



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Juliana Pimenta Chagas

ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE CHEIA PELA RUPTURA DE UMA
BARRAGEM.

Rio de Janeiro

2018



UFRJ

Juliana Pimenta Chagas

ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE CHEIA PELA RUPTURA DE UMA
BARRAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc

Rio de Janeiro

2018

Chagas, Juliana Pimenta

Estudo de propagação de onda de cheia pela ruptura de uma barragem. / Juliana Pimenta Chagas. - 2018
128 f. : il. 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2018.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

1. Segurança de Barragem. 2. Ruptura de Barragem 3. Usina Hidrelétrica 4. Avaliação de Risco I. Miguez, Marcelo Gomes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Estudo de propagação de onda de cheia pela ruptura de uma barragem.



UFRJ

ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA DE CHEIA PELA RUPTURA DE UMA
BARRAGEM.

Juliana Pimenta Chagas

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof.^a Marcelo Gomes Miguez, D.Sc, COPPE/UFRJ

Prof.^a, Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora, D.Sc. - UFF

Prof.º, Assed Naked Haddad, D.Sc – UFRJ

Matheus Martins de Sousa, D.Sc – UFRJ.

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amor, Bruno,
que esteve ao meu lado em todas as
horas, principalmente nas mais difíceis,
sempre dedicado, paciente, me dando
todo seu amor. Obrigada por me manter
forte e confiante em Deus.

AGRADECIMENTOS

Toda essa caminhada foi árdua, quem esteve bem de perto pode ver e acompanhar os obstáculos que surgiram no caminho, não digo só com a dissertação em si, mas me refiro a obstáculos que vieram de dentro, emocionais, físicos e outros que vieram de fora, só controlados por Deus.

Ninguém disse que seria fácil, mas sempre acreditei que seria possível. Por isso nunca desisti da luta, determinada no propósito iniciado, procurando me manter forte, cercada de amor e acima de tudo com muita *Fé*. *Fé* de que tudo sempre tende a melhorar (mesmo que a gente não entenda ainda como será), aos poucos os pensamentos vão clareando, a gente vai amadurecendo e o mais importante de tudo, vai absorvendo todo o aprendizado possível e somando tudo isso na nossa evolução.

É por isso que só tenho a agradecer, por essa feliz oportunidade e o gigante aprendizado que obtive nesses incríveis 3 anos e alguns meses. Assim, agradeço:

À Deus e Jesus seu filho, por tamanha bondade e sabedoria, por olhar por nós, nos proteger, dar saúde, nos mantendo de pé e confiantes para corremos atrás dos nossos objetivos e possibilitar sermos vitoriosos.

À família, meu mais puro e sincero amor, meu pai Magno e minha mãe Fernanda, obrigada por sempre estarem ao meu lado, vocês são meus heróis, meu maior exemplo de vida. As minhas irmãs Michele e Manuela e meu afilhado João Victor, que sempre me incentivaram muito e me apoiaram.

Ao meu grande amor, namorado, hoje noivo e em muito breve (dias) meu marido, Bruno Peixoto. Nossa! Juro que não sei o que seria de mim se não tivesse você ao meu lado, você foi essencial, acreditou em mim várias vezes em que até eu mesma já não acreditava. Fica difícil escrever o quanto você é importante e o quanto me inspirou a persistir e superar meus medos. Só tenho a agradecer pelo grande homem e amigo que você é para mim e que será para nossa família. Obrigada paixão!

As amigas do peito Gabrielly Ribeiro, Natália Malheiros e Fernanda Faria que muito sentiram na pele a dificuldade do mestrado, além de serem ótimas amigas que compreenderam os momentos em que optei por abrir mão de estar com elas em prol da construção deste trabalho.

Aos queridos amigos do LHC, Antonio Kishurami, Laurent Feaut, Francis, Matheus, Liliana, Anna Beatriz, que muito eu “pertubei” (rs), obrigada por toda ajuda, pela paciência, pelas ótimas soluções e ideias. Suas contribuições e companheirismo foram fundamentais para meu aprendizado e desenvolvimento do trabalho. Obrigada por me auxiliarem e compartilharem comigo seus conhecimentos e experiências, pelo carinho, atenção e almoços nesses anos.

A meu orientador Marcelo Miguez, agradeço a paciência em toda essa trajetória e a atenção dada desde o início e principalmente nesse finalzinho. O senhor é um grande exemplo de mestre, sendo fundamental em todo esse processo de aprendizado, sempre com ótimas propostas. Obrigada pelas orientações, principalmente no “desatar de nós” que muitas das vezes me vi perdida, obrigada por toda contribuição na construção deste trabalho.

À Enel Green Power pelas informações cedidas, fundamentais para este trabalho, e as pessoas incríveis Raphael Rocha, Ivani Vieira, Hugo Viana e em especial ao amigo Rafael Roselli que sempre que possível dedicou seu tempo em compartilhar seus conhecimentos, além de clarear meus pensamentos, auxiliando nos caminhos da dissertação. Todos são grandes amigos que contribuíram e me ajudaram em muitas etapas. E as amigas Laura Souza e Natyele Marins, que estiveram ao meu lado todos os dias, compartilhando de bons momentos que tornaram o dia a dia mais leve.

RESUMO

CHAGAS, Juliana Pimenta. **Estudo de propagação de onda de cheia pela ruptura de uma barragem**. Rio de Janeiro, 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

A operação e a manutenção das barragens, de forma segura, tomaram grande relevância ao redor do mundo, principalmente pelo impacto que a ruptura de barragens pode causar na sociedade, especialmente quanto ao fator perda de vidas humanas. Assim, muitos países vêm se aprimorando quanto às regulações e técnicas que permitem o melhor controle dessas estruturas, minimizando a ocorrência de eventos com efeitos catastróficos. No Brasil, em função da ocorrência de diversos acidentes ao longo dos anos, particularmente após a ruptura da barragem de Fundão (SAMARCO, Mariana – MG), a fiscalização tornou-se mais assídua e em 2015 a Agência Nacional de Energia Elétrica publicou a Resolução Normativa nº 696 estabelecendo prazos e definindo procedimentos a serem executados pelos empreendedores, consubstanciando a Lei de Segurança de Barragens nº 12.334/2010. Uma das exigências desta resolução é a elaboração de mapas de inundação, desenvolvidos a partir do estudo de ruptura de barragens, que são gerados por meio de modelos hidrodinâmicos, que estão sendo cada vez mais desenvolvidos e aprimorados no mercado e no meio acadêmico. A modelagem de ondas de ruptura de barragens é um desafio, visto que é uma situação extrema, de choque, com grande variabilidade temporal e espacial do fenômeno, além disso por serem desenvolvidos estudos pgressos aos acidentes, não há dados específicos para calibração do modelo. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo aplicar o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) em um estudo de caso na UHE Paranapanema - SP, realizando o estudo de propagação e inundação da onda de cheia em cidades vizinhas a usina, em função do rompimento da sua barragem no cenário de vazão decamilenar, almeja-se também analisar os riscos envolvidos nesse processo. Logo, com o uso do MODCEL foi possível visualizar o efeito da onda de ruptura, delimitar as manchas de inundação, identificando as áreas mais suscetíveis a inundação e analisar o impacto da ruptura sobre a usinas a jusante.

Palavra-chave: segurança de barragens, ruptura de barragens, modelagem, MODCEL.

ABSTRACT

CHAGAS, Juliana Pimenta. **Study of flood wave propagation by the dam break.** Rio de Janeiro, 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Ambiental – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Safe operation and maintenance of dams have become very important around the world, mainly due to the impact that a dam break can cause in the society, mainly as to the loss of human life. Thus, many countries have been improving the regulations and techniques that allow better control of these structures, mitigating the occurrence of possible catastrophic events. In Brazil, due to the occurrence of several accidents over the years, mainly after the dam break of the Fundão dam (SAMARCO, Mariana - MG), supervision became more assiduous and in 2015 the National Electricity Agency published Resolution Normative nº 696 establishing deadlines and defining procedures to be executed by the entrepreneurs, consubstantiating the Law of Security of Dams nº 12.334 / 2010. One of the requirements of the normative is the elaboration of flood maps, developed from the study of dam break, that are generated by means of hydrodynamic models that have been developed and improved commercially and the academically. The modeling of dam break, is a challenge, since it is an extreme situation of shock, with great temporal and spatial variability of the phenomenon, in addition to the development of previous studies to the accidents, there are no specific data for calibration of the model. Thus, the present work aims to apply the Flow Cell Model (MODCEL) in a case study at the Paranapanema Hydroelectric Power Plant, in the city of São Paulo, performing the study of flood propagation and flooding in neighboring cities of the plant, as a function of the dambreak in the thousand years of return period scenario, it is also sought to analyze the risks involved in this process. Therefore, with the use of MODCEL, it was possible to visualize the effect of the rupture wave, to delimit the flood spots, to identify the areas most susceptible to flooding and to analyze the impact of the rupture on the downstream plants.

Kew words: dam safety, dam break, emergency action plan, modeling, MODCEL.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica - 2016 (%) (Fonte: MME, 2016).	2
Figura 2 - Oferta de Potência de Geração Elétrica - 2016 (%) (Fonte: MME, 2016). ...	3
Figura 3 – Barragem de Malpasset antes (a) e após a rutura (b) em 1959 (Fonte: PEREIRA, 2015).	15
Figura 4 - Barragem de Vajont, Itália. (fonte: http://www.highestbridges.com , 2017)	16
Figura 5: Diferentes momentos do acidente. (a) Início da percolação. (b) e (c) Percolação em fase avançada. (d) Fase final de percolação provocando o <i>piping</i> . (Fonte: Bureau of Reclamation, 2018).	17
Figura 6 – Dia do evento. (a) Uso do vertedouro principal. (b) Erosão no vertedouro principal. (Fonte: California Department of Water Resources, 2017).	18
Figura 7 - As figuras (a) e (b) indica a região onde situa-se a barragem de fundão e a cidade de Bento Rodrigues, respectivamente, antes rompimento e as figuras (c) e (d) representam os mesmos locais após o rompimento) (Fonte: ANA, 2016)	22
Figura 8 - Disposição das usinas no trecho do rio em estudo.	58
Figura 9 - Configuração da UHE Paranapanema, constituída de três casa de força, escada de peixe, canal de adução na margem esquerda, vertedouro e comportas. (Fonte: Santa Cruz Geração, 2017)	59
Figura 10 – Modelo Digital de Terreno e levantamento topobatimétricos partir de dados cedidos pelas Enel Green Power.	69
Figura 11 – Divisão de células da bacia de interesse	72
Figura 12 – Detalhe da Divisão de células da área de interesse (jusante e montante do barramento UHE Paranapanema).....	73
Figura 13 – Área de estudo segmentada em trechos para melhor análise dos resultados.....	74
Figura 14 - Células potencialmente vulneráveis e seus respectivos trecho.	79
Figura 15 - Cotograma célula 6000 – Janeiro de 2016	83
Figura 16 - Hidrograma célula 6000 - Janeiro de 2016	83
Figura 17 - Cotograma célula 600 – Janeiro de 2016	84
Figura 18 - Hidrograma célula 600 - Janeiro de 2016	84
Figura 19 – Resultados dos níveis atingidos conforme o aumento do coeficiente de Manning.....	86

