falha de

resistência da estrutura; etc), através da formação de brecha máxima, com reservatório no NA máximo normal; e

- Cheia incremental: avaliação dos problemas de inundação no vale à jusante, com formação dos mapas de inundação, referentes aos vários cenários, estabelecidos a partir da máxima vazão já descarregada (cujos efeitos são conhecidos) e até o valor da vazão de projeto, em incrementos variados. O rompimento não ocorre, apenas se representa a capacidade operacional das estruturas extravasoras para diferentes valores de vazão.

2.3.2.3. *Determinação da vazão máxima e hidrogramas de ruptura*

A simulação do escoamento originado pelo rompimento de barragens pode ser realizada com a utilização de diferentes modelos numéricos, que buscam estimar a vazão máxima do reservatório imediatamente após a abertura da brecha. A Tabela 2 apresenta algumas formulações matemáticas desenvolvidas por diversos autores para o cálculo da vazão de pico, sendo que algumas dessas formulações são as adotadas por programas computacionais de modelagem hidrodinâmica.

Tabela 2 – Formulações matemáticas para a determinação da vazão de pico.

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

Onde: Q_p é a descarga máxima defluente da barragem em ruptura [m^3/s]; V é o volume do reservatório para o NA máximo [m^3]; A_s é a área do reservatório para o NA máximo [m^2]; B_d é a largura da barragem [m]; H_d é a altura da barragem [m]; B_b é a largura final da brecha [m]; H_b é a altura final da brecha [m]; H_d é a altura da barragem; $Y_{médio}$ é a profundidade média no reservatório no instante da ruptura [m]; T_p é o tempo de formação da brecha [s]; g é a aceleração da gravidade, igual a $9,81 m/s^2$.

Fonte: Adaptado de Lauriano (2009).

Para representar o tempo de esvaziamento do reservatório, conforme Laureano *et al.* (2009) existem dois tipos de hidrogramas: hidrograma triangular simplificado e hidrograma com decaimento parabólico, que são apresentados na Tabela 3, sendo o último um dos mais utilizados para estudos de rompimento de barragens.

Tabela 3 – Hidrogramas de ruptura.

Autor	Hidrograma e equações
<p data-bbox="272 577 544 757">Hidrograma triangular simplificado (MASCARENHAS, 1990)</p>	<div data-bbox="767 338 1262 674" style="text-align: center;"> </div> $Q_p = \frac{2V_r}{T_b}$ $Q(t) = Q_p \times \left(\frac{t}{T_p}\right), \text{ para } 0 \leq t \leq T_p$ $Q(t) = Q_p - Q_p \cdot \left(\frac{t - T_p}{T_b - T_p}\right), \text{ para } t \geq T_p$
<p data-bbox="272 1290 544 1469">Hidrograma com decaimento parabólico (BARFIELD <i>et al.</i>, 1981)</p>	<div data-bbox="767 1111 1262 1447" style="text-align: center;"> </div> $Q_p = \frac{2V_r}{T_b}$ $Q(t) = Q_p \times \left[\left(\frac{t}{T_p}\right) \times e^{\left(1 - \frac{t}{T_p}\right)} \right]^k$

Onde: Q_p é a descarga máxima defluente da barragem em ruptura [m³/s]; V é o volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [m³]; T_p é o tempo de pico [s]; T_b é o tempo de base [s]; e K é o fator de ponderação, varia entre 0,01 e 0,5, sendo calibrado para que o volume do hidrograma de ruptura seja igual ao volume armazenado no momento do colapso da barragem.

Fonte: Adaptado de Lauriano (2009).

2.3.2.4. *Elaboração de mapas de inundação*

O principal objetivo de um mapa de inundação é mostrar a extensão e o tempo esperado de uma cheia proveniente do rompimento de barragens, dando uma impressão forte e direta da distribuição espacial do risco de inundação, auxiliando no gerenciamento das ações emergenciais por parte das autoridades competentes e do empreendedor da barragem (BALBI, 2008; MARZOCCHI *et al.*, 2014). Cardia *et al.* (2015) afirmam que o mapa de inundação deve conter, para cada cenário analisado, a identificação dos pontos de danos, a velocidade do escoamento e a altura da lâmina d'água (ou cota máxima atingida pelas águas, em determinada seção de controle).

Diante do exposto, nota-se que o detalhamento topobatimétrico do vale à jusante é imprescindível para essa fase do estudo de rompimento. O maior desafio para o empreendedor é a definição da extensão da área à jusante que será analisada, assim como da largura das seções transversais. Normalmente, essas medidas são estabelecidas de acordo com a disponibilidade de dados ou de equipamentos para fazer tais levantamentos. Nesse sentido, o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE), que são construídos com técnicas de sensoriamento remoto, auxilia na definição de áreas precisas e conforme o apresentado por Rocha (2015) vêm sendo bastante utilizados em estudos hidráulicos de cheia, sejam essas induzidas pelo rompimento de barragens ou não.

2.4. **MODELOS HIDRODINÂMICOS COMPUTACIONAIS**

Os modelos hidrodinâmicos são utilizados para a avaliação e representação do processo de escoamento em rios, lagos, estuários e sobre estruturas hidráulicas. Basicamente, as formulações hidrodinâmicas são baseadas nas equações da conservação da massa e do momento de Navier-Stokes (NAIK, 2015). Tsakiris e Spiliotis (2013) afirmam que o desenvolvimento de *softwares* comerciais facilita o processo de cálculo e reduz significativamente o tempo de simulação. Além disso, os mais recentes incluem o processo de formação da brecha e o hidrograma defluente e seu comportamento no vale à jusante, além de proporcionar soluções práticas com equações simplificadas, porém eficazes, para descrever o fenômeno em análise.

Lodhi e Agrawal (2012) salientam que a precisão da resposta fornecida pelo *software* ou modelo hidrodinâmico utilizado varia de acordo com a opção de modelo escolhido, e tal escolha depende sempre das condições que prevalecem no local analisado e da disponibilidade de dados existentes. Veról *et al.* (2013) os divide em modelos simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2D) e, finalmente, os recentes modelos hidrodinâmicos tridimensionais (3D).

Historicamente, a modelagem do comportamento hidráulico após a ruptura tem sido realizada em duas abordagens principais: modelos unidimensionais (1D), que consideram o fluxo de água apenas na direção de escoamento do rio, desprezando as margens ou bidimensionais (2D), onde o fluxo tem comportamento distinto na calha do rio e nas margens do mesmo (MARZOCCHI *et al.*, 2014). Naik (2015) explica que a interação entre o fluxo do canal principal e o fluxo na planície de inundação obriga o uso de um modelo bidimensional completo, sendo esta abordagem a que mais se aproxima da realidade.

Entretanto, Pilotti *et al.* (2014) realizaram estudo de ruptura da barragem de Cancano, no rio Adda, Alpes Italianos, com o intuito de comparar os resultados obtidos a partir da modelagem 1D e 2D da propagação de onda de cheia proveniente da ruptura total e parcial da barragem. Os resultados indicaram que o modelo unidimensional continua competitivo em relação à geração de mapas de inundação e estudos de ondas de cheia, porém resultando em uma área inundada um pouco maior que a obtida no modelo 2D.

Diante do exposto, o pesquisador e/ou engenheiro que irá conduzir o estudo se torna responsável pela escolha da melhor ferramenta computacional para representação e simulação dos fenômenos hidráulicos, assim como qual abordagem utilizar (unidimensional, bidimensional, etc.). Modelos numéricos como HEC-RAS, MIKE 11, MIKE 21 são recomendados pela *Federal Energy Regulatory Commission* nos Estados Unidos (FERC, 2014) para o desenvolvimento de estudo de rompimento de barragens. Os modelos pioneiros nesse tipo de estudo (DAMBRK e FLDWAV) não possuem mais apoio financeiro do *National Weather Service* dos Estados Unidos (NWS), e a FERC (2014) passou a não recomendá-los.

a) NWS – FLDWAV

O *Flood Wave Routing Model* (FLDWAV) é um modelo generalizado de cálculo de cheia para a simulação de escoamento não permanente, desenvolvido pelo NWS em 1998, substituindo os modelos NWS DAMBRK (1988) e DWOPER (1984), também desenvolvidos pelo NWS e largamente utilizados em escala mundial. O modelo FLDWAV combina as ferramentas disponíveis nos seus antecessores e fornece recursos adicionais que aumentam sua robustez e conseqüentemente produz resultados mais estáveis, além de reduzir significativamente seu tempo de processamento (UEMURA, 2009; LAURIANO, 2009).

Para Tsakiris e Spiliotis (2013), as principais funcionalidades que tornaram o FLDWAV populares são: a inclusão do mecanismo de formação da brecha de ruptura e do hidrograma defluente juntamente com o hidrograma ao longo do vale à jusante; e a solução prática com equações simplificadas que são utilizadas para descrever o fenômeno sem um maior detalhamento do comportamento hidrodinâmico complexo e dos processos erosivos.

Além disso, o programa inclui a simulação de escoamento em um único curso d'água ou em um sistema de cursos d'água intercomunicados, variando ao longo do tempo e do espaço de livre para forçado, de subcrítico para supercrítico. O fluido analisado pode ser Newtoniano (água) ou não Newtoniano (polpa, rejeito). É possível simular o rompimento de barragens e a operação de estruturas de controle, como vertedouros e comportas, sob condições de contorno internas particulares (existência de pontes e reservatórios), tendo como resultado perfis de linha d'água, tempo de chegada da onda e o hidrograma defluente (UEMURA, 2009).

A formulação matemática utilizada pelo FLDWAV é baseada na solução de equações de Saint-Venant para escoamentos unidimensionais em fundo fixo, não considerando o efeito do transporte de sedimentos e a dinâmica de conformação do leito em fundos móveis, o que significa ignorar a resistência do leito ao escoamento e a geometria das seções transversais.

b) USACE – HEC-RAS

O HEC-RAS (*River Analysis System*) é um *software* desenvolvido pelo USACE em 1995 e que permite realizar simulações de fluxo unidimensional em regime permanente, fluxo

uni ou bidimensional em regime não permanente, cálculo do transporte de sedimentos, análise de temperatura da água e modelagem da qualidade da água (USACE, 2016). Além disso, integra uma plataforma gráfica que gera mapas de inundação em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

O modelo HEC-RAS é muito utilizado em análises hidrodinâmicas unidimensionais, sendo utilizado para determinar a propagação de onda de cheia em canais naturais e artificiais (USACE, 2014). Para estudos de rompimento de barragens com o HEC-RAS, as simulações devem ser realizadas em regime não permanente e não uniforme, empregando a representação do reservatório da barragem em linha (GOODELL e FROEHLICH, 2012). Nesse tipo de concepção numérica, o reservatório da barragem é representado através de seções transversais ao longo do domínio de simulação e o barramento está alinhado ao fluxo do rio. Para tanto, o HEC-RAS emprega as equações de Saint-Venant (Equações 1 e 2) para a solução de todo o problema, considerando a quantidade de movimento no escoamento da onda gerada pelo rompimento da barragem (LARA, 2016).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\beta \cdot Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + A \cdot \frac{|Q| \cdot Q}{K^2} + q \cdot \frac{Q}{A} = 0 \quad (1)$$

$$L \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

Onde:

Q é a vazão [m³/s];

h é a altura da coluna d'água [m];

x é a distância ao longo do rio [m];

t é o tempo [s];

A é a área da seção de escoamento [m²];

L é a largura da superfície de água [m];

K é capacidade de transporte [m³/s];

g é a aceleração da gravidade [m/s²];

q é o fluxo lateral [m³/s/m];

β é o fator de distribuição do fluxo.

O USACE (2014) afirma que a representação do reservatório em linha gera resultados numéricos mais precisos e realistas, em termos do processo de formação da brecha,

da formação do hidrograma de ruptura e da propagação da onda de cheia ao longo do vale à jusante do barramento. Desta forma, o pesquisador deve construir o modelo numérico hidráulico considerando uma região à montante do barramento, a qual englobe os principais tributários afluentes ao reservatório e toda a extensão inundável do reservatório (LARA, 2016).

Uma das grandes vantagens no uso do HEC-RAS é o seu módulo dedicado à análise de rompimento de barragens, onde é possível determinar os parâmetros de formação da brecha para rupturas ocasionadas por erosão interna (*piping*) ou galgamento (*overtopping*), além do rompimento instantâneo de barragens de concreto. A formação da brecha no HEC-RAS é tratada conforme embasamento empírico por meio da parametrização de largura, altura, tempo de formação e tipo de deflagração.

c) DHI – MIKE FLOOD

O MIKE FLOOD é um *software* comercial de modelagem hidrodinâmica da DHI (empresa dinamarquesa autônoma e independente de pesquisa e consultoria) que atrela os modelos unidimensionais MIKE URBAN, MIKE HYDRO River, MIKE 11 e o modelo bidimensional MIKE 21 em um único e dinâmico sistema de modelagem acoplada (DHI, 2016). Logo, a sua utilização agrega as vantagens fornecidas pelas duas abordagens e minimiza as limitações de cada modelo individualmente, além de permitir um menor tempo de computação.

Os cálculos hidrodinâmicos no MIKE 11 se baseiam nas equações de Saint-Venant, assim como em outros *softwares* de modelagem hidrodinâmica, que descrevem o desenvolvimento dos níveis de água assim como a vazão e velocidade média do fluxo nas seções transversais. Em suma, a solução numérica é obtida a partir de uma formulação de diferenças finitas de equações, usando um esquema que é baseado em pontos alternados de vazão e cota.

O MIKE 11 é amplamente utilizado para a realização de estudos hidrológicos e na previsão de cheias naturais em cursos d'água. Além disso, pode ser utilizado para o estudo de rompimento de barragens, sendo que o módulo gráfico e interativo de brecha de ruptura (*Dambreak structure*) permite ao usuário inseri-la como condição de contorno à montante do rio, definindo o momento da falha, que pode ser especificado diretamente pelo usuário ou

relacionado a certas condições hidráulicas, como ao nível de água do reservatório; e o modo de ruptura, com informações sobre o mecanismo de formação da brecha, considerando ruptura por erosão interna (*piping*) ou galgamento (*overtopping*). O cálculo do fluxo que escoar pela brecha baseia-se na equação de energia, ou seja, é realizado analisando-se a perda de energia à medida que o fluxo passa pela brecha (BARRERA; LARSEN, 2010).

O modelo de análise bidimensional MIKE 21 se baseia nas equações da continuidade e da conservação do momento de Navier-Stokes, descrevendo a evolução dos níveis de água, onde a velocidade é composta por duas componentes em um sistema cartesiano. Para permitir a modelagem de rompimento de barragens, um módulo de deslizamento de terra foi incorporado ao MIKE 21, o qual permite ao usuário usar a variação temporal no modelo de batimetria. Isto torna possível descrever o rompimento através da batimetria da área em estudo (DHI, 2016).

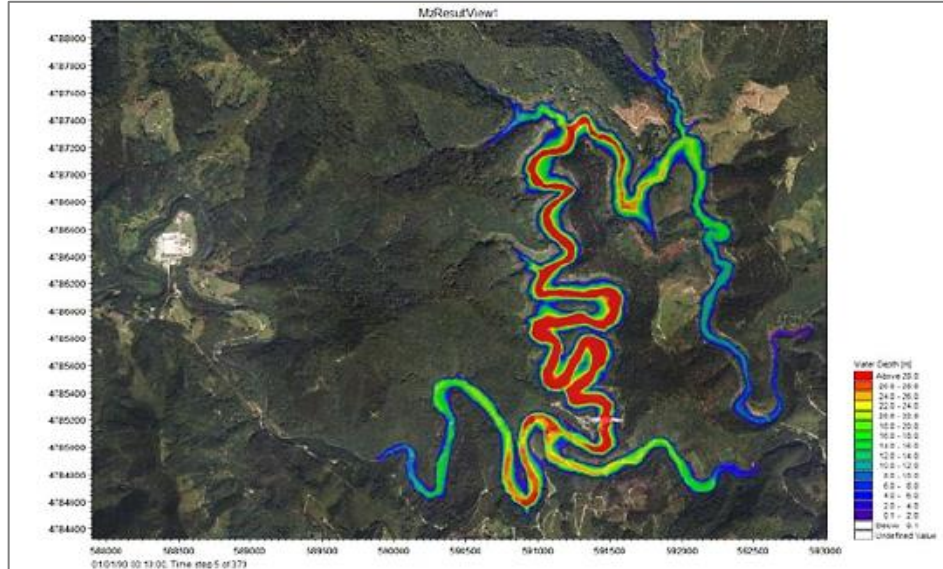
O efeito do rompimento de barragem no MIKE 21 é modelado forçando termos que representam a deformação dinâmica de acordo com a batimetria em conjunto com termos adicionais que buscam representar o efeito das forças viscosas e de inércia na simulação. Resguardando as altas velocidades de fluxo que podem ocorrer durante esse processo, o processador do MIKE 21 incorpora um esquema de cálculo que lhe permite modelar fluxos subcríticos e supercríticos (BARRERA; LARSEN, 2010).

Nos últimos anos, o *software* comercial MIKE FLOOD vem sendo utilizado em diversas pesquisas relativas à hidrodinâmica de canais, controle de cheias, análise de águas subterrâneas, dinâmica costeira, bem como em estudos de rompimentos hipotéticos de barragens, tendo como destaque para este último segmento, os trabalhos de Barrera e Larsen (2010), Daustori (2010), Ehsan *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (2016). Com significativa aplicabilidade em países do leste europeu, no Brasil, ainda são poucos os indícios de sua utilização para tal finalidade, destacando-se o estudo de rompimento hipotético da barragem de São Mateus do Sul, no Estado do Paraná, realizado pela própria DHI.

Barrera e Larsen (2010) apresentam um exemplo de análise acoplada que pode ser realizada no MIKE FLOOD, onde o traçado do rio e suas seções transversais são modelados no MIKE 11, com o intuito de simular seu regime hidrodinâmico e, em seguida, incorporá-lo à malha de cálculo gerada através do *software* MIKE 21. Assim, através de uma ligação lateral há a interação entre os dois modelos, ou seja, o fluxo de água no rio ultrapassa sua

calha e começa a escoar pela planície de inundação. A Figura 8 mostra o mapa de inundação resultante da aplicação dessa metodologia.

Figura 8 – Mapa de inundação obtido com auxílio do MIKE FLOOD.



Fonte: Barrera e Larsen (2010).