Figura 20 - Detalhe (em zoom) Resultados dos níveis atingidos conforme o aumento do coeficiente de Manning.....	86
Figura 21 - Hidrograma de Ruptura - Célula 6000	88
Figura 22 - Vazões entre células ao longo do rio a partir do trecho 3.	89
Figura 23 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 3 (entre as células 100 até 1100)	89
Figura 24 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 4 (entre as células 1200 até 2000)	90
Figura 25 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 5 (entre as células 2100 até 2500)	90
Figura 26 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 6 (entre as células 2600 até 3100)	91
Figura 27 - Profundidade ao longo do rio	92
Figura 28 - Perfil do Rio e Níveis máximos atingidos pelas células,	93
Figura 29 - Células inundadas Trecho 3	94
Figura 30 - Células inundadas Trecho 4	94
Figura 31 - Mapa de Inundação - Reservatório Trecho 1	96
Figura 32 - Mapa de Inundação - Reservatório Trecho 2	97
Figura 33 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 3.....	98
Figura 34 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 4.....	98
Figura 35 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 5.....	99
Figura 36 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 6.....	100
Figura 37 - Mapa de Perigo e Vulnerabilidade - Trecho 3.....	101
Figura 38 - Mapa de perigo e Vulnerabilidade - Trecho 4	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de Classificação de Barragem (Fonte: ANEEL, 2015).....	31
Tabela 2 – Modelos de simulação de Ruptura	45
Tabela 3 - Métodos de Simulação de Brecha de Ruptura	50
Tabela 4 - Equações para cálculo de vazões de pico.	52
Tabela 5 - Hidrograma de Ruptura.....	53
Tabela 6 - Usinas Hidrelétricas do rio Paranapanema.	62
Tabela 7 - Tipos de Células e Ligações (adaptação Manual MODCEL, 2018)	70
Tabela 8 - Tabela de referência Trechos <i>versus</i> Células da área de estudo.	74
Tabela 9 - Relação Fator de Velocidade e Efeitos (Fonte: REITER, 2000 <i>apud</i> ZONENSEIN, 2007).	78
Tabela 10 - Células Potencialmente Vulneráveis	79
Tabela 11 - Coeficiente de Manning e Níveis Alcançados	85
Tabela 12 - Célula que apresentam inundação comparadas a Tabela 10.	93
Tabela 13 - Resultado Fator de Velocidade células inundadas	95

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABRAGE	Associação Brasileira de Empresas Geradoras de Energia Elétrica
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BBC	British Broadcasting Corporation
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CBGB	Comitê Brasileiro de Grandes Barragens
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
CIGB	Comissão Internacional de Grandes Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DNPM	Departamento Nacional De Produção Mineral
EUA	Estados Unidos da América
GW	Gigawatts
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
ICOLD	International Commission on Large Dams
IFTR	Independent Forensic Team Report
MG	Minas Gerais
MME	Ministério de Minas e Energia
MODCEL	Modelo de Células de Escoamento
MW	Megawatts
N.A.	Nível de Água
n.s.n.m	Nível Sobre o Nível do Mar
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
PAE	Plano de Ação Emergencial
PAEBM	Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SFG	Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFFRJ	Universidade Rural do Rio de Janeiro
UHE	Usina Hidrelétrica
USELPA	Usinas Elétricas do Paranapanema S.A
ZAS	Zona de Auto Salvamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO DO ESTUDO	1
1.2	JUSTIFICATIVAS	4
1.3	OBJETIVOS	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos	6
1.4	ESCOPO	6
2	REFERENCIAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	SEGURANÇA DE BARRAGENS	7
2.1.1	Barragens	8
2.1.2	Tipos mais comuns de ruptura de barragem	12
2.1.3	Acidentes com barragens	13
2.1.4	Legislação	22
2.1.5	PAE	32
2.1.6	Gestão do risco	37
2.2	MODELAÇÃO MATEMÁTICA	41
2.2.1	Leis e princípios básicos	41
2.2.2	Modelos matemáticos	43
2.3	MODELAÇÃO DE RUPTURA DE BARRAGENS	49
2.3.1	Modelação de brecha	49
2.3.2	Hidrograma de ruptura	51
2.3.3	Propagação da onda de cheia proveniente da ruptura	54
2.3.4	Frente de onda de choque	55
2.3.5	Fator de velocidade	57
3	ESTUDO DE CASO	58
3.1	DESCRIÇÃO GERAL DA UHE PARANAPANEMA	58
3.2	DESCRIÇÃO GERAL DA BACIA E DA ÁREA DE ESTUDOS	61
4	METODOLOGIA PROPOSTA	65

4.1 CENÁRIO SIMULADO	67
4.2 MODCEL	68
4.2.1 Divisão de células	68
4.2.2 Topologia do escoamento	75
4.2.3 Arquivo de entrada modelo MODCEL	76
4.2.4 Frente de onda de choque	77
4.2.5 Fator de velocidade	78
4.2.6 Mapas de inundação	80
4.3 CALIBRAÇÃO MODCEL	80
4.3.1 Ajustes células jusante e montante da barragem	81
4.3.2 Curva cota x área x volume do reservatório	81
4.3.3 Hidrograma e cotograma	82
4.3.4 Calibração Momento da Ruptura	85
5 RESULTADOS	87
5.1 RESULTADOS MODCEL	87
5.1.1 Vazões	87
5.1.2 Profundidades	91
5.1.3 Fator de velocidade	93
5.2 GESTÃO DOS RISCOS	95
5.2.1 Mapas de inundação	96
5.2.2 Mapas de perigo e vulnerabilidade	100
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102
6.1 CONCLUSÕES	102
6.2 RECOMENDAÇÕES	104
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO ESTUDO

Brasil é um país com amplo território e que, devido ao seu relevo, possui uma das mais extensas e diversificadas redes fluviais do mundo. Aproximadamente 13% de toda a água doce do planeta está no território brasileiro. O Brasil possui o terceiro maior potencial hidrelétrico do mundo, depois da China e da Rússia (Pereira, 2015). Essa disponibilidade hídrica também fomentou que, próximo aos rios, se desenvolvessem as cidades e, à medida que foi ocorrendo o crescimento urbano, intensificou-se o uso dos recursos hídricos e a possibilidade de conflitos, bem como o incremento de riscos.

Essa conjuntura contribuiu para a implantação de obras hidráulicas destinadas à criação de reservatórios, que podem apresentar diversos tamanhos, de pequeno porte para uso local, como abastecimento rural e recreação, ou de grande porte, que permitem a acumulação de considerável volume de água, como barragens para abastecimento de água, geração de energia ou contenção de cheias, trazendo, desta forma, muitos benefícios para a população. Porém, a presença de grandes estruturas a montante de cidades, ou em configurações em cascata, em que uma barragem pode afetar a população próxima do rio, trouxe também um quadro de riscos.

Muitas pessoas confundem a matriz energética com a matriz elétrica, mas elas possuem conceitos diferentes. Enquanto a matriz energética representa o conjunto de fontes de energia disponíveis para movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade, a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. Ou seja, a matriz elétrica é parte da matriz energética (EPE, 2017)

Atualmente, na matriz energética brasileira (Oferta de Energia Interna – OIE), 56,5% da energia ofertada provem de fontes não renováveis, enquanto 43,5% provem de fontes renováveis. Neste cenário global, as usinas hidrelétricas têm significativo desempenho, se destacando com 12,6% da geração de energia total (renováveis e não renováveis), segundo dados de 2016 do Ministério de Minas e Energia – MME. Já quando considerado somente a Oferta Interna de Energia Elétrica – OIEE, as renováveis são mais significativas, com 81,7% do total, segundo dados do MME. A

supremacia da geração hidráulica se apresentou mais acentuada em 2016, ficando com aproximadamente 68% na estrutura total da OIEE (incluindo a importação de Itaipu), contra os 64% verificados em 2015 (65,2% em 2014 e 70,6% em 2013) e 83,3% do total das energias renováveis.

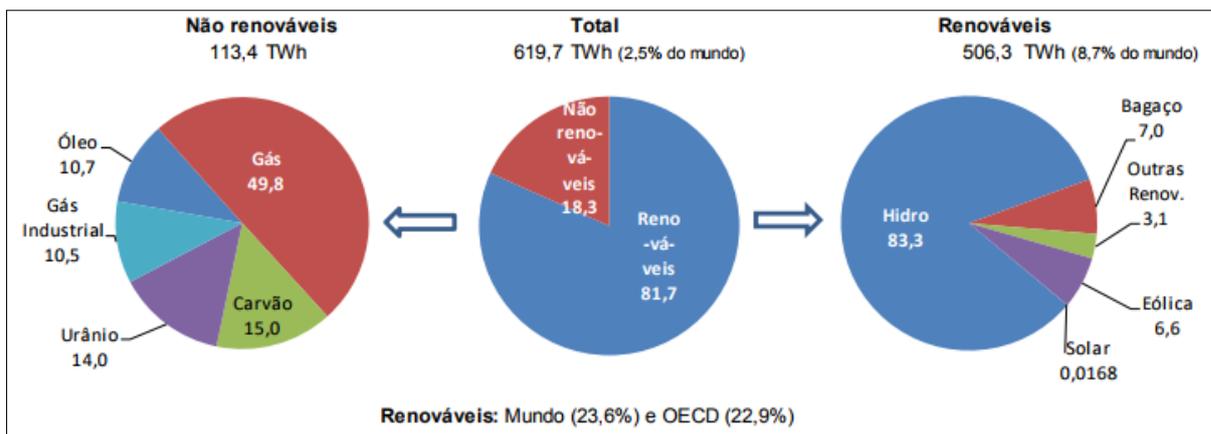


Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica - 2016 (%) (Fonte: MME, 2016).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, a entrada em operação de novas usinas, e de novas unidades de usinas em expansão, em 2016, somou o montante de 9.591 MW, sendo 5.002 MW de UHE, 2.569 MW de eólica, 1.759 MW de usina termoeletrica (UTE), 208 MW de pequenas hidrelétricas (PCH e CGH) e 52 MW de solar. No total, a potência instalada brasileira de geração passou a 150,4 GW em 2016, mostrando acréscimo de 6,8% sobre 2015. Incluindo os 5,9 GW da importação contratada, a oferta total de potência passa a 156,3 GW em 2016. Cabe registrar as expansões de 1.989 MW da UHE Belo Monte, de 1.092 MW da UHE Teles Pires, de 975 MW da UHE Jirau, e de 654 MW da UHE Santo Antônio.

A figura 2 ilustra a matriz de oferta de potência de energia elétrica. Verifica-se a supremacia da potência hidráulica, com 65,7% de participação, incluindo a importação. A participação das fontes renováveis fica em 81,4%, indicador muito superior ao mundial, de 20%.

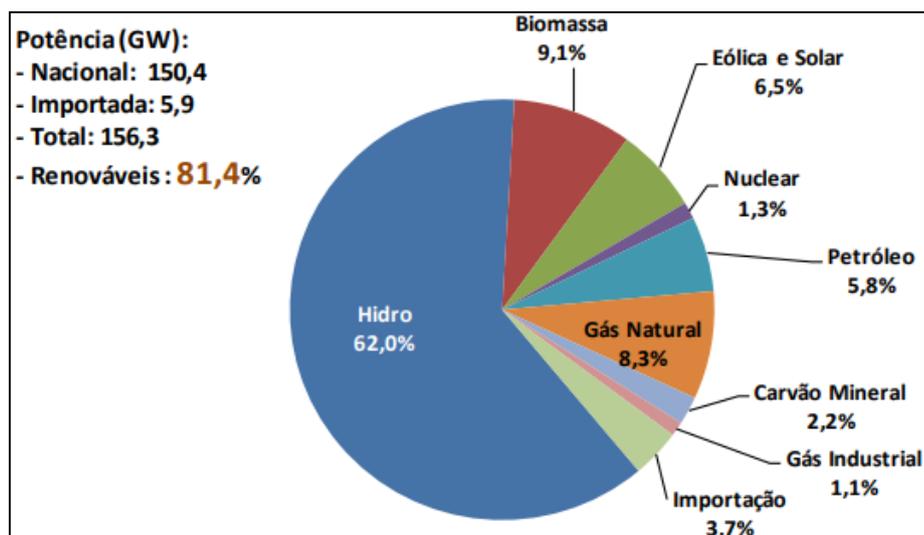


Figura 2 - Oferta de Potência de Geração Elétrica - 2016 (%) (Fonte: MME, 2016).

Associados à expansão das usinas e a instalação de estruturas de barramento, estão envolvidos grandes impactos e riscos, interferência ambiental e social a partir de sua construção, principalmente devido ao alagamento de grandes áreas, além da mudança na dinâmica fluvial. Destaca-se, também, que estão presentes os riscos de falhas estruturais ou de ocorrência de eventos naturais extremos e, conseqüentemente, de acidentes envolvendo esse tipo de estrutura. A ocorrência de eventos de cheia provocados pela operação ou falha de barragens pode ser agravada com os impactos dessas inundações ocorrendo sobre cidades no vale de jusante, causando prejuízos materiais e humanos significativos.

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), as barragens são seguras, desde que bem planejadas, construídas, mantidas e utilizadas. É essencial regular e fiscalizar essas construções. Ações preventivas devem ser realizadas pelos empreendedores, com ações estratégicas de planejamento, monitoramento e registro de dados, elaboração de planos de ações de emergência, inspeções e revisões periódicas de segurança, além de solicitar a entidade fiscalizadora a outorga para o barramento planejado, em projeto, construção ou já existente.

Nesse contexto, em 2010, foi sancionada a Lei nº 12.334 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB), destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, e que define responsabilidades e atribuições a respeito do cuidado com a segurança das barragens. Como descrito no seu Capítulo III, Art. 4º, inciso V, a segurança de uma barragem influi diretamente na sua sustentabilidade e

no alcance de seus potenciais efeitos sociais e ambientais. O enquadramento nos instrumentos dispostos no Capítulo IV, Art. 6º, como o Plano de Segurança de Barragem, permite uma maior segurança das estruturas, possibilitando a redução de acidentes e desastres decorrentes de falhas nas barragens.

Desta forma, de modo a atenuar os efeitos dos eventos de cheia, e conseqüentemente um evento de ruptura, é de grande importância o investimento e a execução de estudos de ruptura de barragem, com o conseqüente estabelecimento de sistemas de alerta e planos de contingência, além de trabalhar preventivamente mapeando a macha de ruptura da barragem e evitando a ocupação das áreas mais susceptíveis, através de um zoneamento consciente.

1.2 JUSTIFICATIVAS

As cidades que apresentam crescimento próximo aos rios estão sujeitas às conseqüências de eventos extremos, relacionados com o próprio funcionamento destes rios. Em casos nos quais estão à jusante de barragens, tornam-se ainda mais vulneráveis à propagação de ondas de cheia por ocorrência de uma possível ruptura da barragem, situação em que se provoca grande destruição pela capacidade de arraste da água, além de grandes alagamentos na região mais distante da zona de choque da onda de ruptura.

Muitos estudos que simulam as cotas e áreas de inundação, por meio do uso de modelos de propagação de ondas de cheia causadas pela ruptura de barragens, estão sendo desenvolvidos e vem desempenhando grande importância, tanto para contribuições acadêmicas no desenvolvimento de novos softwares de modelagem cada vez mais completos, quanto para desenvolvimento e caracterização dos possíveis danos socioambientais localizados à jusante dos barramentos.

A modelagem de um fenômeno com tal variabilidade temporal e espacial é muito complexa, tanto conceitualmente, como sob o ponto de vista de confiabilidade dos modelos, que, em geral, não têm dados para calibração suficiente, uma vez que este tipo de estudo busca antecipar as conseqüências de um acidente ainda não ocorrido e, portanto, sem qualquer dado medido.

Após importantes publicações referentes ao tema, como a lei 12.344 de 2010, a resolução 143 e 144 de 2012 (CNRH), que estabelecem respectivamente a Política Nacional de Segurança de Barragens, as diretrizes para critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, e as diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, a ANEEL publica a normativa nº 696 publicada em 2015.

Esta normativa estabelece critérios de classificação, a formulação do Plano de Segurança e revisões periódicas das barragens, com prazo definido para desenvolvimentos dos estudos de rompimentos, assim como disponibilização dos planos de ação emergencial para as situações de emergência, definindo principalmente todos os responsáveis e organizações públicas, que devem agir na ocorrência de um evento de emergência.

A partir dessas questões expostas é relevante à realização de estudos que visem compreender as premissas de modelagem, as respectivas necessidades de interpretação da realidade física e suas simplificações e, portanto, conseqüentes limitações, para então de forma efetiva, ser capaz de reduzir os possíveis impactos em cidades ribeirinhas de qualquer porte, causados por este fenômeno, além de respeitar ao atendimento da lei, resoluções e normativas que atuam como ferramenta de segurança para os órgãos reguladores e fiscalizadores.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar o estudo de propagação e inundação da onda de cheia em cidades vizinhas a uma usina hidrelétrica decorrente do rompimento de uma barragem e analisar os riscos envolvidos nesse processo, com o intuito de discutir as aproximações do processo e ganhar conhecimento para uma avaliação confiável destes riscos.

1.3.2 Específicos

São objetivos específicos desta dissertação:

- A partir da definição do uso do modelo MODCEL, com histórico anterior de aplicações para ruptura de barragens na UFRJ, desenvolver uma discussão sobre a sua pertinência, potencial e limitações.
- Definir um estudo de caso, com dados disponíveis e uma situação em que cidades e, preferencialmente, outra barragem em cascata, possam sofrer efeitos de uma ruptura;
- Aplicar o modelo matemático definido para a simulação de ruptura da barragem do estudo de caso escolhido;
- Produzir as manchas de alagamento sobre as planícies de jusante e as cidades vizinhas para o caso simulado, a partir da onda de ruptura da barragem;
- Analisar o fator de velocidade (combinação da lâmina de Inundação com a velocidade de escoamento, como indicador representativo da capacidade de arraste da onda), e
- Verificar o impacto do rompimento na usina de jusante.

1.4 ESCOPO

Neste primeiro capítulo, referente à introdução, apresenta-se todo o contexto do estudo, abordando o tema principal, as justificativas e os objetivos que impulsionaram a elaboração da pesquisa em questão. O segundo capítulo expõe o referencial e a fundamentação teórica para o desenvolvimento dos estudos, assim como as etapas da modelação matemática e o modelo a ser utilizado no presente trabalho. No terceiro capítulo, são descritos todos os dados da usina hidrelétrica, da bacia e da área de estudo, introduzindo o caso específico. Em seguida, no quarto capítulo é apresentada a metodologia proposta, assim como os ajustes necessários como parte da calibração do modelo. Após a aplicação da metodologia no estudo de caso, no quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. O capítulo seis é destinado às conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Atualmente, no Brasil, muitas estruturas de barragens são antigas e continuam envelhecendo, o que leva a discussões acerca da segurança dessas barragens. Segundo a PNSB, lei nº 12.334 de 2010, segurança de barragem consiste na condição que vise manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente, devendo ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros.

Conforme descrito no Guia Básico de Segurança de Barragens elaborado pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), uma barragem segura é aquela cujo desempenho garanta um nível aceitável de proteção contra ruptura, ou galgamento sem ruptura, conforme os critérios de segurança utilizados pelo meio técnico. A segurança das barragens existentes deve ser regularmente reavaliada por meio de inspeções de segurança de todas as estruturas e instalações. A segurança de uma barragem pode ser garantida pela correção de qualquer deficiência constatada, pela operação segura, continuada, manutenção, inspeção e pela preparação adequada para emergências.

Quanto as responsabilidades legais, a lei ressalta que o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la. Além do que, cabe as autoridades do poder público a responsabilidade pelas ações de fiscalização da segurança da barragem de sua competência, desta forma, segundo o Ministério do Meio Ambiente, determinados órgãos são responsáveis por fiscalizar cada um dos quatro grupos, de acordo com a finalidade da barragem:

- a. Barragens para geração de energia, fiscalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL);
- b. Para contenção de rejeitos minerais, fiscalizadas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM);

- c. Barragens para contenção de rejeitos industriais, sob responsabilidade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e órgãos ambientais estaduais; e
- d. As de usos múltiplos, sob fiscalização da Agência Nacional de Águas (ANA) ou de órgãos gestores estaduais de recursos hídricos.

A segurança da barragem está diretamente relacionada a gestão de risco, que segundo a PNSB é caracterizado por ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos.

Um dos possíveis fatores de risco é a inundação induzida por uma barragem, que um município localizado no vale a jusante da barragem, e ao longo de um rio está sujeito, como cheias naturais, deslizamentos de encostas, acidentes rodoviários com produtos químicos, acidentes industriais e etc.

Desta forma, é preciso estar ciente de que quanto melhor for a gestão dos riscos relacionados as barragens, e principalmente a gestão de todo plano de segurança de barragens, menores serão as ocorrências de casos de acidentes de barragem, muitos já ocorridos no Brasil e no mundo, causando danos irreparáveis e perdas de bens materiais e vidas humanas.

2.1.1 Barragens

As barragens têm sido construídas há milhares de anos. Os primeiros registros que se têm conhecimento datam da época dos faraós no Egito, ao longo do Rio Nilo que se utilizavam de pequenos barramentos como alternativa para restringir os efeitos da seca. Mas foi ao longo do século XX que grande parte do mundo recorreu a tais obras para atender à crescente demanda pela água. Aliado ao conceito de que a construção de barragens conduzia ao desenvolvimento e progresso econômico, entre as décadas de 20 e 70, registrou-se um significativo aumento destas construções em nível mundial (Bastos, 2007).

No Brasil, a primeira usina hidrelétrica entrou em operação em 1883. Ela foi construída no ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina (MG).

No entanto, a construção de barragens chegou ao seu apogeu entre os anos de 1950 e 1970, sobretudo no que diz respeito às obras de usinas hidrelétricas. Na década de 1980, entretanto, na era da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no Estado do Tocantins, iniciava-se uma tendência de queda na construção destes tipos de empreendimentos de grande porte e apresentava-se um cenário voltado aos pequenos e médios empreendimentos e as obras destinadas a irrigação, abastecimento de água e mineração (Cruz, 1996).

Os principais tipos existentes de barragens são as de aterro, de concreto-gravidade e de concreto em arco. As estruturas acessórias ou adicionais das barragens incluem vertedouros, estruturas de descarga, casas de força elétrica e unidades de controle (CBDB, 2017).

Ainda de acordo com CBDB (2017), as barragens construídas para armazenamento e controle especificamente de água, se destinam geralmente ao abastecimento doméstico e industrial, à irrigação, à navegação, à recreação, ao controle de sedimentação, ao controle de cheias e à produção de energia elétrica. Algumas barragens têm apenas uma função e são assim conhecidas como "barragens de função única", enquanto outras barragens são construídas para servir a diversas funções e são, por isso, conhecidas como "barragens de usos múltiplos".

Neste contexto, assim como Bureau of Reclamation (1987), Franco (2008) menciona diferentes classificações de barragem quanto ao seu uso e a especificidade da finalidade do armazenamento, o que influencia no escopo do projeto dessas barragens e determinará critérios para os dimensionamentos dos reservatórios e vertedouros.