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA

Para o desenvolvimento da pesquisa, realizou-se primeiramente a caracterização da barragem em estudo. Tal fase contou com a realização de visita técnica ao empreendimento, diálogo com a equipe de manutenção civil e com os responsáveis pela segurança de barragens da empresa Eletrobrás Eletronorte, além da análise de documentos técnicos referentes à construção, à operação e à segurança da barragem e estruturas associadas. Após todas as análises necessárias, procedeu-se à classificação da barragem quanto à sua categoria de risco e DPA.

Em seguida, realizou-se a coleta e análise de dados hidrológicos e topobatimétricos da região à montante e à jusante do barramento. Os dados hidrológicos coletados dizem respeito à relação entre a cota, volume e área do reservatório da UHE Tucuruí, parâmetro essencial para a definição da vazão de pico e do hidrograma de ruptura. Além disso, definiram-se as vazões defluentes, que para a barragem em questão são a soma das vazões das estruturas extravasoras, nomeadamente, verteduros e tomadas d'água. No que diz respeito aos dados topobatimétricos, utilizou-se um MDE para a região à jusante da barragem e uma simplificação do canal natural do rio Tocantins.

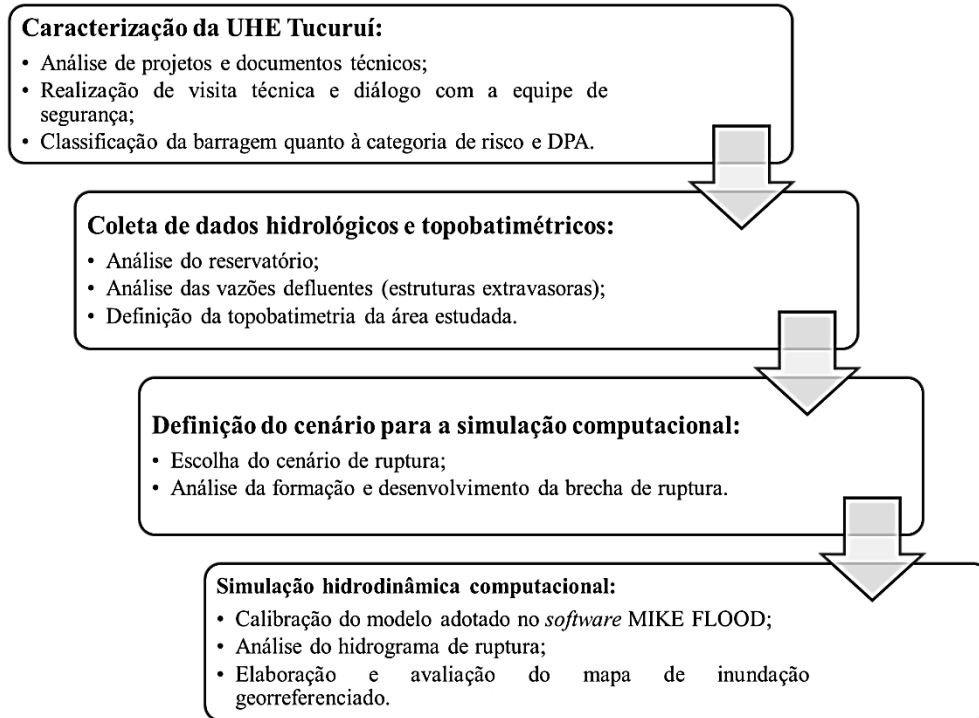
Após a conclusão das etapas anteriores, iniciou-se o processo de definição dos parâmetros de entrada da simulação hidrodinâmica. Para tal, definiu-se o cenário de rompimento a ser simulado, assim como o mecanismo de formação e desenvolvimento da brecha de ruptura. Logo após, a fim de validar os resultados da simulação, conduziu-se a calibração do modelo adotado, onde foram impostas as condições de contorno e limites de análise, além da comparação de vazões e cotas d'água medidas e simuladas.

Por fim, com o auxílio do *software* MIKE FLOOD, realizou-se a simulação de rompimento hipotético, com o estudo da onda de cheia formada nos primeiros cento e dez minutos após o rompimento e análise do mapa de inundação georreferenciado, com enfoque nas áreas urbanas imediatamente à jusante da UHE Tucuruí (Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte e núcleo urbano do município de Tucuruí-PA).

Vale ressaltar que o trabalho apenas analisou o hidrograma defluente originado a partir de um cenário de rompimento hipotético e o seu consequente mapa de inundação. Neste sentido, não foram realizadas análises a respeito dos impactos ambientais, sociais ou

econômicos decorrentes do cenário adotado. A Figura 9 apresenta um fluxograma com todas as etapas de elaboração da pesquisa.

Figura 9 – Sequência de métodos da pesquisa.



3.1. CARACTERIZAÇÃO DA UHE TUCURUÍ

Inicialmente, levantaram-se informações sobre a construção da UHE Tucuruí, por meio de revisão de projetos e documentos técnicos da Eletrobrás Eletronorte no período de janeiro a março de 2017. A partir desta análise, caracterizou-se no que diz respeito às dimensões das estruturas, materiais e técnica construtiva utilizada e condições geológicas da fundação da barragem. As informações foram essenciais para determinar o cenário e os parâmetros da brecha de ruptura na simulação computacional.

Os aspectos operacionais e de segurança da barragem foram descritos a partir da realização de uma visita técnica ao setor de Manutenção Civil da Superintendência de Geração Hidráulica (OGHTC) da Eletrobrás Eletronorte, na qual foram definidos os períodos críticos do ano para a operação e também os locais que apresentam infiltrações, recalques ou qualquer outra anomalia que afete a segurança da barragem. Com o intuito de refinar o modelo hidrodinâmico utilizado, no que se refere à operação hidráulica dos dispositivos de descarga, realizou-se a estudo do manual de operação da UHE Tucuruí.

Com o auxílio de técnicos responsáveis pela segurança da própria empresa, efetuou-se a classificação da barragem por categoria de risco e DPA. O procedimento seguiu a metodologia apresentada na resolução normativa da ANEEL nº 696/2015, sendo analisados e pontuados todos os parâmetros relativos às características técnicas, estado de conservação, plano de segurança e DPA da UHE Tucuruí, preenchendo-se os itens conforme o modelo apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Modelo de planilha utilizada para a classificação da barragem.

Parâmetros		Pontuação
Características técnicas	Altura do barramento (m)	
	Comprimento do barramento (m)	
	Tipo de barragem quanto ao material de construção	
	Tipo de fundação	
	Idade da barragem (anos)	
	Vazão de projeto	
	Casa de força	
	Total de pontos	
Estado de Conservação	Confiabilidade das estruturas extravasoras	
	Confiabilidade das estruturas de adução	
	Percolação	
	Deformações e recalques	
	Deterioração dos taludes/paramentos	
	Eclusa	
	Total de pontos	
Plano de segurança da barragem	Existência de documentação de projeto	
	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança de Barragem	
	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e monitoramento	
	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem	
	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação	
	Total de pontos	
DPA	Volume total do reservatório	
	Potencial de perdas de vidas humanas	
	Impacto ambiental	
	Impacto sócio-econômico	
	Total de pontos	

Fonte: Adaptado de ANEEL (2015).

Após a soma da pontuação obtida para cada parâmetro analisado, a classificação final da barragem, nas categorias A, B ou C, seguiu os critérios estabelecidos pela ANEEL na matriz de classificação da resolução supracitada. Tal procedimento é essencial para a definição e elaboração do plano de segurança da barragem, conforme o disposto na lei nº 12.334/2010, além disso, indica a necessidade de elaboração do PAE e conseqüentemente, a necessidade de se realizar o estudo de rompimento hipotético do barramento.

3.2. COLETA DE DADOS HIDROLÓGICOS E TOPOBATIMÉTRICOS

3.2.1. Dados hidrológicos

A análise de dados hidrológicos à montante e à jusante da barragem em estudo se configura como etapa essencial para a definição do modelo hidrodinâmico computacional. Sendo assim, coletaram-se dados referentes ao volume do reservatório para a definição do hidrograma de ruptura, estudou-se a capacidade de descarga das estruturas extravasoras (vertedouros e tomadas d'água) e examinaram-se as características do canal à jusante do barramento, focando no comportamento hidrológico do rio Tocantins (vazões e cotas) e no padrão de ocupação de suas margens.

3.2.1.1. *Volume do reservatório*

A geometria e o volume de água armazenado no reservatório no momento de uma eventual ruptura é o fator determinante na definição da vazão que deve escoar pela brecha. Para a UHE Tucuruí, inexistem dados precisos sobre a geometria de todo o reservatório, principalmente em relação à sua topobatimetria. Devido a esta situação, o reservatório não foi inserido no modelo final de simulação, sendo as informações referentes ao mesmo levantadas de acordo apenas com a curva cota x área x vazão (Tabela 4).

Para efeitos de cálculo da vazão de pico da brecha e hidrograma de ruptura, foram empregados os valores referentes à cota máxima do reservatório para o momento do rompimento, ou seja, a cota máxima de 74,00 m, com volume reservado de 50,275 km³ e área superficial de 3.007 m², o que em termos práticos representa situação crítica de operação e determina maiores áreas inundadas no vale à jusante. Ressalta-se que alterações no volume do reservatório da UHE Tucuruí originadas por barragens à sua montante foram desconsideradas.

Tabela 4 – Variáveis da curva cota x área x volume do reservatório da UHE Tucuruí.

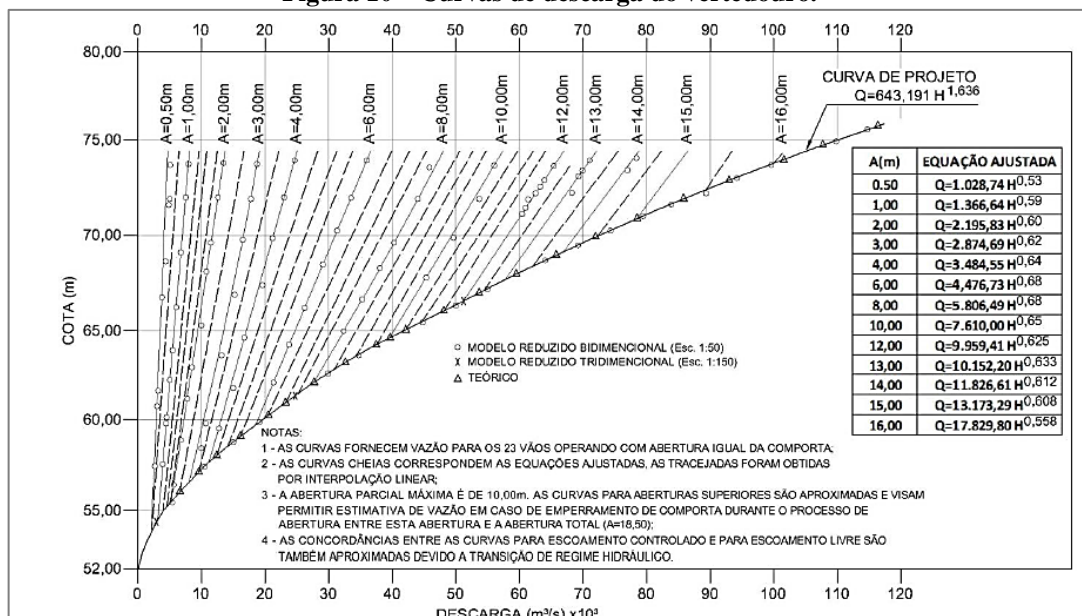
Cota (m)	Área (km ²)	Volume (km ³)
0,00	0,00	0,000
10,00	12,58	0,063
15,00	42,48	0,183
20,00	101,10	0,535
30,00	228,40	2,195
40,00	361,20	5,094
50,00	711,60	10,108
51,60	764,20	11,293
60,00	1.438,00	19,807
70,00	2.509,00	39,248
72,00 (NA máx. normal)	2.760,00	44,524
74,00 (NA máx. max.)	3.007,00	50,275

Fonte: Araújo; Lopes e Pereira (2015).

3.2.1.2. Curva de descarga das estruturas extravasoras

As estruturas extravasoras da UHE Tucuruí são compostas por seus vertedouros, que são em barragem de concreto de gravidade, com 92 m de altura e 602 m de comprimento, tendo 23 comportas de 20 m de largura por 21 m de altura cada, capacidade máxima de vazão de 110.000 m³/s e dissipação de energia em salto de esqui. A Figura 10 apresenta a curva de descarga dos vertedouros segundo a sua abertura (A), em metros.

Figura 10 – Curvas de descarga do vertedouro.



Fonte: Araújo; Lopes e Pereira (2015).

As tomadas d'água também são em barragem de concreto de gravidade, com comprimento total de 1.000 m, abrangendo 23 turbinas principais (12 de 350 MW na 1ª Etapa e 11 de 375 MW na 2ª Etapa) e 2 turbinas auxiliares de 22,5 MW cada, todas do tipo Francis. Para as tomadas d'água não foram construídas curvas de vazão, apenas se considerou o valor de vazão máxima para cada turbina, que é de 500 m³/s. Tal simplificação desconsidera as variações de cota do reservatório que ocorrem exclusivamente em função da operação das turbinas, o que não afeta significativamente os resultados da simulação.

3.2.1.3. Canal à jusante

O trecho do rio Tocantins à jusante da barragem de Tucuruí que foi estudado, tem a extensão aproximada de 18 km, limitado à praia de Pederneiras, no município de Tucuruí-PA (Figura 11). Tal escolha foi pautada na disponibilidade de dados topobatimétricos para essa região e também na possibilidade de direcionamento e análise direta das áreas possivelmente inundadas na área urbana do município de Tucuruí-PA e na Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte, localizadas imediatamente à jusante do barramento, dentro dos limites considerados.



Fonte: Elaborado com o ArcGIS 10.5 (2017).

A caracterização das margens do rio Tocantins no trecho definido foi realizada com base no padrão de ocupação do solo, observado com o auxílio do Google Earth Pro. Os usos foram classificados como urbanos ou rurais, sendo os urbanos caracterizados pela concentração de edificações e vias de acesso, e os rurais subdivididos em áreas de vegetação mais densa (floresta) e áreas cultiváveis ou de pastagem (com vegetação menos densa). De acordo com essa classificação, foram atribuídos os valores de coeficiente de rugosidade ou de Manning para as regiões, conforme o disposto por Chow (1959). A Tabela 5 apresenta os valores dos coeficientes de rugosidade para cada região do estudo.

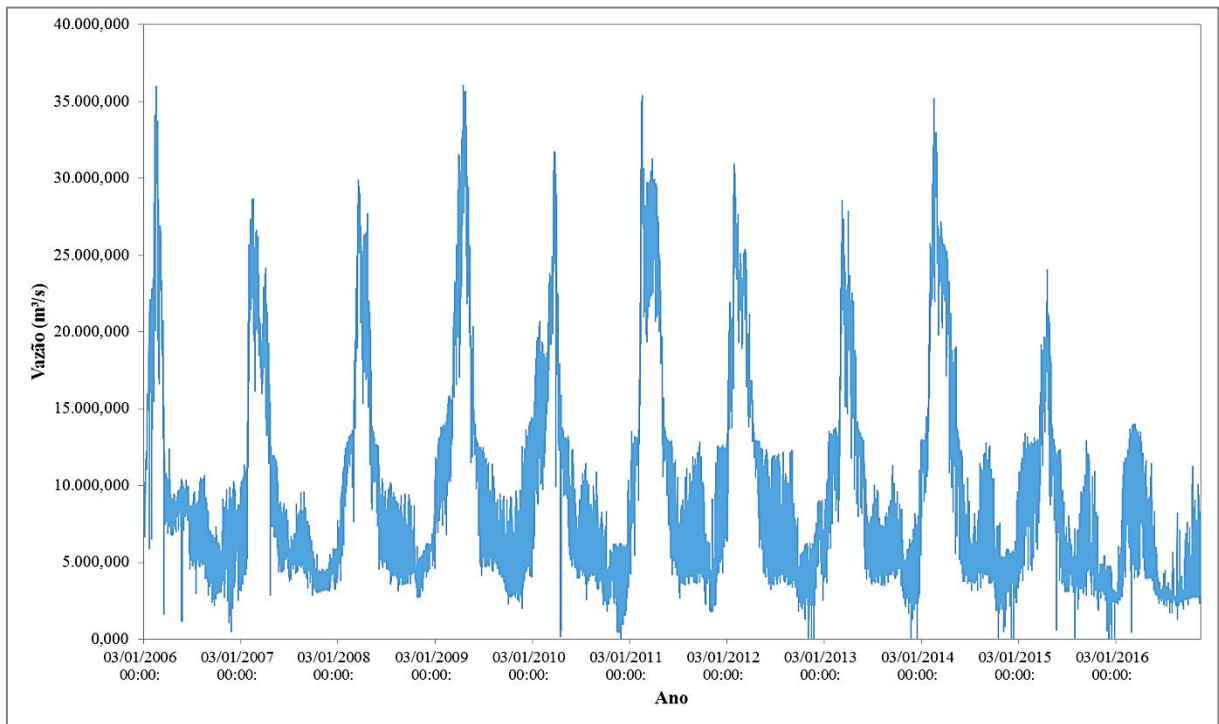
Tabela 5 – Coeficientes de rugosidade (n) utilizados no estudo.

Padrão de ocupação do solo	Coeficiente de rugosidade (n)	Observação
Leito do rio	0,020	Curso d'água natural, com leito estável
Áreas de cultivo/pastagens	0,040	Arbustos e vegetação rasteira
Áreas urbanas	0,120	Edificações e construções em geral
Áreas de floresta	0,150	Árvores de grande porte

Os dados referentes à vazão do rio Tocantins à jusante da barragem foram fornecidos pela Eletrobrás Eletronorte, enquanto os dados referentes às cotas d'água foram coletadas através da estação fluviométrica Tucuruí (código 29700000), localizada no município de Tucuruí-PA, na bacia do rio Tocantins e com uma área de drenagem de 764.000 km². A estação está sob responsabilidade da ANA e é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), tendo dados mensais de cotas do rio disponíveis de julho de 1969 até fevereiro de 2016.

A Eletrobrás Eletronorte registra os dados de vazão e cotas d'água no município de Tucuruí-PA diariamente desde 1984, quando as primeiras turbinas iniciaram sua operação, através da estação fluviométrica Tucuruí Barramento (código 29680080). No entanto, com a conclusão e início de operação da 2ª etapa de obras (casa de força 2), no ano de 2006, houve uma mudança do regime hidrológico do trecho em análise, logo, os dados considerados neste estudo são os referentes aos registros obtidos a partir deste ano, conforme o mostrado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Série histórica de vazões defluentes da UHE Tucuruí.