Dentre os tipos de uso tem-se:

- **Barragens de armazenamento**, que servem para captar água durante períodos de cheia, objetivando seu uso no período de estiagem ou seca. Podem, todavia, serem utilizadas para suprimento de água, recreação, pesca, geração de energia elétrica, irrigação, etc.
- **Barragens de desvio** são construídas para proverem de água, os diques, canais ou outros sistemas de abastecimento. São mais usuais nos sistemas de irrigação e para abastecimento da rede municipal e industrial.
- **Barragens de retenção** são construídas para o controle de enchentes, minimizando seus efeitos adversos e repentinos. Tais barragens consistem em

dois tipos principais: aquelas em que a água é represada temporariamente e liberada através de uma estrutura de escoamento, em uma vazão que não exceda à capacidade do canal a jusante e aquelas em que a água é retida, tanto quanto possível, para se infiltrar no subsolo. O principal propósito, neste caso, é a recarga do lençol freático. Algumas barragens desta finalidade são utilizadas também para reter sedimentos. São conhecidas como barragens de entulho.

- **Barragens de uso múltiplo** são frequentemente construídas para servir a mais de uma finalidade, embora seja menos comum em pequenos empreendimentos.

A classificação quanto aos tipos de materiais, as barragens podem ser construídas em locais com características topográficas e geotécnicas bastante diversificadas e assim são utilizados diferentes tipos de materiais. Dependendo dos materiais utilizados, predominante, se pode classificar o material do barramento. Dentre as principais estruturas se destacam: concreto, terra, enrocamento e mistas (Franco, 2008).

As formas mais econômicas de construção de barragens são aquelas que fazem uso máximo de materiais naturais disponíveis nas proximidades. Em trechos mais baixos de um rio, pode haver uma abundância de solos, como argila, areia e cascalho. O uso de tais materiais geralmente é economicamente e ambientalmente preferido e a barragem resultante torna-se compatível com as fundações, que provavelmente serão de materiais semelhantes. Todavia, se o trecho acima do rio é mais íngreme e rochoso, poderá haver escassez de solos. Em tal terreno, é provável que uma barragem de enrocamento ou concreto pode ser mais apropriado (Twort's Water Supply, 2015).

Segundo a ANA (2017), a Lei nº 12.334/2010 estabeleceu, em seu artigo 16, que o órgão fiscalizador, no âmbito de suas atribuições legais, é obrigado a manter cadastro de barragens sob sua jurisdição com identificação dos empreendedores, para fins de incorporação ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). O cadastro de barragens da ANA, conforme suas atribuições legais, é composto por todas as barragens localizadas em rios de domínio federal, exceto as barragens destinadas para fins de aproveitamento hidrelétrico.

De acordo a Política Nacional de Segurança de Barragens, Art. 7º, as barragens podem ser classificadas, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. (BRASIL, 2010).

Apesar dos avanços quanto à classificação e regularização de barragens, o conjunto de 3.174 barragens são enquadradas na PNSB e possuem empreendedor identificado, no entanto ainda é uma fração do total de 22.920 barragens identificadas. Portanto, é grande o número de barragens sem identificação do empreendedor, sem a devida autorização dos órgãos competentes, e sem a devida avaliação quanto ao enquadramento na Lei. Das 22.920 barragens, 18.761 ainda não foram classificadas quanto ao dano potencial, e 19.229 ainda não foram avaliadas quanto à categoria de risco. Além disso, apenas 12.590 (ou 55%) possuem algum tipo de ato de autorização (outorga, concessão, autorização, licença, entre outros), estando, portanto regularizadas. (ANA, 2016)

A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Entretanto, a classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

De acordo a Política Nacional de Segurança de Barragens, as barragens podem ser classificadas em dois grupos:

“(…)

Art. 7º As barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

§ 1º A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem.

§ 2º A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

Diante das inúmeras formas de classificação das barragens, é necessário ter atenção a todas estas, principalmente quanto correlacionadas a segurança da população e os requisitos legais que a norteiam.

2.1.2 Tipos mais comuns de ruptura de barragem

De acordo com o ICOLD (2017) e Mascarenhas (1990), dentre as diferentes formas mais comuns de ocorrer uma ruptura de barragens, tem-se:

- **Galgamento ou *overtopping*** de uma barragem é um frequente precursor das falhas de uma barragem. O galgamento pode ser devido ao projeto inadequado do vertedouro, detritos bloqueando os vertedouros, ou assentamento da crista da barragem. Ou seja, resulta da incapacidade de liberação de grandes volumes de água pelos vertedouros e demais estruturas de descarga, podendo ser causado também pela ocorrência de onda de grandes proporções no reservatório, consequência de deslizamento de grande massa de terra para dentro do mesmo, podendo causar destruição parcial ou colapso total da barragem.
- **Deficiência das fundações ou taludes**, podendo ser considerado o assentamento da fundação e a instabilidade do talude. De modo geral, ocorre em fundações com resistência não satisfatória a tensões ou que apresentem ligações compostas de materiais como argila, por exemplo. A utilização de materiais impermeáveis com juntas de ligação pode também contribuir no deslizamento, se a infiltração através desses materiais não for monitorada para controle.
- ***Piping***, consiste em uma erosão interna causada pela percolação da água. A percolação geralmente ocorre em torno de estruturas hidráulicas, como tubos e vertedouros; através de tocas de animais; ao redor de raízes de vegetações lenhosas; e através de rachaduras em barragens, acessos das barragens, e fundação das barragens. Normalmente progride de jusante para montante, quando as forças de percolação excedem as forças resistentes.

- **Falhas no projeto e/ou construção da barragem e manutenção inadequada.** Podem ocorrer falhas como subdimensionamento dos dispositivos de descarga, análise não criteriosa dos materiais constituintes da obra, falha nas fundações, dentre outros, assim como falhas durante a manutenção, como uma comporta inoperante.

Os registros históricos indicam que as barragens que rompem mais são as relativamente pequenas, tendo em vista que 70% dos acidentes ocorrem com as barragens com alturas inferiores a 30m. Além do mais, 38% das rupturas acontecem durante o primeiro enchimento, sendo essa uma fase bastante crítica na qual a obra é testada (ALMEIDA, 2001).

2.1.3 Acidentes com barragens

Ao longo dos anos, principalmente em torno da década de 60, o aumento do número de barragens construídas provocou uma crescente preocupação da sociedade quanto à segurança das barragens e de possíveis acidentes que estas podem ocasionar.

Os estudos de barragens envolvem muitos aspectos que são de extrema importância para manutenção de sua segurança, como a instrumentação das barragens e o monitoramento de sua estrutura, estudos e acompanhamentos do comportamento das fundações, estudos hidrológicos que permitem o embasamento das previsões de cheias excepcionais, o estudo de propagação de onda decorrente de uma ruptura hipotética e também o mapeamento de áreas possivelmente afetadas e os danos causados.

Os temas citados são de principal responsabilidade dos gestores dos empreendimentos, que devem se preocupar em manter a segurança das usinas, assim como preservar tudo que pode ser atingido em uma situação de rompimento. O rompimento de uma barragem pode proporcionar consequências significativas, não só perdas de vidas, mas também grandes impactos ambientais, econômicos e sociais, gerando danos a própria barragem ou estruturas adjacentes, além de prejuízos indiretos como o impacto em atividades de comunidades próximas.

Considerando diversas barragens que existem no Brasil e em todo o mundo, com diferentes tamanhos e finalidades, um número significativo de acidentes continuam a ocorrer ao longo dos anos, variando em diferentes proporções quanto as perdas de vidas e os impactos ambientais. Tem-se incentivado os avanços tecnológicos na área de estudo e o tema atualmente está sendo de grande atenção por parte dos órgãos fiscalizadores por meio de suas publicações de caráter regulatório, conseqüentemente exigindo uma maior atenção por parte dos empreendedores.

2.1.1.1 Mundo

No âmbito mundial, muitos acidentes com barragens foram registrados: Barragem de Buffalo Greek (1972, EUA), Barragem de Gleno (1972, Itália), El Guapo (1999, Venezuela), Sayano-Shushensk (2009, Rússia), Bieudron (2000, Suíça). Assim, pode-se destacar a seguir os eventos com maior repercussão registrados e citados por Veról (2010), Silva (2013) e Pereira (2015). Além disso, ressalta-se um dos casos mais atuais ocorrido na barragem de Oroville (2017, EUA).

- Barragem de Malpasset – França (1959)

A barragem de Malpasset foi construída no sudeste da França com a finalidade de irrigação e reserva de água para abastecimento. A estrutura de concreto possuía em torno de 65 metros de altura e 223 metros de comprimento na crista, como pode ser visto na figura 3a. Após sofrer galgamento ocorreram falhas na fundação que provocaram seu rompimento, figura 3b, ocasionando uma onda de cheia que percorreu mais de 11km, com mais de 400 mortes.

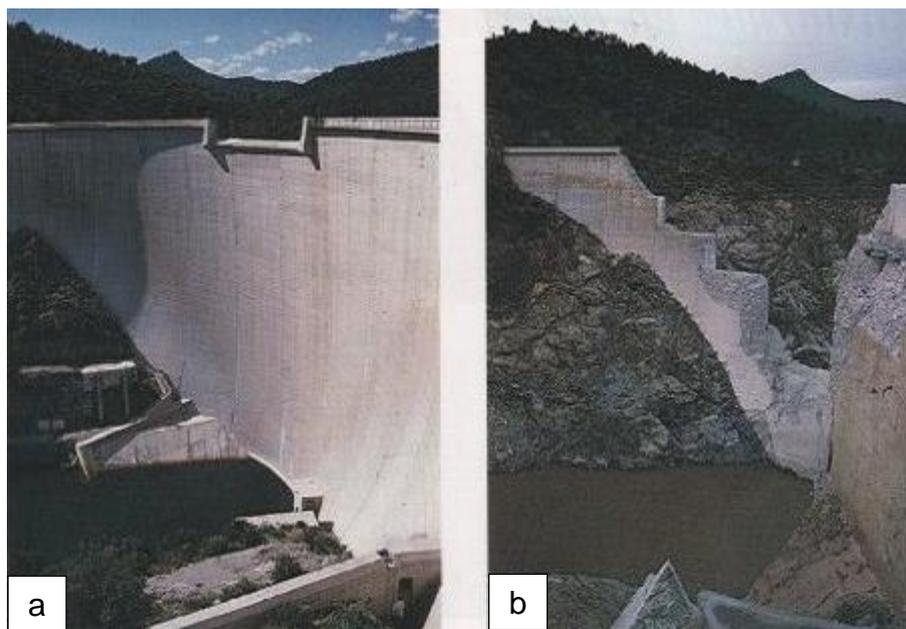


Figura 3 – Barragem de Malpasset antes (a) e após a rutura (b) em 1959 (Fonte: PEREIRA, 2015).

- Barragem de Vajont – Itália (1963)

Um dos casos mais famosos, o acidente da barragem de Vajont, localizada nos Alpes italianos, até então era uma das maiores barragens construídas, com aproximadamente 262 metros de altura. Em 1963, um grande deslizamento de massa rochosa do Monte Toc adentrou ao reservatório, que movimentou um grande volume de água, formando uma onda de cheia atingindo mais de 100 metros de altura. A onda provocou galgamento da estrutura da barragem, que não rompeu, contudo chegou a cidade localizada imediatamente a jusante, provocando a morte de mais de 2.000 pessoas.

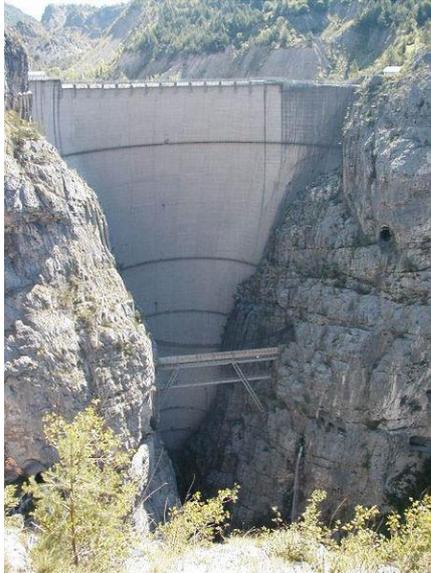


Figura 4 - Barragem de Vajont, Itália. (fonte: <http://www.highestbridges.com>, 2017)

- Barragem de Teton – EUA (1976)

A barragem localizava-se no rio Teton, em Idaho (EUA), tinha como função a irrigação e a geração de energia elétrica, era uma barragem de terra com cerca de 123 metros de altura, e 356 milhões de metros cúbicos. O rompimento ocorreu durante o enchimento do reservatório, em 1976, deixando 11 mortos. O problema começou com a percolação de água do reservatório pela fundação junto à ombreira direita, tendo sido identificadas surgências a jusante da barragem. A percolação evoluiu, atingindo o maciço de terra e provocando *piping*, pode-se observar a evolução nas figuras 5a, 5b, 5c e 5d.

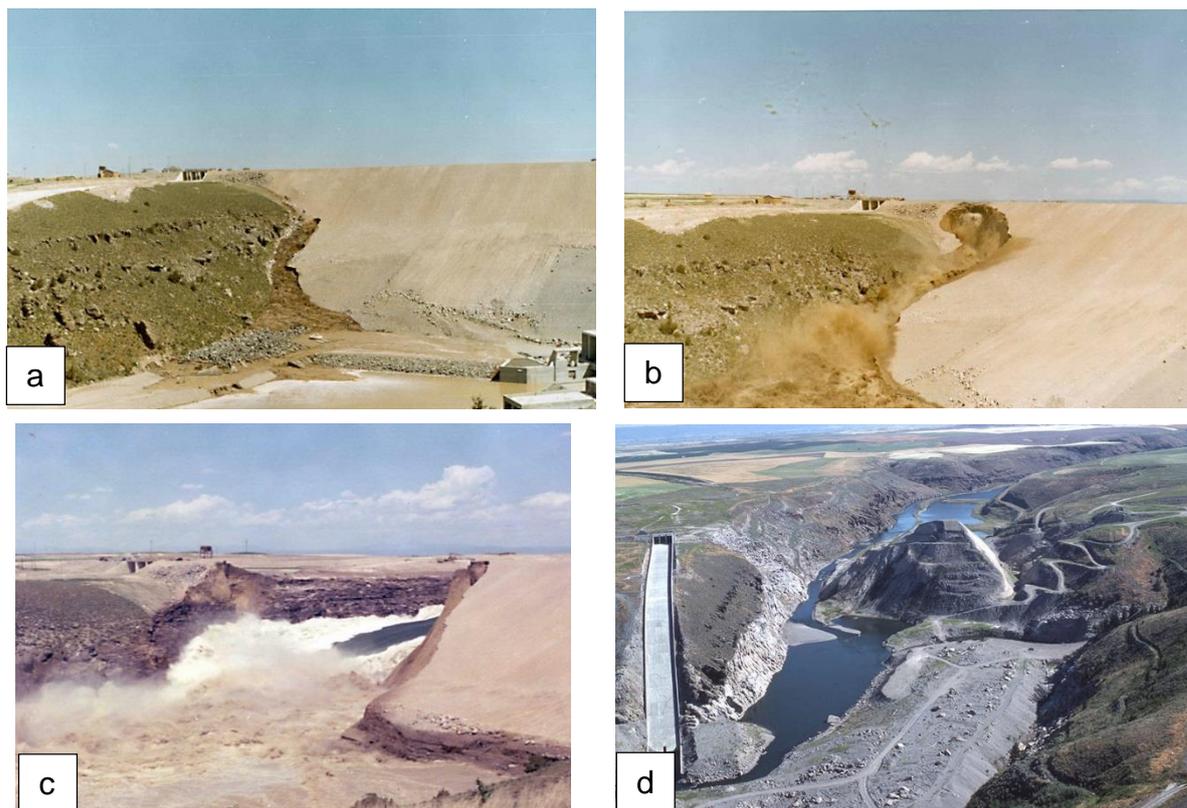


Figura 5: Diferentes momentos do acidente. (a) Início da percolação. (b) e (c) Percolação em fase avançada. (d) Fase final de percolação provocando o *piping*. (Fonte: Bureau of Reclamation, 2018).

- Barragem de Oroville – EUA (2017)

A barragem de Oroville localizada na cidade de Oroville, na Califórnia, considerada a maior barragem dos Estados Unidos, com 235 metros de altura, teve sua construção iniciada em 1961, e finalizada em 1968. A barragem foi construída com a finalidade de abastecimento de água, geração de energia e controle de enchentes. Em fevereiro de 2017 os índices pluviométricos estavam bem acima de outros registros recordes de chuva na região. O vertedouro principal foi aberto para aliviar a pressão sobre a represa, contudo as chuvas intensificaram e o fluxo no vertedouro aumentou, provocando uma erosão em sua parte média e que foi aumentada devido a não interrupção de seu uso. Posteriormente a vazão teve que ser reduzida e entrou em uso o vertedouro de emergência, que também sofreu danos. A erosão da cabeça do vertedouro de emergência ameaçou minar e colapsar o barril de concreto.

Com essa ameaça de rompimento, as autoridades classificaram o risco de desabamento da barragem de emergência da represa de Oroville como uma situação inédita e preocupante (BBC, 2017). Diante do risco foram determinadas a evacuação de aproximadamente 200 mil pessoas, desocupando as localidades de Oroville, Palermo, Gridley, Thermalito, South Oroville, Oroville Dam, Oroville East e Wyandotte (El Pais, 2017). Nas figuras 6a e 6b, pode-se verificar o uso do vertedouro principal e a erosão ocorrida, respectivamente.

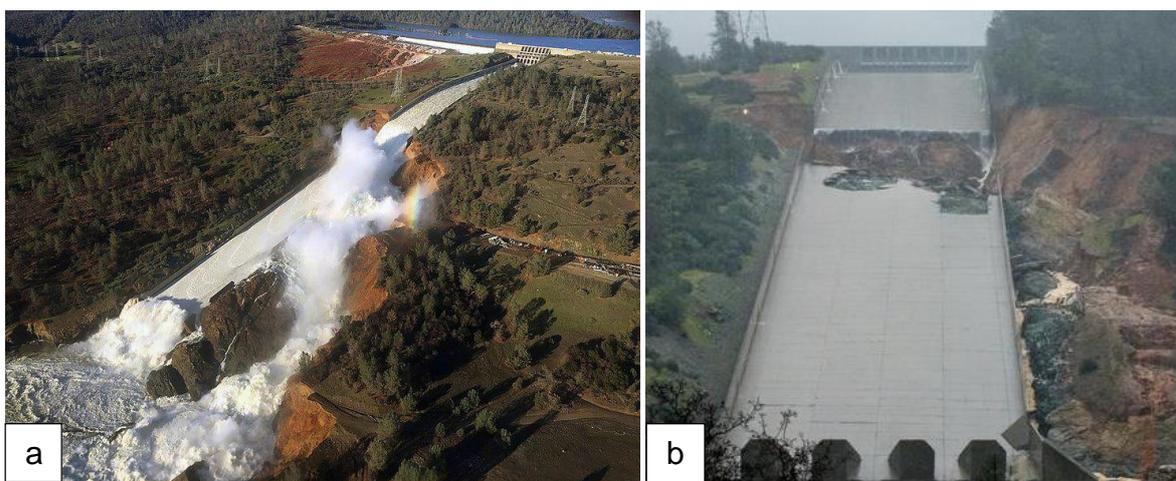


Figura 6 – Dia do evento. (a) Uso do vertedouro principal. (b) Erosão no vertedouro principal. (Fonte: California Department of Water Resources, 2017).

2.1.1.2 Brasil

No Brasil também ocorreram eventos significativos de rompimento de barragens, como barragem da Pampulha (1954, Belo Horizonte), barragem Espora (2008, Goiás), barragem de Rejeitos Fernandinho (Minas Gerais, 1985), barragem Pico São Luiz (1985, Minas Gerais), barragem Cataguases (2003, Minas Gerais), barragem de Rejeitos de Bauxita da Mineração do Rio Pomba Cataguases (2007, Minas Gerais), barragem Limoeiro (1977, São Paulo), barragem de Camará (2004, João Pessoa). Além das ocorrências citadas, em 2015 ocorreu o evento de rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG, que tomou grande repercussão nacional. A seguir, são destacados alguns casos de rompimento de barragens no Brasil citados por Veról (2010), Silva (2013) e Pereira (2015).

- Barragem de Óros – Ceará (1960)

Localizada no Ceará, foi considerado um dos piores acidentes ocorridos nos Brasil. A finalidade da barragem era irrigação, perenização do rio Jaguaribe, cultura de peixes e agrícolas, além do turismo e aproveitamento hidrelétrico. Em 1960, devido a uma grande enchente proveniente de alta precipitação em curto tempo, o açude de Óros sofreu galgamento com ocorrência de uma brecha na estrutura. A evacuação de aproximadamente 100 mil pessoas ocorreu três dias antes do evento, a onda atingiu os povoados próximos e cidades localizadas cerca de 75km a jusante, desabrigando em torno de 50 mil pessoas.

- Barragem de Euclides da Cunha e Armando Salles de Oliveira – São Paulo (1977)

Em janeiro de 1977, a UHE Euclides da Cunha, localizada no rio Pardo, sofreu galgamento junto à ombreira direita. A onda ocasionou a ruptura da barragem de Salles de Oliveira, localizada a jusante. O acidente ocorreu devido a má operação da barragem, pois a manobra das comportas se deu tarde demais. O acidente foi considerado grave, embora sem perda de vidas humanas, mas com muitas perdas econômicas.

- Barragem de Apertadinho – Rondônia (2008)

Localizada no estado de Rondônia, a barragem de Apertadinho rompeu próximo a data de sua inauguração, após 14 dias do processo de enchimento do reservatório, ocorrendo o deslizamento das estruturas de tomada d'água e conseqüente rompimento do vertedouro, e o reservatório foi esvaziado em apenas 3 horas. O colapso colocou em risco a vida de moradores das cidades próximo a usina. Embora não tenha havido nenhuma perda de vida humana, os danos e impactos foram consideráveis.

- Barragem de Algodão I – Piauí (2009)

A barragem de Algodão construída no Piauí, teve sua inauguração em 2001, com a finalidade de perenização do rio, o controle de cheias, abastecimento humano, irrigação, turismo e criação de peixes. Em 2009, com o reservatório atingindo altos níveis, a falta de manutenção adequada da barragem e possível obstrução dos vertedouros, a barragem rompeu, abrindo uma brecha de cerca de 50 metros. A onda de cheia atingiu drasticamente a cidade a jusante provocando a morte de 8 pessoas, além de muitas pessoas feridas, desalojadas, desabrigadas, um total aproximado de 2900 pessoas afetada, além das casas destruídas ou danificadas e mais de 30.000 animais mortos na cidade.