3.2.2. Dados topobatimétricos

Os dados topográficos utilizados no modelo bidimensional foram obtidos a partir de imagens do modelo digital de elevação *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)* fornecidos pelo *United States Geological Survey (USGS)*. O MDE ASTER é um produto do Ministério da Economia, Comércio e Indústria dos Estados Unidos e da Agência Aeroespacial Norteamericana (NASA), disponibilizado na resolução espacial de um arco de segundo, o que representa aproximadamente 30 m no sistema de coordenadas e *datum* de referência *World Geodetic System (WGS84)*, sendo as curvas de nível espaçadas a cada 30 m, neste estudo específico (USGS, 2011).

Em relação à batimetria do canal à jusante do barramento, não foi possível a obtenção de dados precisos junto à Eletrobrás Eletronorte, sendo assim, a calha do rio Tocantins foi simplificada como um canal trapezoidal retangular, uma vez que o rio apresenta largura (L) muito superior à sua profundidade (y). Para essas situações ($L \gg y$), assume-se que o raio hidráulico da seção seja aproximadamente igual à sua profundidade ($R_H \cong y$). Isto é válido, uma vez que, para canais largos, pode-se desprezar para o cálculo das forças de resistência a contribuição das paredes laterais, sendo considerado apenas o atrito existente no fundo (GOMES, 2003).

Nesse contexto, as seções batimétricas do rio Tocantins foram definidas a partir de um raio hidráulico de referência, calculado a partir dos dados da estação fluviométrica de Tucuruí (código 29700000), conforme a metodologia apresentada por Lopes *et al.* (2017). Nessa metodologia, o cálculo da geometria da seção se baseou no valor correspondente à seção plena do perfil topobatimétrico no referido posto fluviométrico, sendo viabilizado através da análise do comportamento do raio hidráulico e da área molhada na seção de controle e a cota de fundo obtida pela diferença entre a profundidade do perfil transversal e a cota d'água associada ao raio hidráulico adotado.

3.3. DEFINIÇÃO DO CENÁRIO PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Com base na caracterização da barragem e no estudo hidrológico da área analisada, definiu-se o cenário de ruptura que seria adotado na simulação computacional. Para tal, considerou-se a situação mais crítica do ponto de vista hidrológico e estrutural, ou seja, o mecanismo de ruptura que deve ocasionar danos máximos ao vale à jusante do barramento. Vale ressaltar, que todos os cenários possíveis para a barragem em questão devem analisados e considerados, uma vez que a probabilidade de ruptura nunca é nula, portanto, não pode ser desprezada (ELETROBRÁS, 2003).

Para este estudo, o cenário de ruptura adotado considera o rompimento total da barragem de concreto de gravidade da UHE Tucuruí por galgamento (*overtopping*), devido a um evento hidrológico maior que o previsto no projeto das estruturas extravasoras (cheia maior que a decamilenar). Vale destacar que não foi realizada uma análise de potenciais modos de ruptura da barragem, o cenário foi selecionado considerando que maximiza os danos potenciais ao vale à jusante e conseqüentemente diminui o tempo de resposta para a população exposta, uma vez que o rompimento de barragens de concreto resulta em grandes brechas de ruptura e com tempo de formação reduzido quando comparado às barragens de terra e enrocamento. Além disso, a ICOLD aponta o galgamento como causa primária da maioria dos acidentes com barragens, tratando-se de uma situação não controlável pelo setor de segurança do empreendimento.

Ehsan *et al.* (2013) alertam que as mudanças climáticas drásticas, com chuvas extremas, aumentam os níveis de água no reservatório em grandes extensões e, em última instância, podem culminar no rompimento da barragem. Ademais, o galgamento é apontado

pelo *National Performance of Dams Program* (NPDP) vinculado a Universidade de Stanford, nos Estados Unidos, como a principal causa de rompimentos em barragens norte americanas de 1975 a 2001.

3.3.1. Brecha de ruptura

Por se tratar de A definição da brecha de ruptura, relativamente à sua geometria e tempo de formação, foi realizada conforme as recomendações da Eletrobrás (2003) e USACE (2014) e são especificadas na Tabela 6. O momento da falha foi relacionado ao nível de água do reservatório através de sua curva cota x volume e para a simulação computacional, o modo de falha foi inserido através de um hidrograma de ruptura como condição de contorno à montante do trecho analisado.

Tabela 6 – Parâmetros essenciais de geometria e tempo de formação da brecha de ruptura.

Tempo de formação da brecha [h]	0,1
Forma da brecha	Retangular
Profundidade da brecha [m]	92
Largura média da brecha [m]	450
Nível de água inicial no reservatório [m]	74,00
Área do reservatório [km²]	3.007
Volume do reservatório [km³]	50.275

Por se tratar de um rompimento na barragem de concreto de gravidade, considerou-se a largura média da brecha final com um valor menor que a metade do comprimento da crista da barragem, que é de 1.000 m, correspondente às casas de força 1 e 2. Como o cenário considera a ruptura total, a profundidade final da brecha foi de 92 m, ou seja, a altura do barramento. O nível de água na situação inicial é o máximo maximorium (74,00 m) e o volume do reservatório correspondente a este nível de água (50,275 km³). As dimensões adotadas para a brecha de ruptura podem ser observadas na Fotografia 4. Quanto ao tempo de formação, adotou-se 0,1 h (6 minutos), que é o menor tempo recomendado pela Eletrobrás (2003) e USACE (2014) para barragens de concreto de gravidade.

Fotografia 4 – Dimensões finais da brecha de ruptura considerada.



Fonte: Adaptada de Eletrobrás Eletronorte (2017).

3.3.2. Cálculo do hidrograma de ruptura

As diversas metodologias encontradas na literatura técnica para definição da vazão de pico em um rompimento hipotético de barragens são empíricas e resultam em valores discrepantes entre si, conforme o observado na Tabela 7. Para o presente estudo, o cálculo da vazão de pico foi baseado na fórmula de Wetmore e Fread (1981) *apud* French (1985), uma vez que é a única a considerar a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um determinado intervalo de tempo.

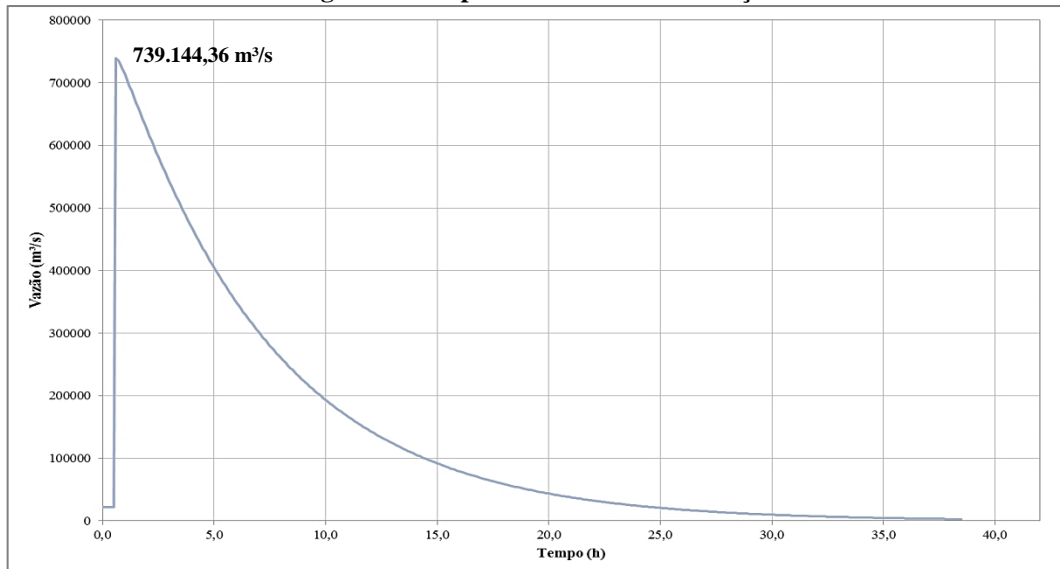
Tabela 7 – Vazões de pico calculadas para diferentes equações empíricas.

Referência	Q_p (m ³ /s)
Lou (1981) <i>apud</i> Mascarenhas (1990)	43.092,51
Hagen (1982)	1.446.631,23
Saint-Venant <i>apud</i> USACE (1997)	210.559,64
Schoklistch (1917) <i>apud</i> ICOLD (1998)	141.247,70
Bureau of Reclamation (1982) <i>apud</i> Bureau of Reclamation (1987)	81.613,33
Vertedor de Soleira Espessa (SINGH. 1996)	675.061,25
Wetmore e Fread (1981) <i>apud</i> French (1985)	739.144,36

Após a definição da vazão de pico, torna-se necessária a definição e cálculo do hidrograma de ruptura, neste caso foi adotado o hidrograma de decaimento parabólico (Gráfico 5). Para o cálculo do hidrograma, considerou-se o valor do parâmetro K igual a 0,015, a fim de que a área sob a curva fosse aproximadamente igual ao volume armazenado

no reservatório no momento da ruptura da barragem. Além disso, o tempo de base estimado é de 38 horas, ou seja, este é o tempo necessário para que toda a água acumulada no reservatório escoe pela brecha de ruptura estabelecida.

Gráfico 5 – Hidrograma de ruptura adotado na simulação hidrodinâmica.

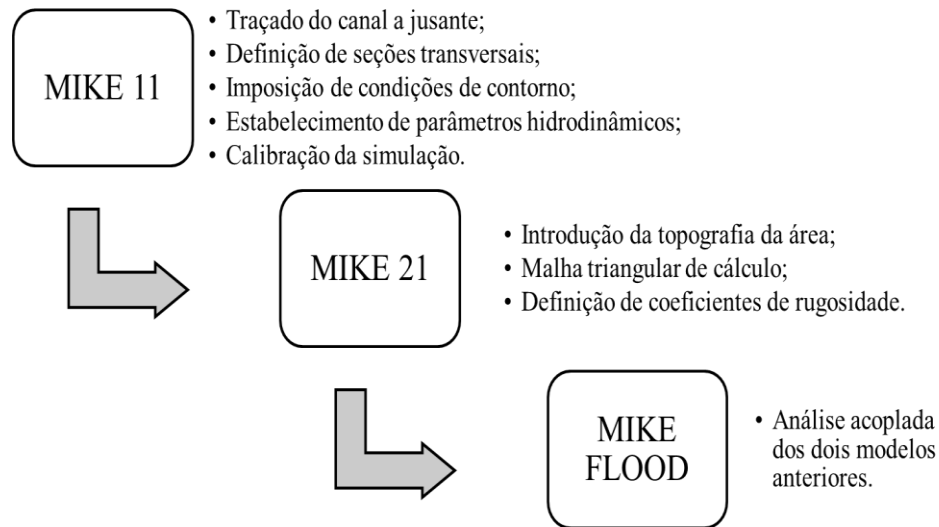


3.4. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COMPUTACIONAL

Na modelagem hidrodinâmica foram realizadas operações no *software* MIKE 11 inicialmente, e posteriormente no *software* MIKE 21, sendo integradas através do *software* MIKE FLOOD. No modelo unidimensional desenvolvido no MIKE 11, definiram-se o traçado, as seções transversais, condições de contorno e parâmetros hidrodinâmicos do canal à jusante da UHE Tucuruí. Para a calibração do modelo, realizou-se a comparação de níveis d'água medidos pela estação fluviométrica de Tucuruí no ano de 2012 e os simulados pelo próprio *software* para o mesmo período.

Já o modelo bidimensional, desenvolvido no MIKE 21, inclui as informações sobre a topografia da planície de inundação, assim como a definição do coeficiente de rugosidade de Manning das margens do rio Tocantins na área estudada. Neste modelo também se gerou a malha triangular de cálculo, que é fundamental para a determinação da mancha de inundação. Por fim, através do *software* MIKE FLOOD, pôde-se realizar a simulação de rompimento e verificaram-se as áreas inundadas para o cenário de ruptura considerado. O fluxograma da Figura 12 mostra a sequência de procedimentos adotados nesta etapa da pesquisa.

Figura 12 – Sequência de procedimentos adotados na simulação hidrodinâmica.



3.4.1. MIKE 11

3.4.1.1. Seções transversais

Foram estabelecidas quatorze seções transversais principais no rio Tocantins à jusante da UHE Tucuruí em pontos em que as dimensões do rio não variam significativamente, especialmente sua largura, conforme o observado na Tabela 8. Cada seção indica a forma da calha do rio, com destaque para sua profundidade e largura, sendo também inserido o coeficiente de rugosidade de Manning.

Tabela 8 – Seções transversais principais inseridas no *software* MIKE 11.

Nº	Posição (m)	Largura (m)	Raio hidráulico (m)	Profundidade (m)	Cota de fundo (m)
1	0,0	986,4	13,79	14,19	-1,42
2	734,7	1396,0	13,79	14,07	-1,30
3	1759,7	1795,0	13,79	14,01	-1,24
4	2784,9	1896,0	13,79	13,99	-1,22
5	3887,0	1312,0	13,79	14,09	-1,32
6	4996,0	1451,0	13,79	14,06	-1,29
7	6140,9	1354,0	13,79	14,08	-1,31
8	7828,5	862,0	13,79	14,25	-1,48
9	9747,5	1263,0	13,79	14,10	-1,33
10	11379,5	1259,0	13,79	14,10	-1,33
11	13300,5	970,0	13,79	14,19	-1,42
12	15021,5	1206,0	13,79	14,11	-1,34
13	16688,9	1576,0	13,79	14,04	-1,27
14	18000,0	2294	13,79	13,96	-1,19

A primeira seção transversal foi afastada dois quilômetros do corpo do barramento, uma vez que esta zona é de difícil modelagem e não segue o padrão do rio Tocantins, tendo geometria muito irregular. A profundidade e cota de fundo das seções principais foram determinadas a partir do raio hidráulico da seção de controle (onde se encontra a estação fluviométrica de Tucuruí), seguindo a metodologia adotada por Lopes *et al.* (2017) em que se obtiveram resultados positivos para a mesma área do estudo, não apresentando erros significativos para a simulação. As demais seções transversais necessárias para a simulação foram obtidas através da interpolação a cada 100 m das seções principais, realizada no MIKE 11 e totalizando 187 seções transversais (Figura 13).

Figura 13 – Seções transversais inseridas no software MIKE 11.



3.4.1.2. Condições de contorno

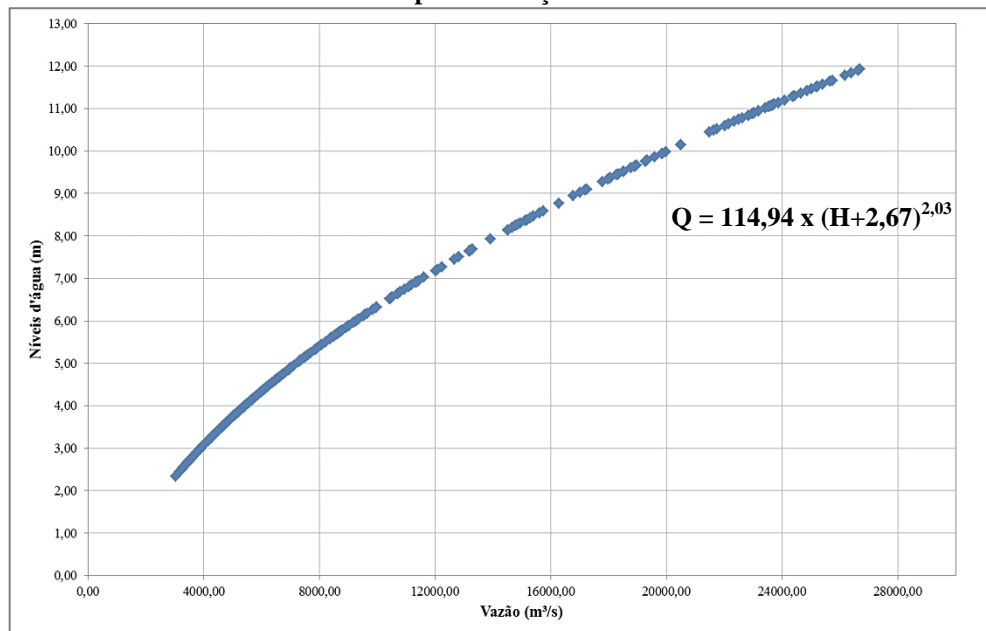
Para a modelagem hidrodinâmica, devem-se adotar alguns parâmetros que refletem o comportamento hidrológico dos pontos à montante e à jusante da área de estudo. Em geral, essas condições podem ser hidrogramas, vazões medidas ou curvas de descarga. Para o modelo aqui desenvolvido são consideradas as seguintes condições de contorno:

- à montante: a vazão para os primeiros trinta minutos de simulação corresponde a 21.600 m³/s, que é a vazão média calculada quando o nível do reservatório estava próximo à cota máxima de 74,0 m, considerando a série histórica de janeiro de 2006 a outubro de 2016. Posteriormente, inclui-se o hidrograma de ruptura calculado. Vale

comentar que de acordo com o projeto do empreendimento a cota de coroamento da barragem de concreto está em 78,0 m, entretanto os dados de vazões disponíveis se restringem à cota 74,0 m;

- à jusante: a curva chave para o trecho em estudo do rio Tocantins, obtida através da análise de vazões e níveis d'água registrados na estação fluviométrica Tucuruí (Gráfico 6). O ajuste e cálculo da equação que define a correlação entre as duas variáveis foram realizados na planilha eletrônica Microsoft Excel com o auxílio do algoritmo Solver, que utiliza o método do mínimo erro quadrático.

Gráfico 6 – Curva chave para a estação fluviométrica de Tucuruí.



3.4.1.3. Calibração do modelo 1D

A calibração do modelo unidimensional foi efetivada a partir de dados de níveis d'água da estação fluviométrica de Tucuruí e vazões defluentes da UHE Tucuruí para o ano de 2012. A escolha por tal ano foi pautada na disponibilidade de dados para praticamente todos os dias do ano e também por apresentar vazões vertidas, o que é uma das premissas estipuladas para a simulação.