- Barragem de Fundão e Santarém – Minas Gerais (2015)

Segundo relatório de segurança de barragens (ANA, 2015), o ano de 2015 foi marcado pelo maior acidente com barragem já registrado no país em termos de impactos socioeconômicos: o rompimento da barragem de Fundão, pertencentes a mineradora Samarco S/A, em Mariana/MG.

Como descrito no Encarte do Rio Doce, elaborado pela ANA (2016), a mineradora Samarco S/A é a empresa que realiza as operações de extração e beneficiamento do minério na região das minas de Alegria, localizada nos municípios de Ouro Preto e Mariana. Os rejeitos gerados são estocados em três reservatórios na mina em Mariana: Santarém, Fundão e Germano.

O rompimento da barragem de rejeitos minerais de Fundão, e o galgamento da barragem de Santarém (onde houve erosão parcial do maciço), localizados próximos a região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Doce, resultou em um desastre ambiental de grande magnitude e repercussão na bacia do rio Doce.

A figura 7 é composta por imagens de satélite separados em dois momentos, um primeiro momento, antes da ocorrência do rompimento do reservatório das barragens da Samarco (figura 7a) e a situação da cidade de Bento Rodrigues (figura 7b), e um segundo momento mostrando a situação do local das barragens da Samarco (figura 7c) e da cidade de Bento Rodrigues (figura 8d) após o rompimento e devastados pelos resíduos de rejeitos da mineradora.

Foi relatado como resultado de uma consequência de eventos e condições, dentre as possíveis causas, os estudos contratado pela Samarco destacam como causas do desastre o recuo da ombreira esquerda, problemas de drenagem e a liquefação dos rejeitos arenosos. No dia 5 de novembro de 2015, o rompimento da barragem de Fundão ocorreu, e conseqüente galgamento da barragem de Santarém, liberando um volume estimado de 34 milhões de m³ de rejeitos de mineração, água e materiais utilizados em sua construção.

Nos trechos imediatamente a jusante, a onda resultante do rompimento da barragem avançou sobre a planície de inundação dos rios tributários, levando consigo parte da vegetação e do substrato. Esses materiais somaram-se à lama de rejeitos, agravando os danos nos trechos de cabeceira. A partir da barragem de Fundão, a onda de rejeitos e detritos seguiu os cursos do córrego Santarém e rios Gualaxo do Norte e do Carmo por 77 km até alcançar o rio Doce, 16 dias após o rompimento. A pluma de águas turvas percorreu 650 km e chegou à foz do rio Doce, no oceano formando uma área de aproximadamente sete mil quilômetros quadrados de mancha de rejeitos.

Bento Rodrigues, subdistrito do distrito de Santa Rita Durão, município de Mariana, situado a pouco mais de 5 km das barragens, foi praticamente todo soterrado pela avalanche de água, lama e detritos produzida com o rompimento da barragem, foram encontradas 19 vítimas fatais do acidente.

No rio Doce, a onda de rejeitos, água e detritos perdeu parte de sua força. Cerca de 30% dos materiais carreados ficaram acumulados no reservatório da hidrelétrica de Candonga, e no trecho entre Candonga e UHE Baguari.

As alterações na qualidade da água causaram interrupção no fornecimento de água à população dos municípios e distritos com sistemas de abastecimento diretamente dependentes do rio Doce. Além disso, o impacto do acidente afetou outros usos da água na região, como na geração de energia hidrelétrica, nas atividades industriais, na irrigação, na pecuária, na pesca, na balneabilidade e turismo.

Outro ponto relevante relacionado ao evento de Mariana é a repercussão do acidente como marco regulatório fundamental e crucial para todas as barragens enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (ANEEL nº 12.334/2010).

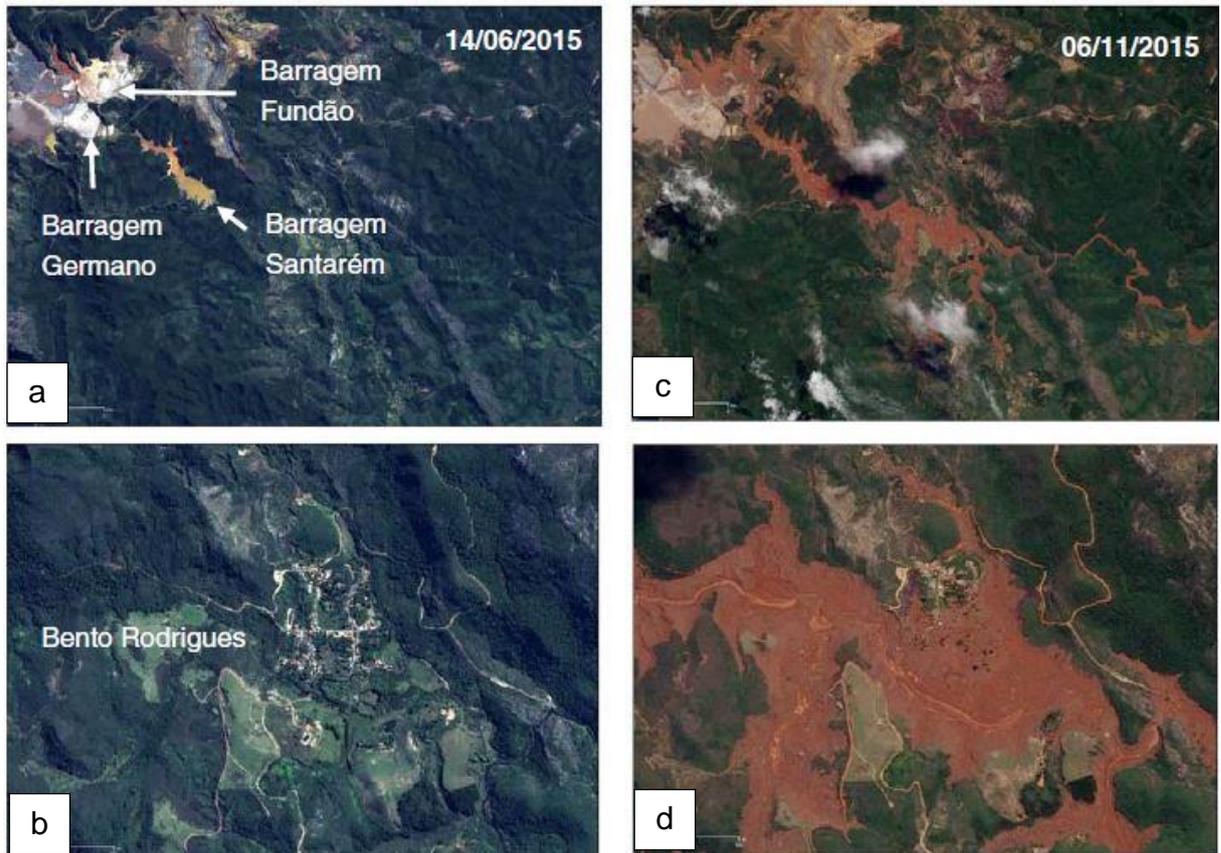


Figura 7 - As figuras (a) e (b) indica a região onde situa-se a barragem de fundão e a cidade de Bento Rodrigues, respectivamente, antes rompimento e as figuras (c) e (d) representam os mesmos locais após o rompimento) (Fonte: ANA, 2016)

2.1.4 Legislação

O registro das ocorrências dos casos de ruptura em todo o mundo, apesar de em muitos casos provocarem perdas de vidas humanas, perdas econômicas e ambientais, geram informações essenciais para embasamento e desenvolvimento de estudos na área de segurança de barragens. Os eventos de rompimento de barragens acabaram por impulsionar a criação de resoluções, diretrizes e de leis que regem a gestão dos riscos e danos envolvidos com a presença de uma barragem.

De acordo com o último Relatório de Segurança de Barragens - RSB (ANA, 2016), a definição do conjunto de barragens enquadradas na Lei e de suas exigências específicas quanto à segurança somente é possível após o processo de classificação de barragens desenvolvido pelos órgãos fiscalizadores. No RSB de 2016, 3.691 barragens foram classificadas por Categoria de Risco e 4.159 quanto ao Dano

Potencial Associado. Existem 695 barragens classificadas simultaneamente como categoria de risco e dano potencial associado altos.

Ao decorrer dos anos houveram a formação de comitês nacionais e internacionais, os quais permitiram a crescente troca de informações entre as várias associações que se dedicam ao estudo do problema, e tem proporcionado um avanço sensível nos regulamentos e critérios utilizados pelos diversos países, havendo uma tendência de uniformização de conceitos e práticas recomendadas.

- Cenário Internacional

No panorama internacional, segundo Aguiar et al (2014), diversos países adotam regulamentos específicos que passaram por revisões na última década, o que destaca a importância do tema e a sua atualidade.

Internacionalmente, há uma organização não-governamental responsável pela política de desenvolvimento tecnológico sobre segurança da engenharia de barragens e intercâmbio de conhecimentos e experiências, a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), fundada em 1928 composta por comitês nacionais de 100 países.

A organização lidera a profissão para garantir que as barragens sejam construídas de forma segura, eficiente, econômica e sem efeitos prejudiciais sobre o meio ambiente. Inicialmente seu objetivo era encorajar avanços no planejamento, projeto, construção, operação e manutenção de grandes barragens e suas obras civis associadas, coletando e disseminando informações relevantes e estudando questões técnicas relacionadas. Contudo, desde o final dos anos sessenta, o foco foi abordado em temas de preocupação atual, como segurança das barragens, monitoramento do desempenho, reanálise de barragens e vertedouros mais antigos, efeitos do envelhecimento e impacto ambiental (ICOLD, 2017).

Como mencionado no Guia Básico de Segurança de Barragens (CBGB, 1999), uma série de rupturas catastróficas, a partir da década de 50, levou diversos países a adotar medidas que garantissem a segurança de suas barragens por meio de regulação da construção e operação das barragens, além de estabelecimento de planos de emergências. Assim, durante o Congresso Internacional de Grandes Barragens, do ICOLD em 1979, em Nova Delhi, decidiu-se investir maiores esforços

no âmbito de segurança por três razões principais: diversos incidentes em barragens, com graves consequências ocorridas na época; aumento nas dimensões das novas barragens e envelhecimento de uma quantidade apreciável de outras; incremento na quantidade de barragens sendo construídas em países com pouca ou nenhuma experiência em engenharia de barragens.

Ao longo dos anos, países como Canadá, Estados Unidos e Austrália se destacaram quanto suas legislações sobre o assunto, e puderam servir de base para desenvolvimento de regulamentações em diversos outros países. Dentre as publicações relacionadas à segurança de barragens contendo recomendações emitidas pelo ICOLD podem ser destacadas: “Lessons from Dams Incidents” (1974), “Automated Observations for Safety Control of Dams” (1982), “Deterioration of Dams and Reservoirs” (1983), “Dam Safety Guidelines” (1987), “Dam Monitoring-General Considerations” (1988), “Inspection of Dams Following Earthquake” (1988), “Monitoring of Dams and Their Foundations” (1989), “Dam Failures Statistical Analysis” (1995) (CBGB, 1999).

No contexto internacional, como é descrito no Regulatory Frameworks for Dam Safety (2002), países como Argentina, França, Índia, Portugal e alguns estados do Canadá, Austrália e Estados Unidos, possuem uma legislação específica para Segurança de Barragens assim como autoridades regulatórias designadas exclusivamente para este fim. Em outros países, como o México, Nova Zelândia, e alguns estados do Canadá, Austrália e Estados Unidos, a regulação de Segurança de Barragens ocorre de modo mais generalizado, assim como a atuação de suas autoridades reguladoras. Na maioria dos países as autoridades reguladoras têm o poder de desenvolver normas e padrões, assim como emitir licenças para construção e operação de barragens e realizar Inspeções monitoradas.

A crescente troca de informações entre as várias associações que se dedicam ao estudo do problema tem propiciado um avanço sensível nos regulamentos e critérios utilizados pelos diversos países, havendo uma tendência de uniformização de conceitos e práticas recomendada (CBGB, 1999).

- Cenário Brasileiro

No Brasil, principalmente nos anos cinquenta ocorreu um grande impulso no campo da implantação de barragens no pós-guerra, notadamente no Nordeste com a construção de açudes com dimensões sensivelmente superiores aos anteriormente construídos e com a necessidade de promover a instalação de grandes hidroelétricas, tornou-se necessária a difusão de conhecimentos na área da engenharia de barragens e de tecnologias correlatas.

O Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) tem atuação em âmbito nacional, análoga à Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB). Anteriormente nomeado como Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB), teve as atividades retomadas e organizadas em 1957, e somente em 1961 obteve aprovação do seu estatuto. Assim, desde 1962 o CBDB passou a atuar nos moldes da CIGB, promovendo seminários nacionais de grandes barragens e apoiando atividades de comissões técnicas. Os trabalhos apresentados nos seminários são o perfil do desenvolvimento da tecnologia aplicada a projeto e construção de barragens no país.

O CBGB seguindo a tendência mundial da década de 70, editou em 1979 e 1983 as “Diretrizes para a Inspeção e Avaliação da Segurança de Barragens em Operação”. Posteriormente, em 1986, editou as Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Segurança de Barragens”, em 1995 o “Cadastro Brasileiro de Deterioração de Barragens e Reservatórios” e, em 1996, “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”. Estas publicações, elaboradas por comissões do CBDB, tem servido para balisar os procedimentos de segurança adotados por algumas organizações brasileiras (CBGB, 1999).

Um dos primeiros estudos em destaque no Brasil sobre segurança de barragens, foram desenvolvidos pela Comissão Regional de Segurança de Barragens de São Paulo (Núcleo Regional de São Paulo) e pelo Comitê Brasileiro de Barragens, por meio do “Guia Básico de Segurança de Barragens” (CBGB, 1999). Este foi baseado no guia canadense de segurança de barragens, *Dam Safety Guideline*.

Em 1999, o nome o CBGB foi alterado para Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB de forma a abranger também as barragens de menor porte inclusive aquelas da grande maioria das pequenas centrais hidrelétricas.

Com base neste guia foi elaborado em 2002, o “Manual de Segurança e Inspeção de Barragens”, publicado pela Secretaria de Infra-estrutura Hídrica do Ministério da Integração Nacional, no qual proprietários e construtores de barragens podem se basear para o direcionamento dos trabalhos relacionados à segurança de seus empreendimentos.

O objetivo do manual é orientar os procedimentos de segurança a serem adotados em novas barragens, quaisquer que sejam os seus proprietários, e manter as já construídas em um estado de segurança compatível com seu interesse social e de desenvolvimento. De uma forma mais específica, pode-se dizer que, com o manual se pretende: definir requisitos mínimos de segurança; uniformizar os critérios empregados na sua avaliação; permitir uma supervisão de segurança consistente, de modo a conduzir a execução de melhorias que aumentem a segurança dessas estruturas; contribuir para a legislação e regulamentação da segurança de barragens, em âmbito nacional.

Ainda de acordo com o manual publicado pelo Ministério da Integração Nacional, as barragens deverão possuir, cada uma, um Plano de Ação Emergencial (PAE) próprio, com o objetivo de garantir a segurança das pessoas que habitam áreas de jusante em situação de ruptura da barragem (VEROL, 2010).

No entanto, em 2010, entrou em vigor a Lei nº 12.334, que foi o primeiro grande marco regulatório de segurança de barragens no Brasil. Esta lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, além disso, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, para registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional. Para enquadrar-se na lei, a barragem deve apresentar pelo menos uma das seguintes características (BRASIL, 2010):

- I. Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- II. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III. Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

- IV. Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

Os objetivos da PNSB foram definidos em torno da segurança das barragens, de modo a garantir um padrão de segurança, regulamentar as ações a serem adotadas em todas as fases de um projeto de barragem, promover o monitoramento dessas ações pelos responsáveis do empreendimento, dentre outros, fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão dos riscos.

O empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem e deve tomar as medidas necessárias para garanti-la, sendo a responsabilidade da fiscalização da segurança da barragem atribuída aos órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) conforme a finalidade do empreendimento, além disso, é fundamental que seja promovido o envolvimento da população, de modo que participem direta ou indiretamente das ações preventivas e emergenciais.

No artigo 6º da Lei, são apresentados os instrumentos da PNSB (BRASIL, 2010):

- I. Sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II. Plano de Segurança de Barragem;
- III. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- IV. Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);
- V. Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- VI. Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- VII. Relatório de Segurança de Barragens.

Na seção II, artigo 8º, são definidos itens básicos que devem compreender o Plano de Segurança (BRASIL, 2010):

- I. Identificação do empreendedor;

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

Segundo artigo nº 18, a barragem que não atender aos requisitos de segurança nos termos da legislação pertinente deverá ser recuperada ou desativada pelo seu empreendedor, que deverá comunicar ao órgão fiscalizador as providências adotadas (BRASIL, 2010).

No artigo nº 19 é descrito que os empreendedores de barragens enquadradas no parágrafo único do artigo 1º terão prazo de 2 (dois) anos, contado a partir da publicação da Lei, para submeter à aprovação dos órgãos fiscalizadores o relatório especificando as ações e o cronograma para a implantação do Plano de Segurança da Barragem (BRASIL, 2010).

A ANA publicou a Resolução nº 742 de 2011, que estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança de barragem, e a Resolução nº 91 de 2012, que estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança de Barragem e da Revisão Periódica de Segurança de Barragem, ambas para barragens de acumulação de água exceto as para fins de aproveitamento hidrelétrico. Estas resoluções foram revogadas em 2017 pela Resolução nº 236, que estabelece em uma só resolução a periodicidade

de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência.

Ainda no ano de 2012, o governo federal publica a lei nº 12.608, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC, autorizando a criação do sistema de informações e monitoramento de desastres.

Dentre as providências a serem tomadas pelos municípios está a execução do Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil, que é um instrumento de planejamento das ações de Defesa Civil frente aos cenários de risco existentes no município, e que deve ter entre os seus cenários o risco produzido por barragens. Neste sentido, o PAE funciona como mais um instrumento para as autoridades de proteção e defesa civil.

O Ministério do Meio Ambiente e o Conselho Nacional de Recursos Hídricos por meio da Resolução nº 143 de 2012, estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório. E por meio da Resolução nº 144/2012, estabelece as diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

O Departamento Nacional de Produção de Minérios, portaria de nº 416 em 2012, que cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração. Além disso, em 2013, publica a portaria de nº 526, que estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM).

Logo para barragens com fins de geração de energia, apesar do prazo estabelecido no artigo nº19 da lei 12.334/2010, os critérios para classificação das barragens, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragens fiscalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL somente foi regulamentado em 2015. A ruptura da barragem de Fundão em Mariana - Minas Gerais em 05 de novembro de 2015 impulsionou a publicação da

Resolução Normativa Nº 696/2015, visto que esta foi publicada em dezembro de 2015, logo após a ocorrência do evento.

A publicação desta resolução normativa foi o segundo grande marco regulatório para a segurança de barragem no Brasil, pois definiu diretrizes e importantes prazos a serem atendidos pelos empreendedores. Esta resolução aplica-se a barragens fiscalizadas pela ANEEL, essas que sejam objeto de outorga para fins de exploração de potencial de energia hidráulica, contudo somente enquadrado para usinas sob regime de concessão. Desta forma, as usinas classificadas como Central Geradora Hidrelétrica – CGH, com potência instalada abaixo de 5 MW, não estão enquadradas para atendimento da resolução normativa.

A Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração – SFG através do formulário de segurança de barragens e determinação de seis meses para cumprimento do preenchimento e envio deste promoveu a mobilização dos empreendedores a classificar as barragens do setor elétrico e verificar o seu enquadramento normativo.

De acordo com o artigo 7º, Seção I da PNSB, as barragens podem ser classificadas da seguinte forma:

- A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem.
- A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

Após o preenchimento da FSB, a barragem é classificada com determinado nível de segurança de barragem ou a classe, sendo elas A, B ou C, onde A é uma classificação mais crítica devido a alta categoria de risco e alto dano potencial associado, como destacado na tabela abaixo.

Tabela 1 - Matriz de Classificação de Barragem (Fonte: ANEEL, 2015).

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

O número de usinas por empreendedor determina os prazos para elaboração do Plano de Segurança de barragens, podendo chegar até 4 anos para mais de 15 usinas por empreendedor, contudo as barragens classificadas como “A” devem ter seus Planos de Segurança de Barragens elaborados em até um ano. A definição da classificação também é importante para definição da periodicidade das inspeções de segurança regular e revisão periódica de segurança. Ao ocorrer um evento excepcional, deve-se realizar uma inspeção de segurança especial, visando manter ou restabelecer o nível de segurança da barragem à categoria normal.

Outra parte integrante do plano de Segurança é o Plano de Ação Emergencial, que é obrigatório para barragens classificadas como A ou B, porém devido sua importância, será melhor descrito no próximo item deste trabalho.

Em setembro de 2016, a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil com o Ministério da Integração Nacional publicou Orientações para Apoio à Elaboração de Planos de Contingência Municipais para Barragens visando dar subsídio técnico para que os Municípios e Estados elaborem seus Planos para os riscos gerados por barragens em seu território. O objetivo do Plano é atuar assim nas áreas de impacto direto (área identificada através de estudo, situada à jusante da barragem, e que pode vir a ser atingida caso haja uma ruptura do barramento) para uma barragem em eventual situação de emergência.

Ainda em 2016 a ANA publicou o Manual do Empreendedor de Segurança de Barragens, composto por oito volumes orientativos, que envolvem os itens do Plano de Segurança de Barragens, e outros volumes relacionados a segurança das barragens. Em ordem sequencial foram apresentados os seguintes guias orientativos: Instrução para apresentação do Plano de Segurança da Barragem; Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem; Guia de

Revisão Periódica de Segurança de Barragem; Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência (PAEs); Diretrizes para a elaboração de Projetos de Barragens; Diretrizes para a Construção de Barragens; Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens; Guia Prático de Pequenas Barragens.

Ainda quanto a Lei de Segurança e Barragens, há dois projetos de lei, PL n. 3.775/2015 e PL n. 4.287/2016, que tem como objetivo aprimorar os requisitos de elaboração e os critérios para implantação do Plano de Ação de Emergência (PAE) e fortalecer as ações de prevenção e preparação na gestão de risco de desastre, respectivamente. Em suma, o ponto focal é o PAE, pois a Política Nacional de Segurança de Barragens, em seu artigo 8, inciso VII, deixa aberta a necessidade ou não do PAE, devendo ser exigido pelo órgão fiscalizador, como escrito no Art. 11, sendo obrigatório apenas para as barragens classificadas como de dano potencial associado alto. Os projetos de lei mencionados, se aprovados farão com que o PAE seja obrigatório para todas as barragens que estejam enquadradas no Art. 1 da Política Nacional de Segurança de Barragens, o que já representa uma melhora significativa. Além disso, os projetos de lei preveem a participação da população residente a jusante da barragem na elaboração e implementação do PAE (AQUAFLUXUS, 2017).

Assim, é notória a importância do tema abordado, visto que permite a redução dos riscos de novos desastres, garantindo uma maior segurança não só para a estrutura da barragem em si, mas também para os vales a jusante, a população existente, a infraestrutura urbana e ao meio ambiente.