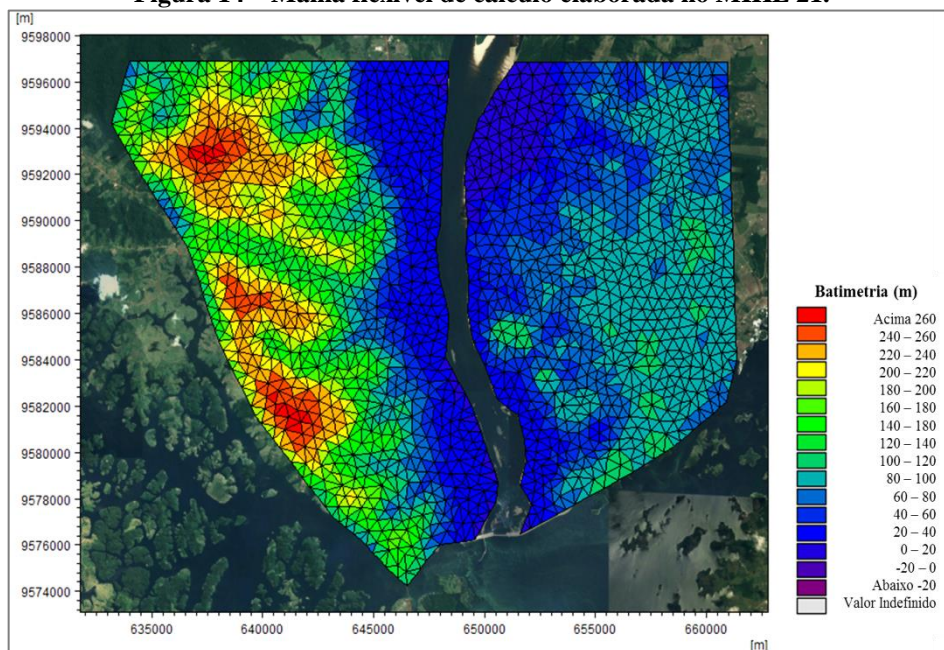
Através da introdução das vazões defluentes no modelo, verificou-se se os níveis d'água atingidos se aproximam aos medidos *in loco* pela estação fluviométrica de Tucuruí. Ademais, para o domínio da simulação, foi desconsiderada a influência de escoamentos

gerados por precipitação e/ou outras fontes, também não é considerado o efeito da drenagem urbana (superficial e profunda) e da evapotranspiração e infiltração da água no solo.

3.4.2. MIKE 21

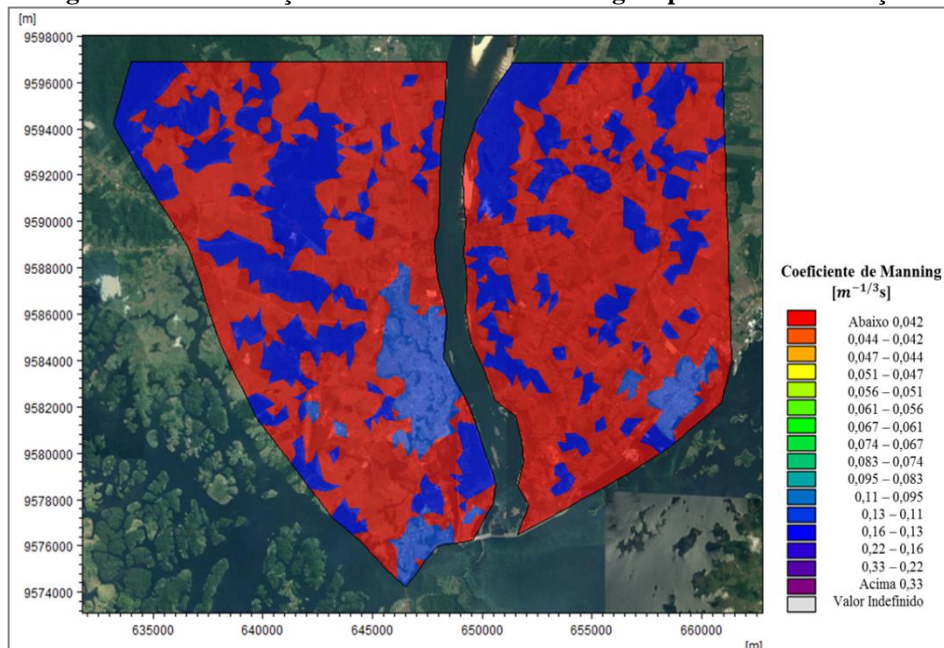
Para simular a propagação da onda de cheia na planície de inundação, utilizou-se o MIKE 21 com uma malha de elementos uniforme e triangular, onde foram inseridos os dados do modelo digital de elevação ASTER do USGS e foram atribuídos os valores de coeficientes de rugosidade (n) de acordo com a classificação previamente estabelecida. Na Figura 14 é apresentada a malha flexível de cálculo para o modelo 2D.

Figura 14 – Malha flexível de cálculo elaborada no MIKE 21.



A malha gerada conta com elementos triangulares uniformes com área limitada a 100.000 m² em todo o domínio do modelo. A uniformidade dos elementos garante ganho computacional à simulação e permite o cálculo eficiente do escoamento pela planície de inundação. Após a definição dos elementos da malha, esta foi interpolada com os dados topográficos e, em seguida, criou-se um arquivo contendo os valores do coeficiente de Manning, de acordo com o uso do solo nas margens do rio Tocantins (Figura 15) determinados a partir da observação de imagens do Google Earth Pro. Neste estudo, as fronteiras da malha foram consideradas fechadas, o que significa afirmar que as mesmas funcionam como paredes verticais. Além disso, os níveis d'água iniciais na planície de inundação foram considerados nulos (superfície seca).

Figura 15 – Distribuição do coeficiente de Manning na planície de inundação.



3.4.3. MIKE FLOOD

O *software* MIKE FLOOD foi utilizado para realizar a simulação hidrodinâmica integrada dos modelos unidimensional e bidimensional desenvolvidos nos *softwares* MIKE 11 e MIKE 21, respectivamente. Para tal, estabeleceram-se ligações do tipo lateral para cada seção transversal do modelo 1D e a planície de inundação (modelo 2D), nas margens esquerda e direita do rio Tocantins. Para essa condição de acoplamento, o comportamento hidráulico da ligação se assemelha ao de um vertedor de soleira espessa, onde ocorre o escoando da água da calha do rio para a planície de inundação de acordo com a diferença entre os níveis d'água nas duas regiões.

Para a simulação hidrodinâmica computacional, considerou-se o início da ruptura às 00h30m00s do dia 01/01/2018, com término da formação da brecha após 6 minutos. O passo de tempo considerado foi de 1 segundo, definido a fim de aumentar a precisão dos cálculos e evitar inconsistências no *software*. O período de simulação foi limitado a uma hora e cinquenta minutos após o rompimento, devido a instabilidades no *software*, ocasionadas pela simplificação dos dados de batimetria do rio Tocantins. Os principais resultados gerados foram o comportamento da onda de cheia e o mapa de inundação georreferenciado, que são compatíveis com o módulo MIKE Animator Plus, permitindo a visualização dos mesmos em três dimensões, facilitando a análise e compreensão do fenômeno pelo usuário.

3.4.3.1. *Comportamento inicial da onda de cheia*

A análise da onda de cheia foi realizada através da observação das vazões e níveis d'água na seção transversal 6.034,35, onde se localiza a região central da cidade de Tucuruí. A avaliação do hidrograma defluente nesta seção refere-se ao tempo para se atingir a máxima vazão no trecho e a altura da onda de cheia provocada pelo rompimento hipotético da UHE Tucuruí. Tais informações são importantes para a definição do tempo de reação da população e dos órgãos de defesa civil.

3.4.3.2. *Elaboração do mapa de inundação georreferenciado*

A partir do resultado da simulação computacional foi elaborado o mapa de inundação integrado com a imagem georreferenciada da área, nos quais foram analisadas as seguintes informações:

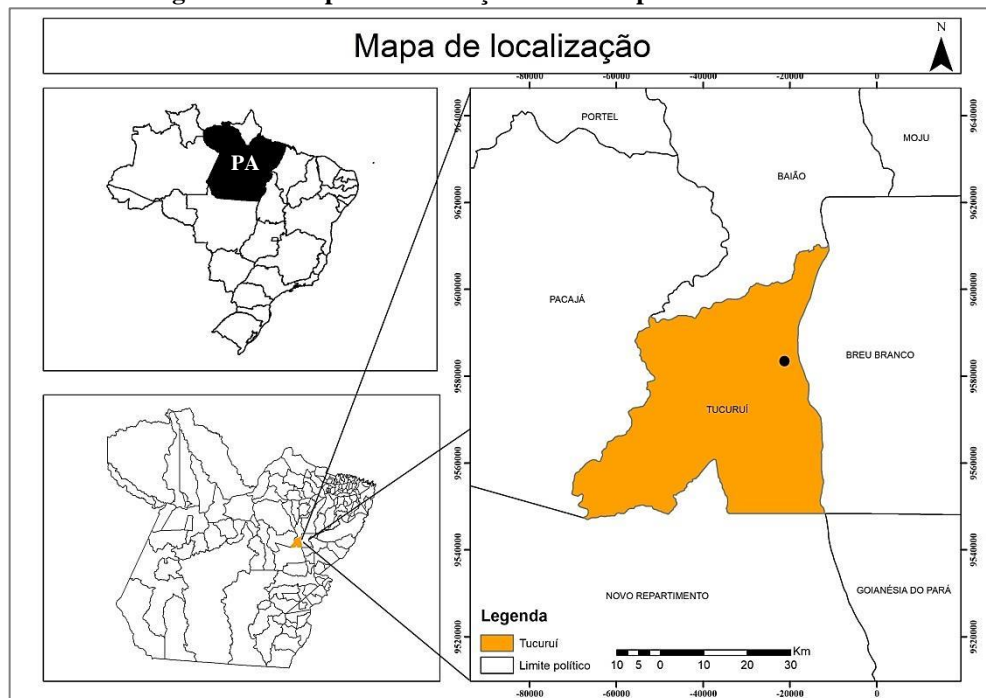
- evolução temporal da inundação: análise quantitativa da mancha de inundação formada imediatamente após a formação total da brecha de ruptura e no períodos de quinze, sessenta e cento e dez minutos após a mesma;
- análise das áreas inundadas: realizada de maneira qualitativa, verificando-se as regiões e prédios atingidos, principalmente no núcleo urbano da cidade de Tucuruí-PA e na Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte;
- identificação dos tempos para se atingir as máximas cotas de inundação, assim como o tempo de duração da mesma.

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DA UHE TUCURUÍ

A UHE Tucuruí foi construída no Rio Tocantins, especificamente no município de Tucuruí, localizado a 300 km em linha reta ao sul da capital paraense – Belém, conforme o observado na Figura 16. A construção da UHE Tucuruí foi realizada em duas etapas entre os anos de 1975 e 2006. O empreendimento conta ainda com um sistema de transposição desnível formado por duas eclusas e um canal intermediário, concluído em 2010.

Figura 16 – Mapa de localização do município de Tucuruí-PA.



Fonte: Elaborado com o ArcGIS 10.5 (2017).

A primeira etapa de construção da UHE Tucuruí consistiu na instalação de doze máquinas de 350MW, sendo executados entre 1975 e 1992, sendo que a primeira unidade geradora entrou em operação em 1984. Já a segunda etapa de construção contou com a instalação de onze unidades geradoras de 375MW, entre 1998 e 2006. Logo, a capacidade total instalada é de 8370 MW, caracterizando-se como a segunda maior usina hidrelétrica genuinamente brasileira, ficando atrás apenas da UHE Belo Monte, no rio Xingu.

As estruturas que compõem o barramento da UHE em estudo são constituídas de diversos materiais, destacando-se as estruturas de concreto, terra e terra-enrocamento, todas funcionando por gravidade. As barragens das margens direita e esquerda são as componentes

em terra e terra-enrocamento, tendo um comprimento de 5.308 m, enquanto vertedouros, casas de força 1 e 2 e eclusas são constituídas de concreto massa, tendo uma extensão aproximada de 1.774 m. Outras características técnicas importantes da UHE são apresentadas na Tabela 9. Além disso, o Anexo B apresenta o arranjo geral do empreendimento e as seções transversais das casas de força 1 e 2.

Tabela 9 – Características técnicas do barramento da UHE Tucuruí.

Comprimento da barragem de concreto	1.774 m
Altura máxima da barragem de concreto	92 m
Comprimento das barragens de terra e enrocamento	5.308 m
Altura máxima	95 m
Tipo de fundação	Rocha alterada dura com tratamento
Tipo de vertedouro	De superfície, controlado por comporta de segmento.
Vazão Média de Longo Termo	11.107 m ³ /s
Vazão do vertedouro	110.000 m ³ /s
Tempo de recorrência	10.000 anos

No que se refere à barragem de terra da margem direita, sua composição é dada por um trecho de terra homogênea e outro trecho de enrocamento, sob o qual está o antigo leito do rio Tocantins, sendo considerada uma região sensível do ponto de vista geológico. Trata-se do aterro com maior altura e comprimento do empreendimento, em que a proteção do talude à montante foi realizada em enrocamento e enrocamento compactado, enquanto a proteção do talude à jusante foi realizada com espécies gramíneas locais.

Após a barragem de terra da margem direita existem as estruturas de concreto que compõem os vertedouros e as casas de força da UHE Tucuruí, conforme o observado na Fotografia 5. Trata-se de uma estrutura construída em concreto em gravidade, possuindo comprimento total de 1.774 m e altura máxima de 92 m. Vale destacar a presença de defletores de fluxo pela margem direita, à montante, na junção entre o vertedor e a barragem de enrocamento da margem direita, com a função de direcionar a contração das linhas de fluxo para a região central do vertedor, evitando assim sobrecargas hidráulicas na transição entre a barragem de terra e a de concreto.

Fotografia 5 – Arranjo geral das estruturas de concreto da UHE Tucuruí.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Nogueira (2016).

Já na margem esquerda, a composição do corpo do barramento é formada basicamente por silte argiloso compactado, à montante e à jusante do filtro central vertical, que por sua vez foi construído em areia natural limpa. Para os trechos que possuem menor altura (menores que 30 metros), a composição é de argila siltosa ou silte argiloso compactado. Há uma maior incerteza sobre a composição e detalhes construtivos desta zona da UHE, uma vez que seu projeto original sofreu algumas alterações após a realização da segunda etapa de obras e a construção da casa de força 2 (LARA, 2016).

4.1.1. Aspectos operacionais das estruturas extravasoras

O dimensionamento da UHE Tucuruí foi realizado para que se mantenha o regime de regulação natural de cheias do rio Tocantins. Sendo assim, as normas de operação das estruturas extravasoras e do reservatório, que não possui volume de espera para o controle de cheias, estabelecem a operação em três níveis d'água característicos:

- atenção: sempre que o nível d'água do reservatório estiver abaixo da cota 66,10 m (cota mínima operacional);
- aleta: sempre que o nível d'água do reservatório estiver entre as cotas 66,10 m e 74,00 m;
- emergência: sempre que o nível d'água do reservatório ultrapassar a cota 74,00 m (cota de máximo maximorum).

O nível do reservatório é regulado diretamente pela operação dos vertedouros e casas de força, que por sua vez devem sempre obedecer às exigências estabelecidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Dentro desse contexto, em alguns anos é interessante que a UHE Tucuruí não diminuía o nível do seu reservatório, ou seja, não libere água pelos vertedouros, a fim de manter níveis d'água elevados e que proporcionem o estoque de energia potencial para abastecer a demanda de outras cidades e/ou estados brasileiros.

4.1.2. Classificação da barragem quanto à categoria de risco e DPA

A classificação da barragem da UHE Tucuruí, quanto à sua categoria de risco e DPA, foi realizada conforme o Quadro 5 resultando, segundo a resolução normativa da ANEEL nº 696/2015, na classificação final B, ou seja, baixa categoria de risco e alto DPA. Com base nesta classificação e seguindo o disposto na mesma legislação, a empresa Eletrobrás Eletronorte deve elaborar o PAE até dezembro de 2017.

Quadro 5 – Classificação da barragem de Tucuruí quanto à categoria de risco e ao DPA.

Parâmetros	Pontuação	Faixa de Classificação
Categoria de Risco	27	Baixa
Dano Potencial Associado (DPA)	30	Alto
Classificação Final	B	Média

A baixa categoria de risco da barragem se deve basicamente por seus aspectos construtivos, que proporcionam boas condições de segurança para o empreendimento. Porém, devido ao seu grande reservatório e à presença de áreas de interesse ambiental e núcleos urbanos densamente habitados imediatamente à jusante da barragem, seu DPA é elevado. A não existência de um Plano de Segurança estruturado e a falta de informações junto aos órgãos públicos de defesa civil e à sociedade em geral, também são fatores que prejudicam a gestão da segurança do empreendimento.

No entanto, vale destacar também que a Eletrobrás Eletronorte executa com periodicidade rotinas de monitoramento e conta com um sistema de instrumentação que garante operar a UHE Tucuruí em níveis confiáveis de segurança, que são exigidos pela ANEEL, tendo uma equipe de profissionais atuando diretamente no registro e acompanhamento de deslocamentos, fissuras, infiltrações, além de outras patologias que possam ocorrer nas estruturas de concreto e terra e enrocamento.

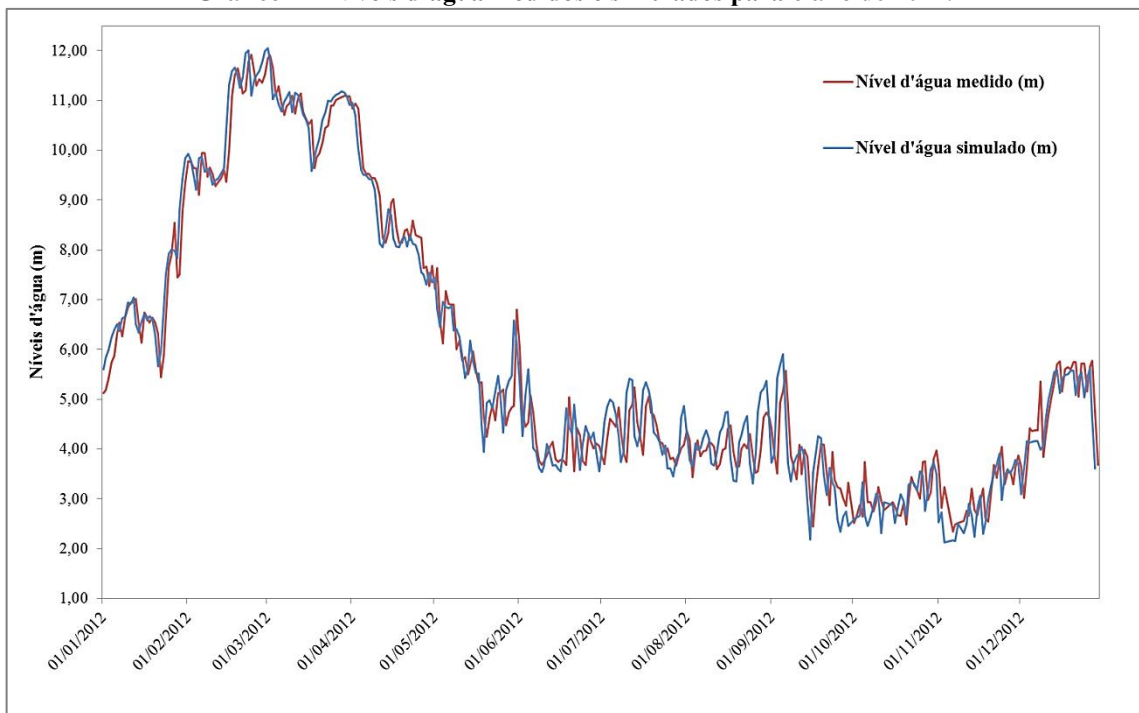
Quanto aos aspectos de segurança da UHE Tucuruí, a última ação de fiscalização da ANEEL, em 2013, constatou que de uma maneira geral, o empreendimento se encontra com todas as estruturas preservadas e em bom estado de conservação, observação válida tanto para a barragem de terra quanto para as estruturas de concreto, além de contar com documentos relativos à sua operação e manutenção organizados e arquivados na sala de controle e em formato digital (ANEEL, 2013).

4.2. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COMPUTACIONAL

4.2.1. Calibração e configuração final do modelo hidrodinâmico

A etapa de calibração do modelo unidimensional desenvolvido consistiu na análise do comportamento hidrodinâmico do rio Tocantins no trecho em estudo. Sendo assim, após a inserção do traçado do rio e de suas seções transversais e definição dos parâmetros hidráulicos para a simulação, verificou-se se os níveis d'água simulados pelo *software* MIKE 11 se aproximavam daqueles medidos na estação fluviométrica de Tucuruí (ponto de controle). Os níveis d'água simulados foram obtidos a partir da introdução das vazões defluentes da UHE Tucuruí para o ano de 2012 e podem ser observados no Gráfico 7.

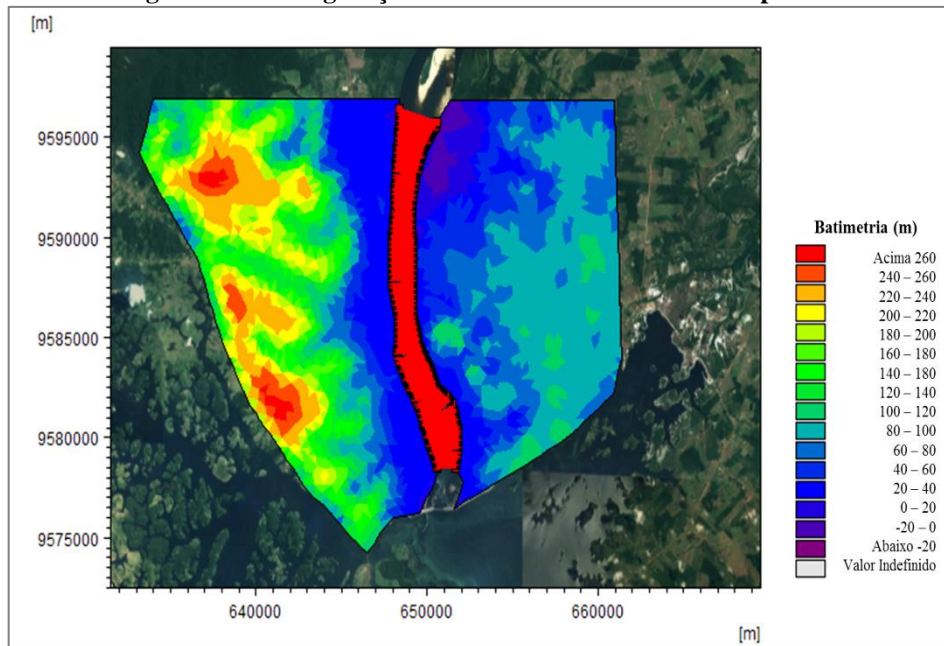
Gráfico 7 – Níveis d'água medidos e simulados para o ano de 2012.



A partir do Gráfico 7, percebe-se que os níveis d'água medidos e simulados pelo MIKE 11 apresentaram comportamento semelhante no ponto de controle, sendo as variações entre os valores mínimas. Os níveis simulados tenderam a superestimar os valores reais em média 1,58 cm. O desvio padrão das diferenças entre os níveis medidos e simulados foi de 25,3 cm (16%), com o valor máximo de 119,5 cm abaixo do nível medido e 76,90 cm acima do mesmo, o que caracteriza média estabilidade do modelo e o torna representativo, validando sua utilização para o estudo do rompimento hipotético.

Após a calibração do modelo, inseriu-se a condição de contorno de ruptura à montante (hidrograma de ruptura). O nível d'água inicial adotado no modelo unidimensional foi de 10,5 m e vazão constante de 21.600 m³/s. O modelo bidimensional considera a topografia da planície de inundação e como condição inicial apresenta o terreno seco. O acoplamento dos dois modelos foi realizado através de ligações laterais, em cada seção transversal para as margens esquerda e direita (Figura 17).

Figura 17 – Configuração final dos modelos 1D e 2D acoplados.



4.2.2. Mapas de inundação georreferenciados

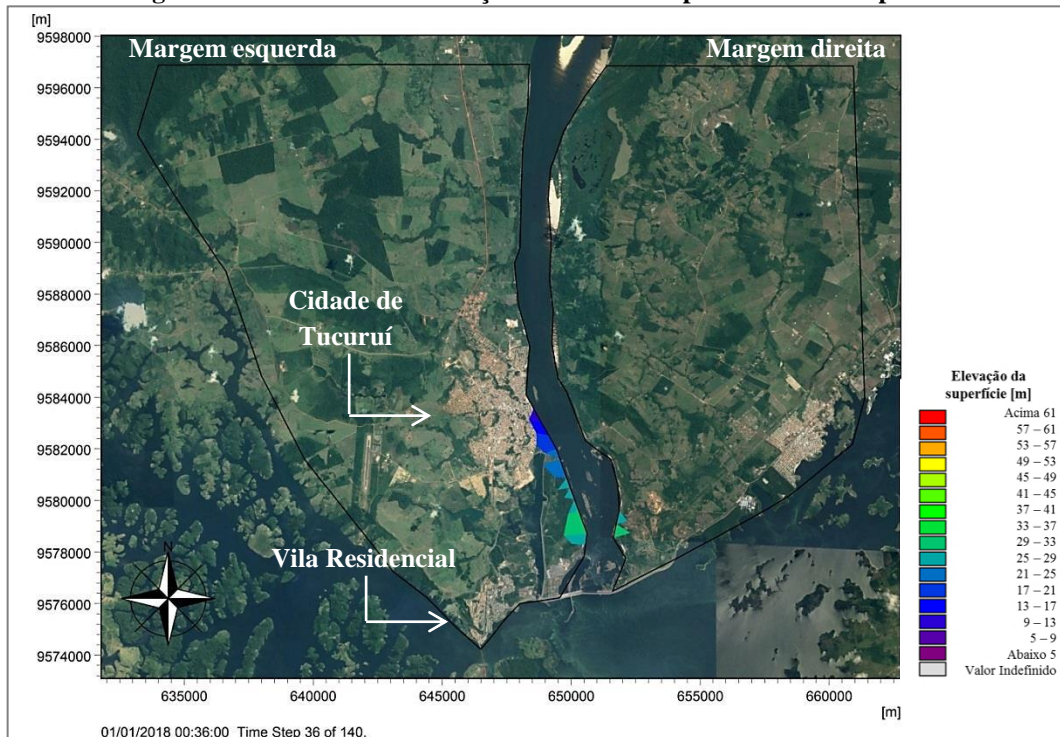
4.2.2.1. Análise das áreas inundadas

O início da formação da brecha de ruptura considerada para o cenário de galgamento e falha da barragem de concreto da UHE Tucuruí ocorre às 00h30m00s do dia 01 de janeiro

de 2018. Dois minutos após o início da ruptura (00h32m00s), a água ultrapassa a calha do rio Tocantins e se inicia o processo de inundação de suas margens. A margem esquerda, devido às características topográficas de menores elevações, é a primeira a ser inundada. Essa é a margem em que estão localizados o centro da cidade de Tucuruí e a Vila Residencial da Eletronorte.

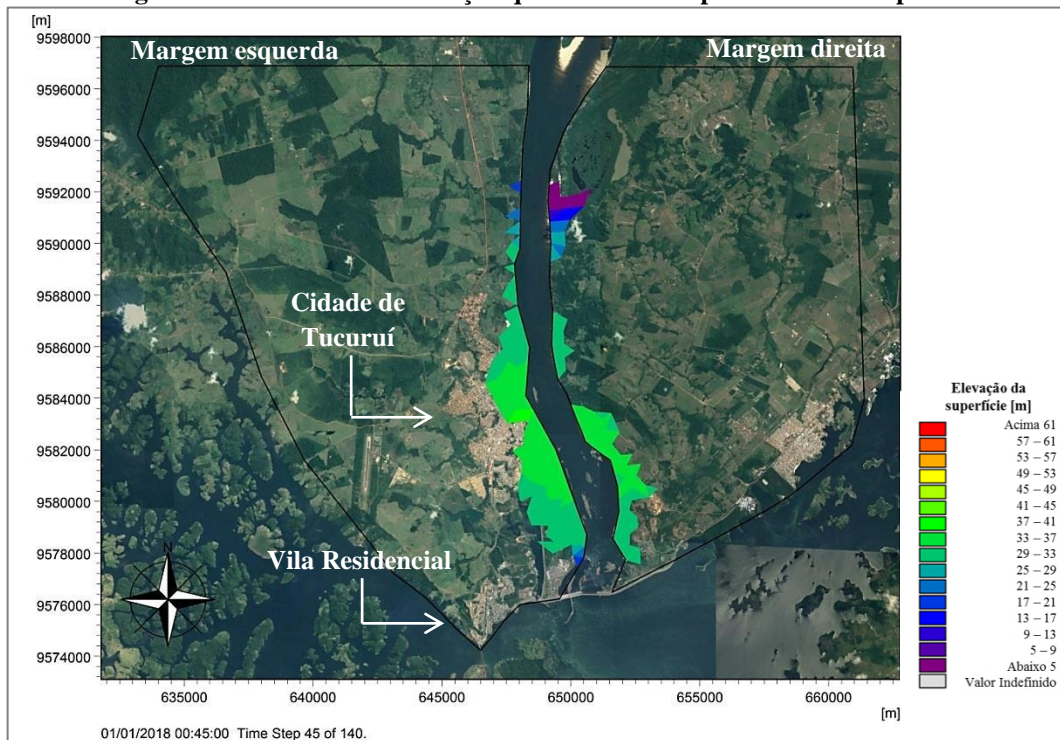
Com a formação completa da brecha de ruptura às 00h36m00s, as áreas inundadas aumentam consideravelmente na margem esquerda do rio Tocantins e atingem a área urbana de Tucuruí. A mancha de inundação apresenta uma dimensão de 2,25 km², sendo o nível d'água máximo na planície de inundação igual a 6,4 m, o que resulta em uma elevação máxima de 30,7 m na margem esquerda do rio Tocantins (Figura 18).

Figura 18 – Mancha de inundação seis minutos após o início da ruptura.



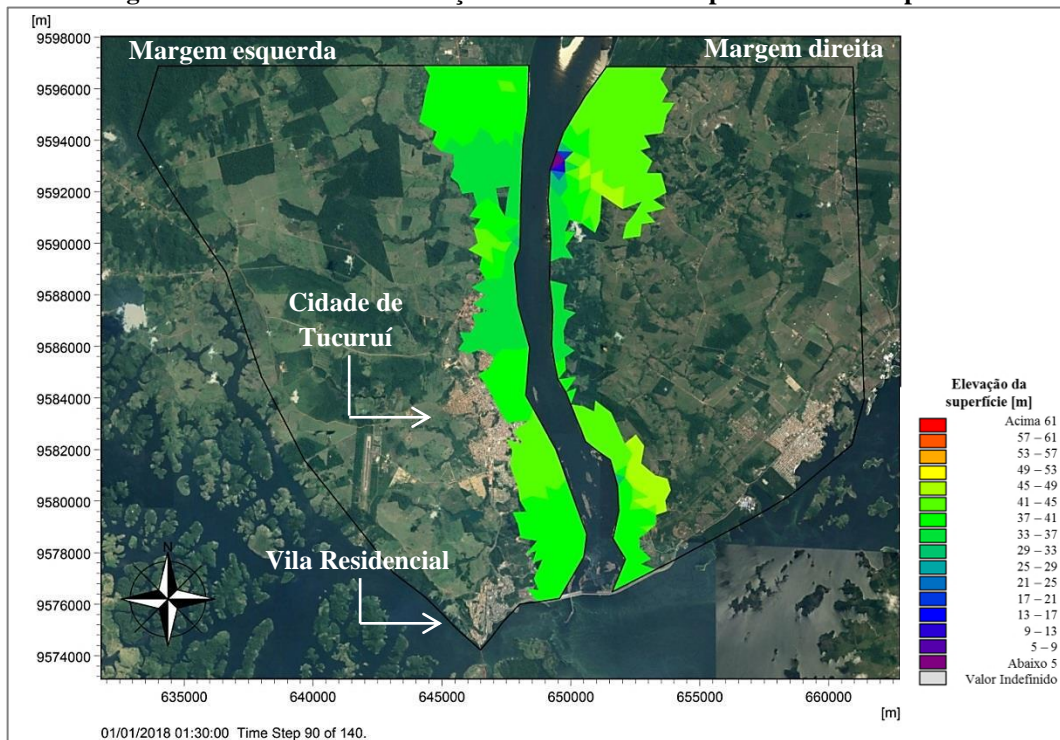
Após o decorrer de quinze minutos do início da ruptura (00h45m00s), a área inundada passa a ser de 20,17 km², sendo o nível d'água máximo na planície de inundação da margem esquerda do rio Tocantins de aproximadamente 26,6 m, o que resulta em uma elevação máxima de 37,14 m. Nota-se ainda, que a extensão da área inundada abrange boa parte da zona urbana de Tucuruí e começa a ganhar dimensões também na margem direita, onde os níveis d'água chegam a atingir 14,5 m e a elevação da superfície é igual a 36,4 m (Figura 19).

Figura 19 – Mancha de inundação quinze minutos após o início da ruptura.



Com o avanço do tempo e após o decorrer de sessenta minutos do início da ruptura (01h30m00s), a mancha de inundação atinge uma área de 66,71 km². Para as duas margens, a água atinge toda a extensão do domínio considerado e a inundação passa a ser mais expressiva na margem direita, onde as cotas topográficas começam a apresentar menores elevações. O nível d'água máximo passa a ser de 46,5 m e a elevação da superfície supera os 30 m em grande parte da área inundada, sendo o valor máximo de 48,6 m, conforme o observado na Figura 20.

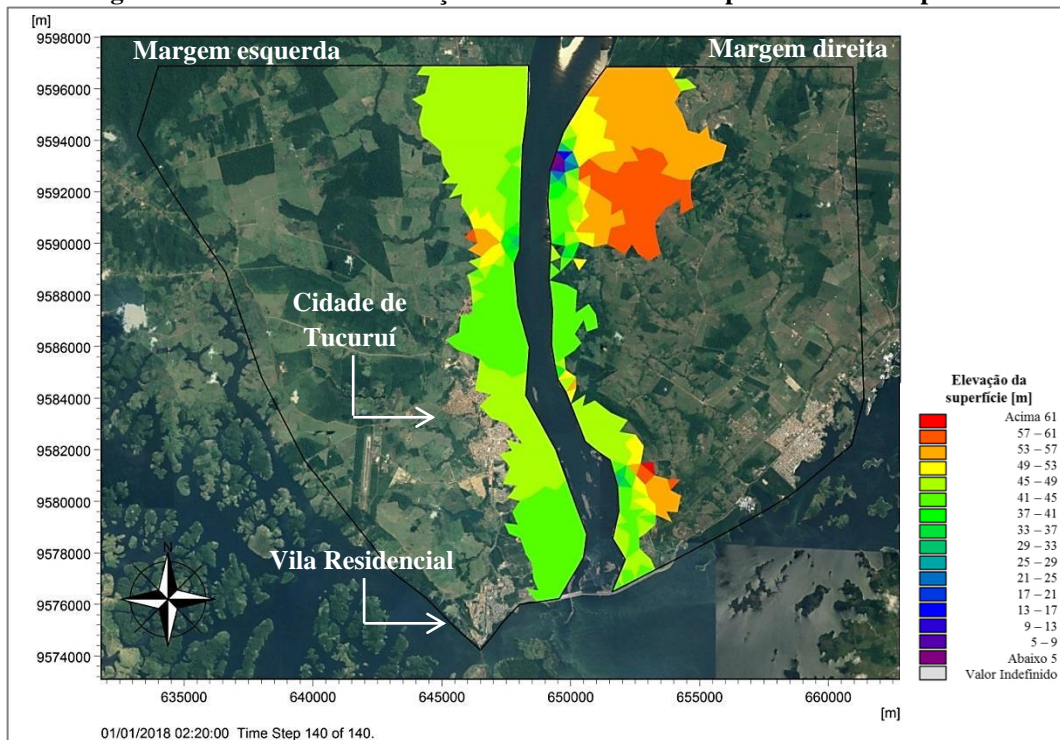
Figura 20 – Mancha de inundação sessenta minutos após o início da ruptura.



Para o último passo de tempo considerado neste estudo (02h20m00s), ou seja, cento e dez minutos após o início da ruptura, a mancha de inundação ganha dimensões e abrange uma área de 84,71 km². Como se pode imaginar, os níveis d'água atingem seus valores máximos neste momento da simulação, na ordem de 60,4 m na margem direita. Observa-se o acúmulo de água nas fronteiras do domínio (próximo à praia de Pederneiras), tal fato é explicado pela condição de fronteira fechada estabelecida, que impede a saída da água para a região externa ao domínio de simulação (Figura 21).

Nota-se ainda, uma estabilização no crescimento da mancha de inundação na margem esquerda do rio Tocantins, especialmente nos primeiros quilômetros à jusante do barramento, conseqüentemente na cidade de Tucuruí. Essa estabilização pode ser explicada pelo fato de que nesse instante da simulação, a vazão na calha do rio Tocantins já está se reduzindo, ou seja, a onda formada no momento da ruptura já começa a se dissipar. Nessa região, o nível d'água máximo é de 36,9 m e a superfície de elevação média é de 46,0 m.

Figura 21 – Mancha de inundação cento e dez minutos após o início da ruptura.



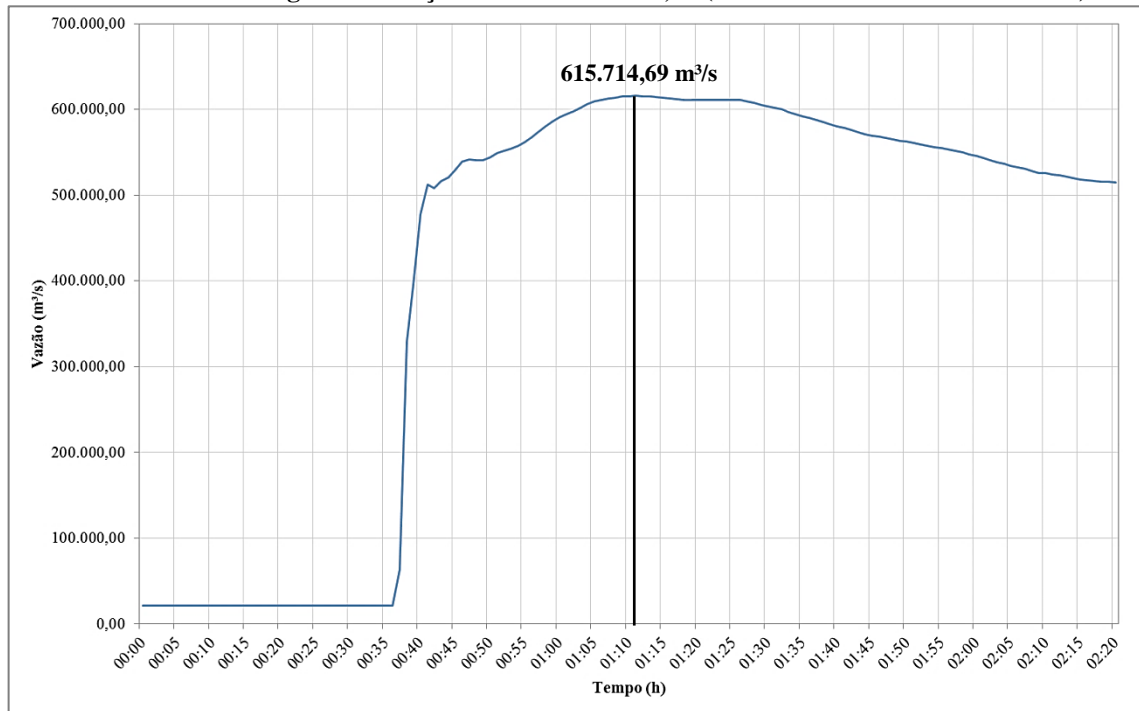
A partir da análise da evolução da mancha de inundação hipotética, nota-se que as áreas atingidas após o rompimento da barragem da UHE Tucuruí ganham grandes proporções e como é imaginável, devido à proximidade da cidade ao corpo do barramento (menor que dez quilômetros), atingem importantes regiões e estruturas civis do município de Tucuruí. O Apêndice B apresenta a delimitação da mancha de inundação para o último passo de tempo da simulação computacional, com destaque para o centro da cidade de Tucuruí e para a Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte.

Nota-se, com a observação detalhada da mancha de inundação, que as principais regiões afetadas são: estruturas que compõem a Eclusa 2; bairros residenciais, centro comercial, importantes equipamentos urbanos (praças, escolas, estádio municipal, órgãos públicos da esfera municipal, estadual e federal, etc.) na zona urbana de Tucuruí; instituições de ensino superior (Universidade Federal do Pará e Instituto Federal do Pará) e o Instituto Médico Legal de Tucuruí (IML), localizados na Vila residencial da Eletrobrás Eletronorte; regiões turísticas (praias nas margens do rio Tocantins) e a rodovia BR 422 (Transcarnatá).

4.2.2.2. Análise do hidrograma de ruptura

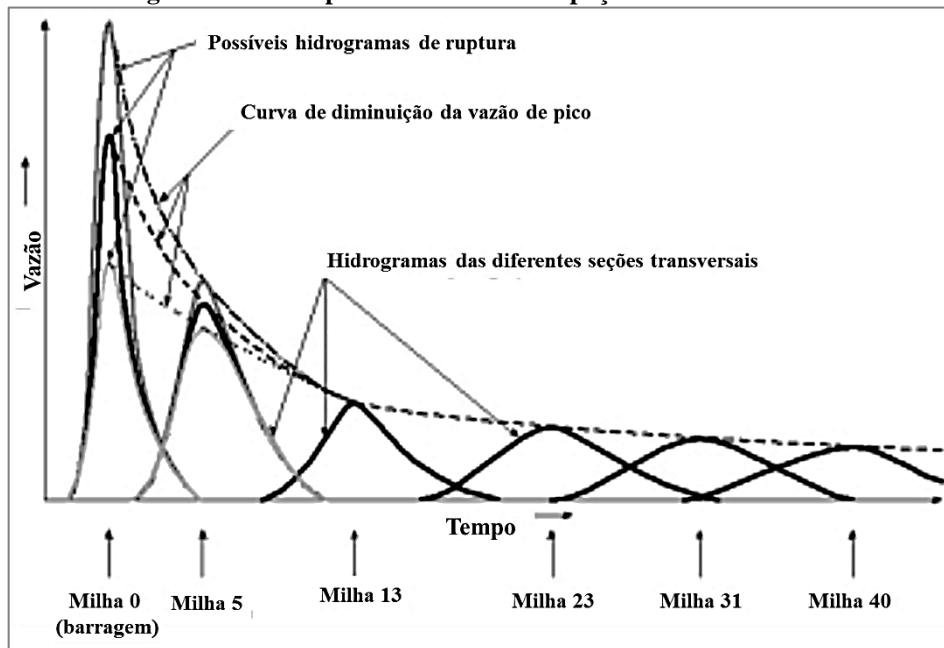
Para entender o comportamento e a evolução da onda de cheia, foram analisados a vazão e os níveis d'água na seção transversal 6.034,35, que engloba o centro da cidade de Tucuruí. O hidrograma do Gráfico 8 revela a vazão constante na seção até o fim da formação da brecha de ruptura (00h36m00s), a partir desse momento os valores de vazão começam a se elevar, até atingir o pico de 615.714,69 m³/s às 01h11m00s. Ao término da simulação, a vazão na estação analisada aponta tendência à diminuição, indicando o início da dissipação da onda de cheia, porém ainda apresentava o elevado valor de 515.055,97 m³/s.

Gráfico 8 – Hidrograma da seção transversal 6.034,35 (centro da cidade de Tucuruí-PA).



Ao se avaliar o hidrograma do Gráfico 8, nota-se que a onda de cheia, com sua vazão máxima, leva aproximadamente quarenta e um minutos após o início da ruptura (01h11m00s) para atingir a seção que abriga o centro da cidade de Tucuruí, tendo seu valor de pico reduzido em 123.429,67 m³/s. Percebe-se ainda, que a partir desse momento, os valores iniciais tendem a reduzir, indicando a dissipação da onda de cheia nesta seção. O estudo da total dissipação da onda de cheia não foi realizado na presente pesquisa, uma vez que houve limitação do tempo de simulação, porém a Figura 22 apresenta um exemplo de situação genérica ideal, em que tal estudo é realizado para diversas seções transversais ao longo de um canal à jusante, até a constatação da estabilização dos picos de vazão.

Figura 22 – Exemplo de análise de dissipação da onda de cheia.

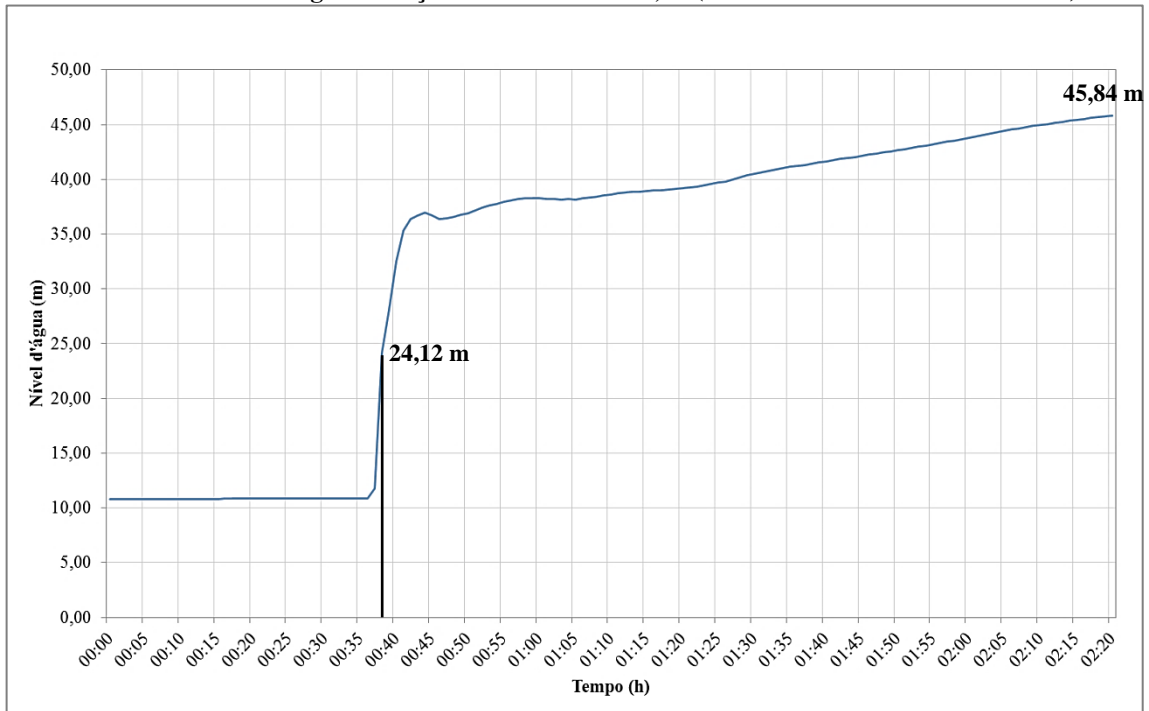


Fonte: Adaptado de Fread e Lewis (1998).

Quando são analisados os níveis d'água para a mesma seção transversal (6.034,35), observa-se que os valores começam a se elevar imediatamente após o término da formação da brecha de ruptura (00h36m00s) e após dois minutos (00h38m00s) ultrapassam a calha do rio Tocantins e avançam pela planície de inundação, com uma elevação de 24,19 m. A partir desse momento, o nível d'água tende a aumentar até o final da simulação, onde atinge o valor de 45,84 m, conforme o observado no Gráfico 9. Devido à limitação de tempo de simulação, os níveis d'água nesta seção transversal podem assumir valores maiores que o de 45,84 m para este mesmo evento de ruptura hipotética.

No que se refere ao planejamento de ações de emergência e à elaboração de diretrizes para resguardar a segurança da população residente na zona atingida pela mancha de inundação hipotética, percebe-se que, para o cenário considerado, o tempo de resposta dos órgãos de defesa civil e, conseqüentemente, o tempo de alerta para a população em perigo são baixos (menores que quinze minutos), o que segundo as equações de Brown e Graham (1988) se caracteriza como a pior situação e, portanto, aumenta o potencial de perda de vidas humanas.

Gráfico 9 – Níveis d'água da seção transversal 6.034,35 (centro da cidade de Tucuruí-PA).

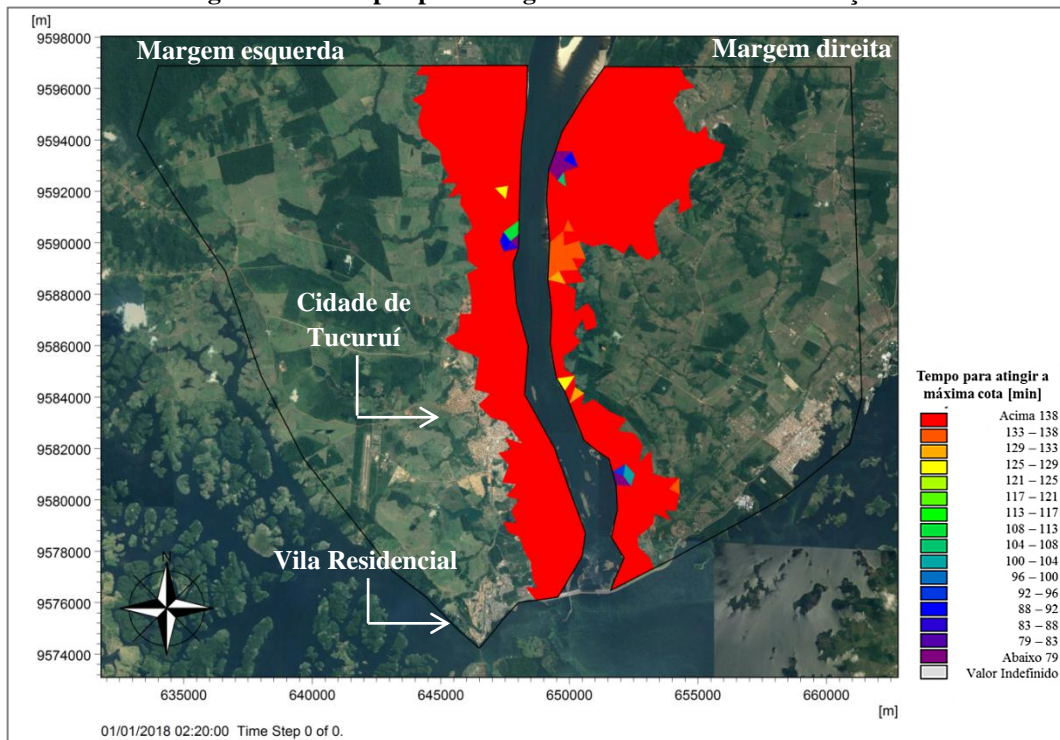


4.2.2.3. *Tempo para atingir a cota máxima de inundação*

A análise dos tempos para que se atinja a cota máxima de inundação é parâmetro essencial para a tomada de decisões em situação de emergência, pois assim se sabe quais medidas devem ser tomadas em cada região, como serão definidas as rotas de fuga, dentre outras. Percebe-se pela Figura 23 que para quase toda a planície de inundação esse tempo é superior a cento e trinta e oito minutos, ou seja, ocorre no final da simulação (02h20m00s).

Assim, nota-se que para quase toda a área afetada à jusante da UHE Tucuruí, o comportamento da inundação segue o observado na seção transversal 6.034,35, em que os níveis d'água máximos são alcançados no último passo de tempo, indicando mais uma vez que até o final da simulação não ocorreu a total dissipação da onda de cheia e que a altura da lâmina d'água pode assumir valores ainda maiores na planície de inundação.

Figura 23 – Tempos para atingir a cota máxima de inundação.

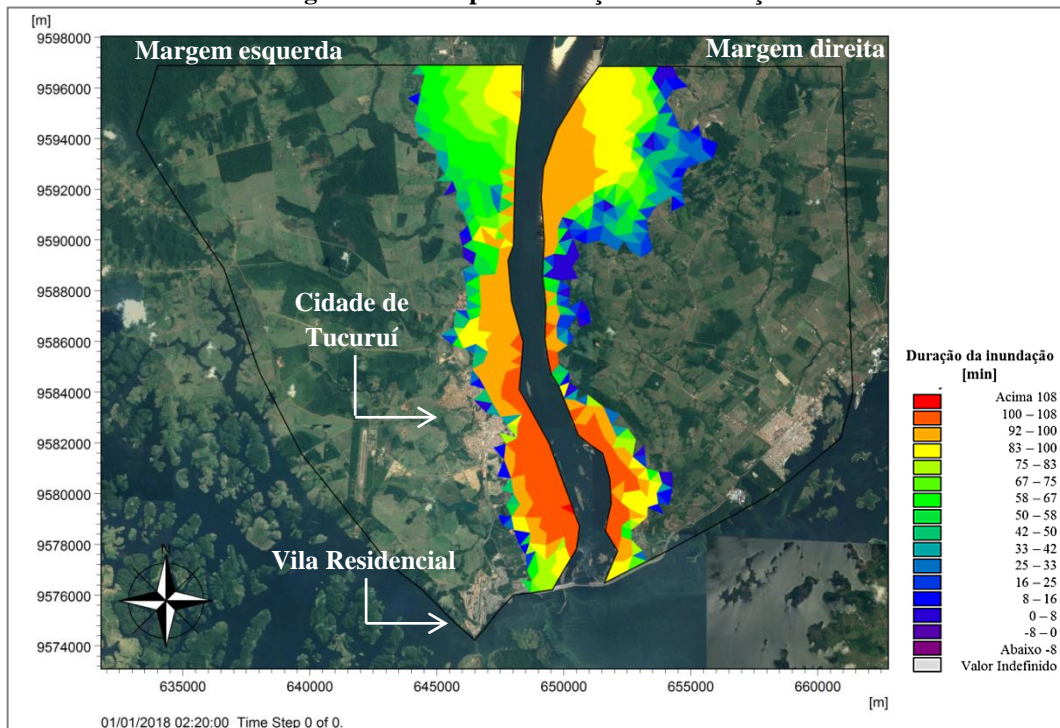


4.2.2.4. Duração da inundação

A avaliação do tempo de permanência da mancha de inundação no domínio de simulação demonstra que as áreas que permanecem por mais tempo inundadas são as mais próximas das margens do Rio Tocantins, tanto direita quanto esquerda, nos primeiros quilômetros à jusante do barramento, com tempos de permanência superiores a cem minutos. Como são as áreas com as menores cotas topográficas e, portanto, rota preferencial para o escoamento e acúmulo de água, tais áreas são as primeiras a serem inundadas e, portanto, as que por mais tempo permanecerão nessa condição.

O tempo de inundação vai diminuindo na medida em que se avança pela planície de inundação no sentido perpendicular ao rio Tocantins, uma vez que se alcançam regiões com maiores elevações topográficas. A partir da Figura 24, nota-se que a área urbana da cidade de Tucuruí é aquela em que a inundação permanece por maior período de tempo. Tal informação é importante para mensurar a quantidade de danos e permitir que se proponham medidas de resgate de vítimas e outras ações necessárias após o evento de ruptura e a total dissipação da onda de cheia, assim como da mancha de inundação.

Figura 24 – Tempo de duração da inundação.



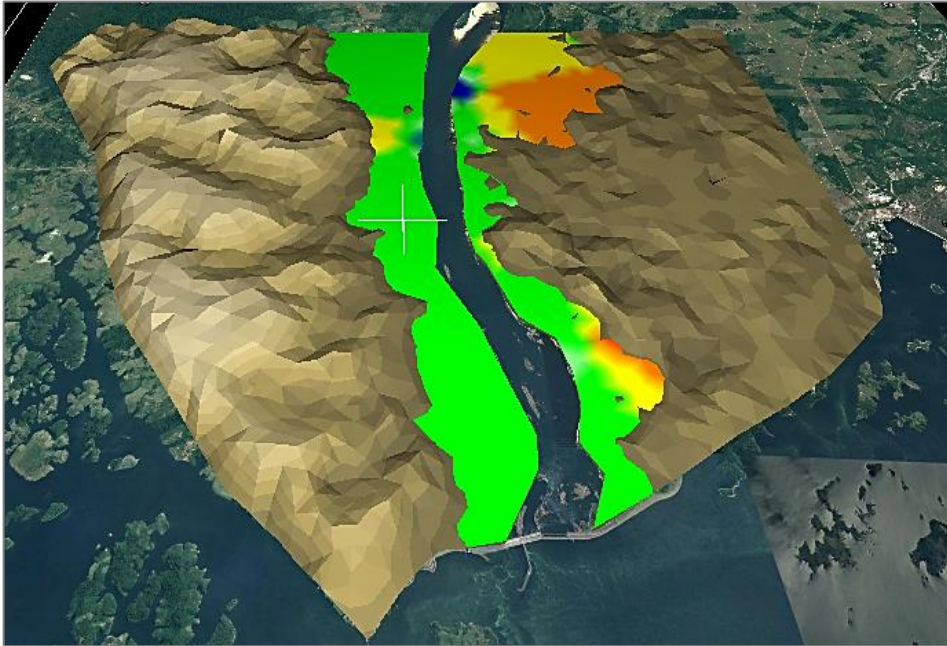
4.2.3. Desempenho do *software* MIKE FLOOD

O *software* comercial MIKE FLOOD apresentou boa aplicabilidade no estudo de rompimento hipotético de barragens aqui apresentado. Mesmo empregando as mesmas soluções numéricas utilizadas por outros *softwares* similares, há a vantagem de menor tempo de computação. Além disso, a interface do MIKE FLOOD facilita a navegação do usuário, permitindo maior fluidez no processo de simulação.

Os dois modelos computacionais gerados (um unidimensional e outro bidimensional) apresentaram o benefício de minimização das limitações e erros que existem quando se trabalha com cada um separadamente e possibilitou uma representação precisa da planície de inundação às margens do rio Tocantins. A necessidade de desenvolvimento de dois modelos computacionais também pode ser considerada um inconveniente para a utilização do *software*.

Além disso, o *software* dispõe de bons recursos pós-processamento de dados, o que facilita a apresentação e análise de resultados. Um bom exemplo disso é a possibilidade de utilização do módulo MIKE Animator Plus, em que a topobatimetria do terreno pode ser visualizada em três dimensões e o usuário pode acompanhar a dissipação da onda de cheia pela planície de inundação de maneira bem mais interativa, conforme o observado na Figura 25.

Figura 25 – Visualização dos resultados no módulo MIKE Animator Plus.



CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

5.1.1. Caracterização da UHE Tucuruí

As informações obtidas através da análise dos projetos da UHE Tucuruí, da coleta de dados referentes à sua operação, além da realização de visita técnica no empreendimento, foram essenciais para embasar os parâmetros adotados na etapa de simulação hidrodinâmica, haja vista que o sucesso dessa simulação depende, em grande parte, da eficiência deste levantamento inicial de informações. As condições de operação do reservatório e estruturas extravasoras, as dimensões, materiais e técnicas construtivas utilizadas na barragem em estudo auxiliaram na discussão sobre sua segurança e também na definição de obrigações legais do empreendedor (Eletrobrás Eletronorte) junto aos órgãos fiscalizadores.

A UHE Tucuruí, devido principalmente à sua proximidade à área urbana da cidade de Tucuruí-PA, assim como da vila residencial da Eletrobrás Eletronorte, é classificada na categoria B, conforme o disposto pela resolução normativa da ANEEL nº 696/2015, tendo baixa categoria de risco e alto DPA. Tal classificação implica na inclusão do PAE, com seu devido estudo de rompimento hipotético do barramento, como parte integrante do Plano de Segurança da Barragem, segundo o determinado pela lei nº 12.334/2010.

5.1.2. Simulação hidrodinâmica computacional (rompimento hipotético)

A análise de rompimento hipotético apresentada nesse trabalho considerou o pior cenário para a hipótese de ruptura da barragem de concreto da UHE Tucuruí, a fim de obter as maiores áreas de inundação do vale à jusante e, portanto, subsidiar a tomada de decisões de órgãos da defesa civil e resguardar a segurança da população possivelmente atingida. As simulações foram realizadas no *software* comercial MIKE FLOOD, que ainda apresenta uma quantidade discreta de pesquisas divulgadas no meio acadêmico para esta finalidade, mas que se mostrou uma ferramenta eficiente e de boa aplicabilidade para o estudo de rompimento hipotético de barragens.

O desenvolvimento de um modelo unidimensional e outro bidimensional separadamente no *software* comercial MIKE FLOOD permite que o usuário tenha maior

controle sobre os dados de entrada para a simulação e facilita a análise acoplada, tornando fácil a detecção e correção de erros e permitindo ganho computacional e de tempo para o projeto. Como principais inconvenientes no uso do *software*, tem-se a necessidade de obtenção de dados com o auxílio de outros programas computacionais, especialmente os de geoprocessamento, além de que o *software* em estudo pode apresentar instabilidades ao trabalhar com dados de entrada aproximados.

Ressalta-se ainda, que a impossibilidade de obtenção de dados topobatimétricos precisos do trecho à jusante do barramento junto à Eletrobrás Eletronorte, não inviabilizou integralmente o processo de modelagem hidrodinâmica, uma vez que o rio Tocantins na área de estudo possui características de largura muito maior que sua profundidade, o que possibilitou a simplificação de sua calha natural por canal prismático retangular. Tal fato, não ocasionou erros grosseiros para os primeiros cento e dez minutos de simulação, porém a partir deste passo de tempo, o *software* apresentou instabilidades que forçaram a finalização da simulação.

Fundamentado na avaliação da mancha de inundação formada em decorrência do rompimento hipotético, percebe-se a inundação de grandes áreas (84,71 km²) no período de uma hora e dez minutos após o início da formação da brecha de ruptura, com um tempo de resposta de apenas oito minutos para os habitantes da zona urbana de Tucuruí, o que aumenta o potencial de perdas de vidas humanas e torna ainda mais importante a articulação de ações voltadas à segurança da população em situação de risco.

A partir da avaliação detalhada das regiões afetadas pela mancha de inundação hipotética, podem-se elencar as principais áreas afetadas à jusante do barramento: eclusa 2 e importantes zonas comerciais e residenciais no centro urbano do município; instituições de ensino superior e o IML de Tucuruí, localizados na Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte, praias turísticas às margens do rio Tocantins, assim como uma das mais importantes vias de acesso à cidade, a BR 422 (Transcametá), o que impede tal via de compor as rotas de fuga para a evacuação da população atingida.

Com base na análise específica da seção transversal que abriga o centro da cidade de Tucuruí, verificou-se que decorrem aproximadamente quarenta e um minutos para que a vazão de pico atinja o local, com redução de 16,70% em relação ao valor apresentado na brecha de ruptura. Os níveis d'água nessa região começam a se elevar dois minutos após o

término da formação da brecha de ruptura, atingindo o valor máximo de 45,84 m ao final da simulação. Esses valores críticos são essenciais para a definição de ações de emergência por parte dos órgãos públicos de defesa civil, a fim de resguardar a vida da população residente na região e minimizar os impactos econômicos e ambientais advindos do rompimento da UHE Tucuruí.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do presente trabalho, sugere-se a elaboração de novas pesquisas, a fim de complementar os estudos sobre o rompimento hipotético da barragem de Tucuruí-PA, auxiliando na elaboração do seu PAE, além de consolidar o uso do *software* MIKE FLOOD na simulação de rompimentos de barragens. Para tal, sugerem-se os seguintes pontos para pesquisas futuras:

- Estender o tempo de simulação e a área de análise à jusante do barramento e verificar a completa dissipação da onda de cheia induzida pelo rompimento da barragem, investigando os impactos em outras cidades à jusante do barramento, como: Baião-PA, Mocajuba-PA e Cametá-PA;
- Proceder a uma análise comparativa dos resultados do presente estudo com resultados obtidos a partir da utilização de outros *softwares* de modelagem hidrodinâmica;
- Avaliar os impactos ambientais e socioeconômicos causados na área inundada a partir do cenário de rompimento adotado;
- Realizar a simulação hidrodinâmica computacional considerando outros cenários de ruptura e a análise de seus respectivos mapas de inundação georreferenciados, a fim de compor o PAE da barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2011**. Brasília: ANA, 2013. 95 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2012-2013**. Brasília: ANA, 2015a. 124 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2014**. Brasília: ANA, 2015b. 156 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2015**. Brasília: ANA, 2016. 1684 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas da energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório de fiscalização: RF – UHE Tucuruí – SFG**. Brasília: ANEEL, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>.
 Acesso em: 08 mar. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução normativa nº 696**, de 15 de dezembro de 2015. Brasília: ANEEL, 2015.

ARAÚJO, L. A.; LOPES, M. L.; PEREIRA, G. M. Trinta anos de operação das 23 comportas do vertedouro da UHE Tucuruí. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., Foz do Iguaçu, 2015. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBDB, 2015.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de Planos de Ações Emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de caso: Barragem de Peti-MG**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

BARRERA, M. A. C.; LARSEN, P. T. Two dimensional modelling of dam breach flooding. In: INTERNACIONAL MIKE BY DHI CONFERENCE. Copenhagen, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso: Barragem de Rio de Pedras – MG**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

BROWN, C. A.; GRAHAM, W. J. **Assessing the threat to life from dam failure**. Water Resources Bulletin, v. 24, n. 6, 1988.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of small dams**. Denver: 1987.

CARDIA, R. J. R.; ROCHA, H. L.; LARA, P. G. Contribuição ao conhecimento sobre o Plano de Emergência – PAE. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., Foz do Iguaçu, 2015. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBDB, 2015.

CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL (ELETRONORTE). **Tomada d'água – Casa de força I: corte transversal 1-1**. 26 jan. 2006. Desenhista: João Artur. Projeto final. 3ª revisão. Folha 1/1.

CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL (ELETRONORTE). **Comercialização de energia: UHE Tucuruí**. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/Comercializacao_Energia/>. Acesso em: 10 mar. 2017.

CHENG, C.; QIAN, X.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; SHENG, J. Estimation of the evacuation clearance time based on dam-break simulation of the Huaxi dam in Southwestern China. **Natural Hazards**, 57: 227-243, 2011.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. Nova York: McGraw-Hill Book Co., 1959. 680 p.

CLEARY, P. W.; PRAKASH, M.; MEAD, S.; LEMIALE, V.; ROBINSON, G. K.; YE, F.; OUYANG, S.; TANG, X. A scenario-based risk framework for determining consequences of diferente failure modes of Earth dams. **Natural Hazards**, 75: 1489-1379, 2015.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise de rompimento hipotético da barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 2, n. 2, p. 191-206, Porto Alegre, 1997.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS (CBDB). **A história das barragens no Brasil, séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). **Resolução nº 143**, de 10 de julho de 2012. Brasília, 2012.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). **Resolução nº 144**, de 10 de julho de 2012. Brasília, 2012.

CONSÓRCIO ENGVIX-THEMAG. **Casa de força – blocos 13 a 23: locação de equipamentos e seção transversal típica**. 24 out. 2003. Projeto executivo final. Folha 1/1.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI). **MIKE FLOOD 1D-2D Modelling: User manual**. Copenhagen: DHI, 2016.

DAUSTORI, Z. Dam-break flooding simulation using one-dimensional and two-dimensional MIKE 11 HD and MIKE 21 HD modelling. **In: INTERNACIONAL MIKE BY DHI CONFERENCE**. Copenhagen, 2010.

DAY, C. A. Modeling potencial of a breach for a high hazard dam, Elizabethtown, Kentucky, USA. **Applied Geography**, v.71, p. 1-8, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Portaria nº 526**, de 09 de setembro de 2013. Brasília, 2013.

EHSAN, S.; MARX, W.; WIEPRECHT, S. Estimation of flood warning times for flood safety management downstream of dams. **Journal of River Engineering**, v. 1, n. 2, 2013.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Brasília, 2003.

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). **Dam Breach Analysis**. Washington: DRAFT, 2014.

FERREIRA, V. B. **As usinas hidrelétricas no Brasil: síntese histórica, impactos ambientais e os aspectos econômicos e sociais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Engenharia de Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2006.

FREAD, D. L.; LEWIS, J. M. **NWS FLDWAV model**: Theoretical description and user documentation. Silver Spring: NWS, 1998.

GOMES, G. O. **Marés Fluviais**: Resultados de uma solução analítica adimensional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

GOODELL, C. R. A Probabilistic Approach to Dam Breach Modeling. **In: CONFERENCE OF FLOODRISK MANAGEMENT, 2.**, Roterdã, 2012. **Anais...** Roterdã, 2012.

GOODELL, C. R.; FROEHLICH, D. C. Comparison of Dam Breach Flood Uncertainty Calculations. **In: UNITED STATES SOCIETY ON DAMS**, New Orleans, 2012.

GRIMALDI, S.; POGGI, S. A synthetic method for assessing the risk of dam flooding. **In: INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS ANNUAL MEETING, 78.**, 2010, Hanoi. **Anais...** Hanoi, Vietnã: ICOLD, 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Dams and the world's water**: an educational book that explains how dams help to manage the world's water. Paris: ICOLD, 2008.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Small dams – Design, surveillance and rehabilitation**. Bulletin 157, 2011. 149 p.

HERRMANN, L. **China's Three Gorges Dam has 'urgent' environmental problems**. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.digitaljournal.com/article/306961>>. Acesso em: 09 mar. 2017.

JESUS, R. D. **Optimização da forma estrutural de uma barragem.** Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, 2011.

LARA, P. G. **Metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura de barragens.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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

LODHI, M. S.; AGRAWAL, D. K. Dam-break flood simulation under various likely scenarios and mapping using GIS: Case of a proposed dam on River Yamuna, India. **Journal Mountain Science**, 9: 214-220, 2012.

LOPES, J. D.; DE LARA, P. G.; BONUMÁ, N. B. Influência de dados topobatimétricos detalhados na modelagem hidrodinâmica de canais. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 31., 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CBDB, 2017.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failures. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 110, n. 5, 567-586 p, 1984.

MARCELINO, A. T. M. C. **Métodos de segurança no enchimento de barragens: aproveitamento hidrelétrico do Baixo Sabor.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2015.

MARQUES, J. A. R. **Hidroelectricidade e barragens reversíveis: panorama atual.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia do Ambiente) – Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Universidade do Porto. Porto, 2015.

MARTA-ALMEIDA, M.; MENDES, R.; AMORIM, F. N.; CIRANO, F.; DIAS, J. M. Fundão dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, 112 (1-2): 359-364, 2016.

MARZOCCHI, R.; FEDERICI, B.; CANNATA, M.; COSSO, T.; SYRIOU, A. Comparison of one-dimensional and two-dimensional GRASS-GIS models for flood mapping. **Applied Geomatics**, 6: 245-254, 2014.

MENESCAL, R. A. **Gestão da segurança de barragens no Brasil: proposta de um Sistema descentralizado, transparente e participativo.** Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009. 796 p.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de segurança e inspeção de barragens.** Brasília: MIN, 2002. 148 p.

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 em

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

NAIK, S. **Numerical simulation of a dam break flow using finite difference approach.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Nacional de Tecnologia de Rourkela. Rourkela, 2015.

NATIONAL PERFORMANCE OF DAMS PROGRAM (NPDP). **Dam Incident Database.** Disponível em: <http://npdp.stanford.edu/dam_incidents>. Acesso em: 16 mar. 2017.

NOGUEIRA, A. A. **Processo de lixiviação do concreto de barragens:** estudo de caso – Eclusa 1 do Sistema de Transposição de Desnível da UHE Tucuruí. Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos e Saneamento Urbano) – Universidade Federal do Pará. Tucuruí, 2016

PENG, M.; ZHANG, L. M. Analysis of human risks due to dam-break floods – part 1: a new model based on Bayesian networks. **Natural Hazards**, 64: 903-933, 2012.

PILOTTI, M.; MARANZONI, A. MILANESI, L.; TOMIROTTI, M.; VALERIO, G. Dam-break modeling in Alpine valleys. **Journal of Mountain Science**, 11 (6): 1429-1441, 2014.

OLIVEIRA, T. V.; NOGUEIRA, A. A. Analysis of development of carbonation and surface wear of the concrete: a case study in Ship Lock 1 of the transposition system of Tucuruí dam. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 1:17, 2016.

RAJA, M. A.; MAHESHWARI, B. K. Behaviour of earth dam under seismic load considering nonlinearity of the soil. **Open Journal of Civil Engineering**, 6: 75-83, 2016.

RAMOS, R. J. B. **Barragens em betão compactado com cilindros (BBC) – Evolução e utilização em Portugal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2011.

RESENDE, A. P.; ROCHA, F. F.; PALMIER, L. P. Utilização do método de Rosenblueth para análise de incerteza de parâmetros de formação de brecha em barragens – estudo de caso: Barragem da Pampulha. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais...** Brasília: ABCP, 2015.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da Barragem São Francisco – Miraí, Minas Gerais, Brasil.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

SAMPAIO, J. A. L. The deficiencies of the emergency action planning for dams in Brazil. **Revista Brasileira de Direito**. Vol. 12 (2): 7-17, 2016.

SILVA, E. T. G. **Barragens hidrelétricas e desastres:** uma avaliação de metodologias de gestão de risco ambiental. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental) – Universidade Católica de Brasília. Brasília, 2012.

SILVA FILHO, D. **Dimensionamento de usinas hidroelétricas através de técnicas de otimização evolutiva.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SOUSA, R. J. C. **Controlo da qualidade na execução de fundações numa barragem: aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.

TSAKIRIS, G.; SPILIOTIS, M. Dam-Breach Hydrograph Modelling: An Innovative Semi-Analytical Approach. **Water Resourch Management**, 27: 1751-1762, 2013.

UEMURA, S. **Instrumentos de avaliação e gestão de impactos gerados por rupturas de barragens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Engineering Center. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Training Documents. Davis, 2014.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Engineering Center. **HEC-RAS River Analysis System User's Manual**. Davis, 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) – Global Digital Elevation Model (GDEM)**. Reston: USGS, 2011.

UNITED STATES SOCIETY ON DAMS (USSD). **Types of dams**. Disponível em: <<http://www.ussdams.org/dam-levee-education/overview/types-of-dams/>>. Acesso em: 07 mar. 2017.

VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, C. B. Propagação da onda de ruptura de barragens através de um modelo Quase-2D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 18, n. 1, p. 165-176, 2013.

WAHL, T. L. **Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment**. U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 1998.

XIONG, Yi. A dam break analysis using HEC-RAS. **Journal of water resource and protection**. Vol. 3, p. 370-379, 2011.

ZHANG, W.; ZHOU, J.; LIU, Y.; CHEN, X.; WANG, C. Emergency evacuation planning against dike-break flood: a GIS-based DSS for flood detention basin of Jingjiang in central China. **Natural Hazards**, 81: 1283-1301, 2016.

ZHONG, D.; SUN, Y.; LI, M. Dam break threshold value and risk probability assessment for an earth dam. **Natural Hazards**, 59: 129-147, 2011.

**ANEXO A – CRITÉRIOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS – RESOLUÇÃO
ANEEL Nº 696/2015**

MATRIZ PARA CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA

NOME DA BARRAGEM	
NOME DO EMPREENDEDOR	
DATA:	

II.1 - CATEGORIA DE RISCO		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		

FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 62 ou $EC^* \geq 8$ (*)
	MÉDIO	35 a 62
	BAIXO	≤ 35

(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO		Pontos
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		

FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 16
	MÉDIO	$10 < DPA < 16$
	BAIXO	≤ 10

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:

CATEGORIA DE RISCO	Alto / Médio / Baixo
DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto / Médio / Baixo

1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de projeto (f)	Casa de força (g)
Altura \leq 15 m (0)	Comprimento \leq 200 m (2)	Concreto Convencional (1)	Rocha sã (1)	Entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)	Barragem/Dique sem Casa de Força associada (0)
15 m < Altura < 30 m (1)	Comprimento > 200 m (3)	Alvenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	Entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)	Casa de força associada à barragem por meio de conduto forçado, túnel, etc. (2)
30m \leq Altura \leq 60 m (2)	-	Terra homogênea / enrocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	Entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)	Casa de força ao pé da barragem (5)
Altura > 60 m (3)	-		Rocha alterada mole / saprolito / solo compactado (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou desconhecida / Estudo não confiável (10)	
			Solo residual / aluvião (5)			

CT = \sum (a até g):

2 –ESTADO DE CONSERVAÇÃO – EC					
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (h)	Confiabilidade das Estruturas de Adução (i)	Percolação (j)	Deformações e Recalques (k)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (l)	Eclusa (*) (m)
Estruturas civis e hidroeletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)
Estruturas civis e hidroeletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente. (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. (1)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas bem mantidas e funcionando (1)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)		Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)

EC = \sum (h até m):

3 – PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM – PS				
Existência de documentação de projeto (n)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)		Não emite os relatórios (5)
Anteprojeto ou Projeto conceitual (6)		Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)		
Inexiste documentação de projeto (8)				

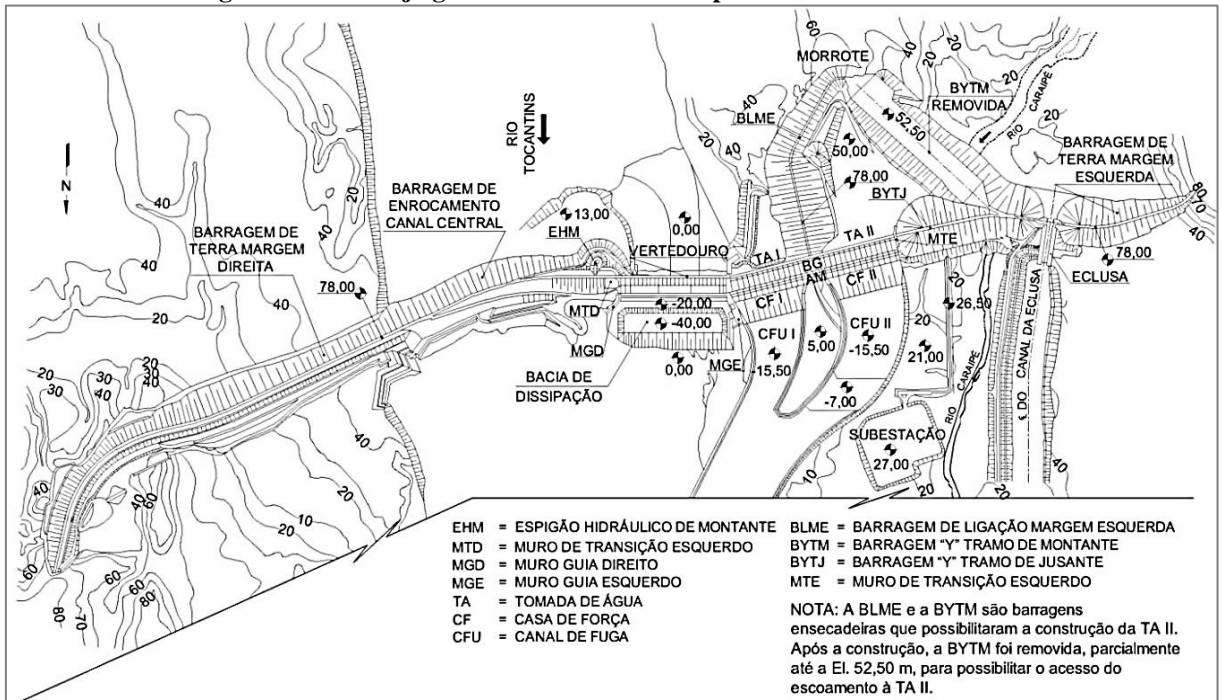
PS = \sum (o até s):	
--	--

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO – DPA			
Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Pequeno ≤ 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada à jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
Médio 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada à jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
Grande 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada à jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)		ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
Muito Grande > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada à jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)		

DPA = ∑ (a até df):	
----------------------------	--

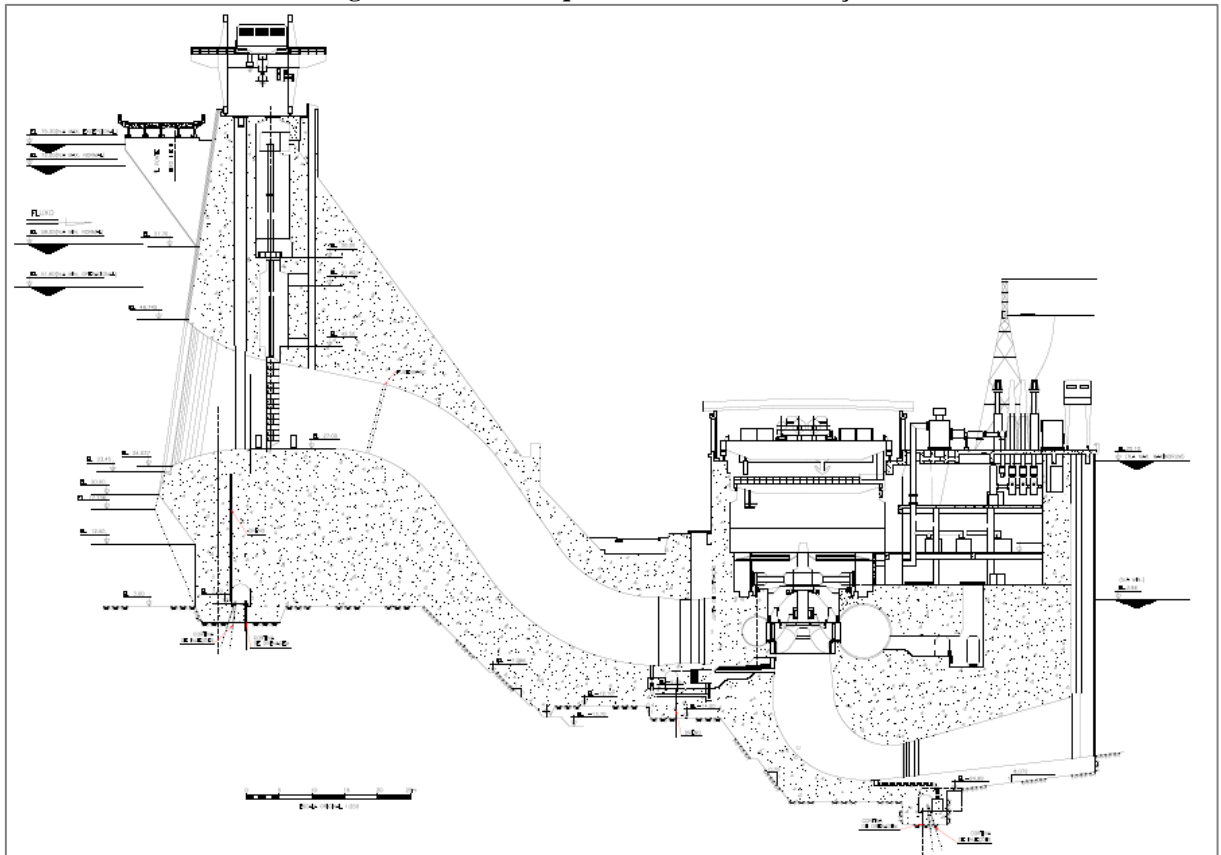
**ANEXO B – ARRANJO GERAL DAS ESTRUTURAS E CORTE ESQUEMÁTICO DAS
CASAS DE FORÇA 1 E 2 DA UHE TUCURUÍ**

Figura 26 – Arranjo geral das estruturas componentes da UHE Tucuruí.



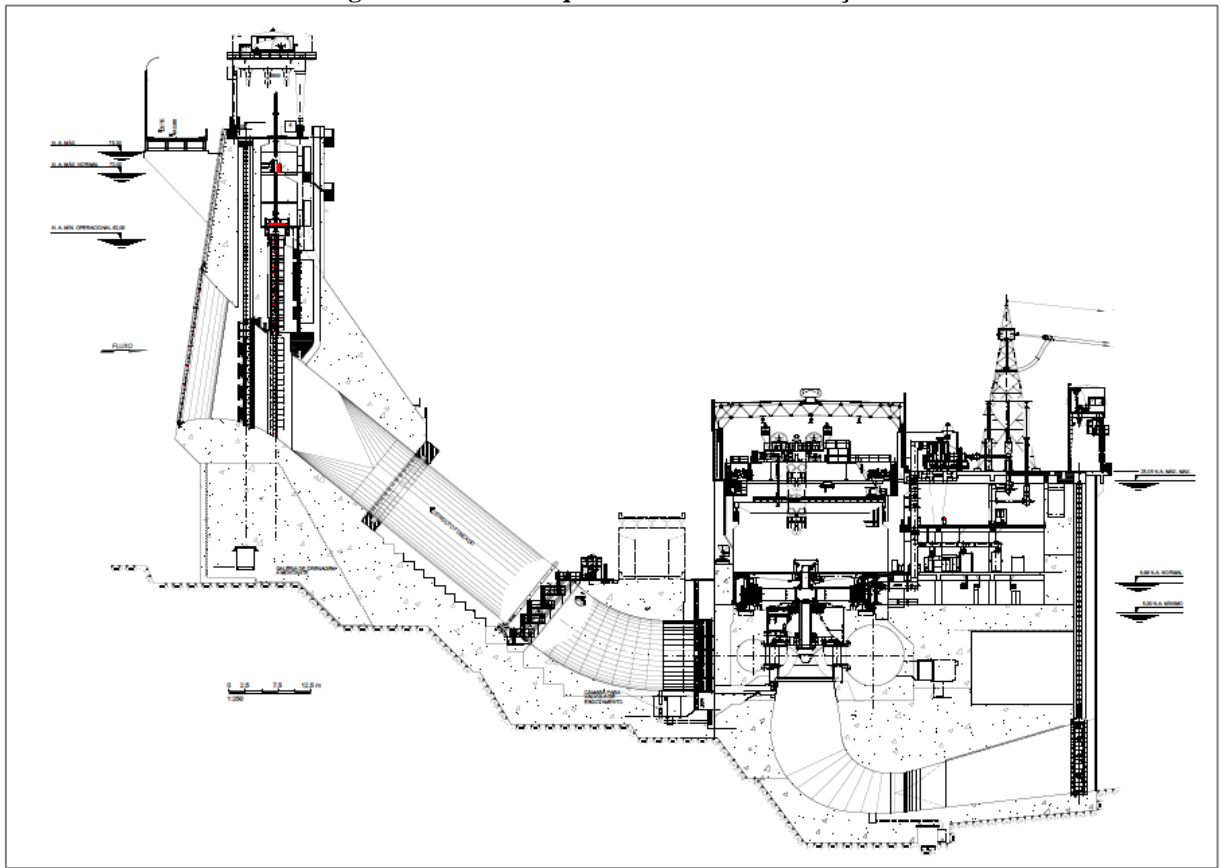
Fonte: Araújo, Lopes e Pereira (2015).

Figura 27 – Corte esquemático da casa de força 1.



Fonte: Eletrobrás Eletronorte (2006).

Figura 28 – Corte esquemático da casa de força 2.



Fonte: Consórcio Engvix-Themag (2003).

**APÊNDICE A – TABELA DE PONTUAÇÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM
DA UHE TUCURUÍ CONFORME RESOLUÇÃO ANEEL Nº 696/2015**

Quadro 6 – Pontuação para classificação da UHE Tucuruí.

Parâmetros		Pontuação	
Características técnicas	Altura do barramento [m]	92	3
	Comprimento do barramento [m]	7.052	3
	Tipo de barragem quanto ao material de construção	Terra homogênea/enrocamento/terra enrocamento	3
	Tipo de fundação	Solo residual/Aluvião	5
	Idade da barragem [anos]	Entre 30 e 50	1
	Vazão de projeto	Decamilenar	3
	Casa de força	Casa de força associada à barragem por meio de conduto forçado	2
	Total de pontos		20
Estado de Conservação	Confiabilidade das estruturas extravasoras	Estruturas civis e hidroeletrônicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos	0
	Confiabilidade das estruturas de adução	Estruturas civis e dispositivos hidroeletrônicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento	0
	Percolação	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem	0
	Deformações e recalques	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo	1
	Deterioração dos taludes/paramentos	Inexistente	0
	Eclusa	Estruturas civis e hidroeletrônicas bem mantidas e funcionando	1
	Total de pontos		2
Plano de segurança da barragem	Existência de documentação de projeto	Projeto executivo ou “como construído”	2
	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança de Barragem	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem	0
	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e monitoramento	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento	0
	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre	0
	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação	Emite os relatórios com periodicidade	3
	Total de pontos		5
DPA	Volume total do reservatório	50275 milhões de m ³	5
	Potencial de perdas de vidas humanas	Existente	12
	Impacto ambiental	Muito significativo	5
	Impacto sócio-econômico	Alto	8
	Total de pontos		30

**APÊNDICE B – DETALHAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO NA ÁREA
CENTRAL DA CIDADE DE TUCURUÍ E NA VILA RESIDENCIAL DA ELETROBRÁS
ELETRONORTE**

Figura 29 – Detalhe de áreas inundadas no centro da cidade de Tucuruí.

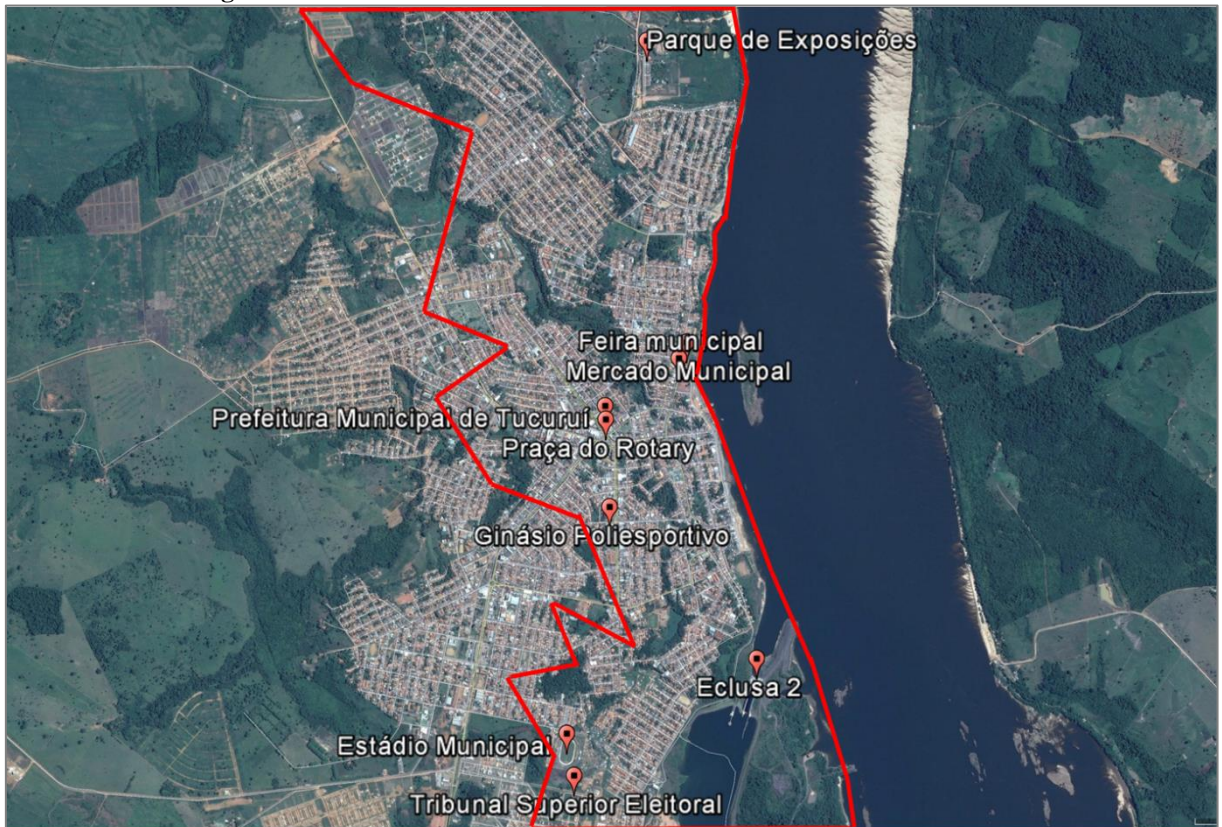


Figura 30 – Detalhe de áreas inundadas na Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte.