2.1.5 PAE

De acordo com as considerações da Resolução Normativa nº 696 de 2015, o Plano de Ação de Emergência – PAE é parte integrante do Plano de Segurança e estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor, na hipótese do nível de segurança da barragem enquadrar-se na categoria prevista como **emergência** (alínea d do inciso VI do art. 9º), ou seja, quando atinge o nível mais extremo de

segurança, onde as anomalias representem risco de ruptura iminente, exigindo providências para prevenção e mitigação de danos humanos e materiais.

No mesmo inciso VI do art. 9º da referida Resolução são apresentados outros níveis de segurança da barragem que são divididos nas categorias: normal, atenção e alerta. Estas devem ser conduzidas pelo empreendedor de acordo com informações presentes nos seus manuais e planos internos, sendo parte integrante do Plano de Segurança de Barragem.

A lei 12.334/2010 define em seu artigo 11º que o órgão fiscalizador poderá determinar a elaboração do PAE em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem, exigindo a elaboração do documento sempre que o dano potencial for associado a alto. Na resolução nº 696/2015, o PAE é considerado obrigatório para barragens classificadas como A ou B. Contudo, a ANEEL pode exigir a elaboração do plano sempre que considerá-lo necessário, independente da classificação.

Segundo as Orientações para Apoio à Elaboração de Planos de Contingência Municipais para Barragens, uma situação emergencial em barragens pode ter duas fases, sendo a primeira uma fase interna, quando ações são realizadas no âmbito das responsabilidades do empreendedor, e o foco principal são as condições de operação, segurança e estabilidade. A segunda fase é externa, quando procedimentos emergenciais devem ser adotados pela população em risco e pelo poder público local. Os procedimentos da primeira fase são estabelecidos no Plano de Ação de Emergência – PAE, cujos requisitos são definidos pelos órgãos fiscalizadores de barragens no país. A fase externa contém ações típicas de Proteção e Defesa Civil, e seu planejamento deve estar estabelecido em Planos de Contingência Municipais.

Desta forma, entende-se o PAE como mais um instrumento em que as autoridades de proteção e defesa civil contam para identificação de riscos que podem afetar seu município, e população, o que lhe permite atuar adequadamente.

Dentre os itens mínimos que devem ser contemplados pelo PAE, de acordo com o Art. 12º da Lei nº 12.334/2010, estão:

- I. Identificação e análise das possíveis situações de emergência;
- II. Procedimento para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;

- III. Procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação;
- IV. Estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

O PAE deve ser conduzido pelo empreendedor, e deve estar disponível tanto no empreendimento, quanto nas prefeituras, além de ser encaminhado também para a defesa civil. O prazo para seu desenvolvimento e disponibilização deve seguir o mesmo prazo determinado no artigo 7º da resolução normativa nº 696/2015 quanto ao prazo do PSB.

A Agência Nacional de Água desenvolveu em 2015, um Manual do Empreendedor preliminar, que pretende estabelecer orientações gerais quanto às metodologias e procedimentos a serem adotadas pelos empreendedores, visando assegurar adequadas condições de segurança para as barragens de que são responsáveis, ao longo das diversas fases da vida das obras, designadamente, as fases de planejamento e projeto, de construção e primeiro enchimento, de operação e de descomissionamento (desativação), o que gerou guias divididos em oito volumes, os quais podem ser aplicados em barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos (ANA, 2015).

Dentre os volumes destaca-se neste tópico, o volume IV - Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE, no qual se apresenta o conteúdo e organização de um Plano de Ação de Emergência (PAE), sendo este o único guia apresentado por entidades regulamentadoras sobre o tema de Plano de Ação de Emergência (ANA, 2015).

O guia da ANA oferece orientações sobre os critérios a adotar na elaboração de PAE de barragens, que são da responsabilidade do empreendedor. As orientações levam em consideração as boas práticas existentes nos domínios da avaliação dos riscos e das vulnerabilidades e do planejamento de emergência em barragens, estando de acordo com os normativos sobre segurança de barragens emitido pela Agência Nacional de Águas (ANA) estando, portanto, direcionado aos empreendedores de barragens reguladas pela ANA.

Apesar da publicação da Resolução Normativa nº 696/2015, a ANEEL não desenvolveu um guia orientativo de elaboração do PAE para as barragens

regulamentadas por ela, assim como a ANA apresentou. Desta forma, a Associação Brasileira de Empresas Geradoras de Energia Elétrica – ABRAGE por meio de grupos de trabalho de segurança de barragens e grupos de trabalho de recursos hídricos estão atualmente desenvolvendo um guia orientativo que ainda está em discussão, neste há proposta de estrutura para os empreendedores elaborarem o PAE de modo padronizado. O guia será baseado em boas práticas de engenharia, o qual utiliza como balizador a legislação vigente, o que permitirá o alinhamento principalmente entre o empreendedor e a Defesa Civil Municipal de forma bem clara todas as ações a serem tomadas em caso de emergência, determinando as responsabilidades.

Devido ainda não haver um guia regulamentado específico para barragens de aproveitamento energético, a orientação da ANA é a principal ferramenta de referência para elaboração do PAE. Desta forma, de acordo com a ANA, o PAE deve conter os seguintes elementos:

- Informações gerais das usinas e da barragem, como contatos do empreendedor, do coordenador do PAE, descrição das estruturas da barragem e recursos da usina para situações de emergência;
- Deve-se ter um plano de ação, onde haja detecção, avaliação e classificação da situação, além de ações esperadas para cada nível de resposta
- Procedimentos de notificação e sistema de alerta, comunicando aos membros envolvidos sobre as principais ações de emergência, fluxograma de notificação.
- Responsabilidades gerais, seja por parte do empreendedor ou por parte dos agentes externos como entidades fiscalizadoras e defesa civil.
- Síntese do estudo de inundação e mapas de inundação.

Um dos itens de suma importância para elaboração do PAE são os mapas de inundação, que são gerados por meio dos estudos de rompimento de barragem. O estudo resulta em informações como tempo de chegada da onda, velocidade e cota máxima de inundação nos pontos relevantes. Ao plotar esses resultados em uma imagem aérea ou mapa cartográfico da área de estudo, este indicará todas as possíveis áreas atingidas, obtendo-se assim os mapas de inundação.

Para a elaboração dos mapas de inundação, o empreendedor deverá realizar previamente a modelagem do terreno no vale à jusante da barragem e dispor de dados do reservatório e da hidrologia local para balizar as simulações hidráulicas de ruptura

da barragem. A partir destas informações básicas, são utilizados modelos hidrodinâmicos auxiliados por programas computacionais específicos para a realização de simulações unidimensionais e/ou bidimensionais que permitem avaliar não só o processo de propagação da onda de cheia no vale a jusante, mas também o processo de formação dessa cheia, compreendendo o desenvolvimento da brecha de ruptura e o hidrograma efluente da mesma.

Em grupos de discussão sobre segurança de barragens, na construção do PAE entende-se que a metodologia para desenvolvimento dos mapas de inundação provocados por ruptura de barragens seja realizada conforme diretrizes do Boletim 111 do Comitê Internacional de Grandes Barragens, através das etapas de elaboração do hidrograma de ruptura; propagação da onda de cheia; geração de mapas de inundação e elaboração dos planos de contingência

E desta forma entende-se que a simulação da ruptura da barragem devem ser estudados dois cenários, a saber:

- Ruptura em dia de sol e,
- Ruptura por galgamento da barragem ocasionado por uma cheia com vazão superior àquela dimensionada no projeto do vertedouro.

Para ambos os critérios devem ser calculados o hidrograma de ruptura e simuladas as rupturas da barragem com base em metodologias indicadas pelas principais referências técnicas aplicáveis. Além disso, é considerado importante trabalhar favor da segurança de modo que os estudos de propagação da onda de ruptura sejam realizados principalmente até o ponto do rio onde os cálculos hidráulicos indiquem que já não existe perigo para as populações e pessoas situadas a jusante.

No Plano de Ação de Emergência deverá conter associados ao mapa de inundação, o tempo de chegada da onda, velocidade e cota máxima de inundação nos pontos relevantes para orientar as autoridades e defesas civis na gestão de emergência. É de responsabilidade do empreendedor simular a ruptura da barragem e determinar as respectivas manchas de inundação; promover treinamentos internos e manter os respectivos registros das atividades; além de prover suporte para as atividades realizadas na Zona de Auto Salvamento – ZAS.

Segundo ANA (2017), a ZAS é a região do vale a jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar, no mínimo, a menor das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 minutos ou 10 km.

Quando as usinas são compostas em cascata, será necessário uma articulação entre os empreendedores, principalmente para a simulação da ruptura em conjunto, pois resulta em uma interligação da coordenação da operação dos reservatórios na tentativa de mitigar os impactos de uma onda de ruptura. Entretanto, devido ainda não haver uma regulamentação bem definida de como deve ser realizada esse compartilhamento de atividades para desenvolvimento de estudos de rompimento em cascatas, os empreendedores vêm adotando nesse primeiro momento o desenvolvimento de estudos isolados, podendo ser revisados em uma oportunidade da realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragens, a partir da posse das simulações de ruptura dos demais empreendedores localizados na mesma bacia hidrográfica.

É importante que, sempre que atualizada qualquer informação que possa alterar o PAE, que esta seja alterada adequadamente e reenviada para as pessoas anteriormente responsáveis pelo plano de ação em questão.

2.1.6 Gestão do risco

O conceito de risco tem uma importância crescente na sociedade, seu significado varia dependendo do contexto em que está inserido, sejam essas vertentes econômicas, sociais ou ambientais.

O risco está associado a duas variáveis, a *probabilidade*, que é a possibilidade de ocorrência do perigo, ou seja, uma situação que tem potencial para causar danos e ameaça a existência ou os interesses de pessoas, propriedades ou meio ambiente, não podendo ser controlado ou reduzido (CETESB, 2003). E as *consequências*, que são os resultados da integração entre a vulnerabilidade (características que potencializam os danos a um sistema) e a exposição (quantidade de elementos que

podem ser afetados pelo perigo). No campo da engenharia, o risco está relacionado tanto à probabilidade de ocorrência de um evento, quanto à expectativa de suas consequências, principalmente das perdas causadas por ele. Já em sistemas naturais e em sistemas tecnológicos, o conceito de risco está relacionado com as incertezas na garantia da segurança (ZONSEIN, 2007).

Adaptado do exemplo destacado por ZONSEIN (2007), no caso do risco de ruptura de uma barragem, um evento de chuva pode representar um perigo, e o risco dependerá da avaliação das consequências, quanto à vulnerabilidade e a exposição dos elementos sob risco, seja da condição da estrutura da barragem, de uma adequada operação na ocorrência desses eventos ou, avançando para situações mais extremas, entra em questão a vulnerabilidade das pessoas e/ou bens passíveis de serem afetados, assim como do valor associado a estes.

A análise de risco compreende a atividade voltada para o desenvolvimento de uma estimativa, qualitativa ou quantitativa, do risco, baseada em uma metodologia estruturada para promover a combinação entre a probabilidade de ocorrência e as consequências de um evento perigoso (CETESB, 2003). Desta forma, o risco deve ser reconhecido, mensurado, prevenido e no caso de sua ocorrência, mitigado, pois isto permitirá a redução da probabilidade de ocorrência de um acidente.

A análise do risco associada à segurança de barragens deve ser um processo estruturado, de modo que seja possível identificar a extensão e a possibilidade das consequências associadas a acidentes de barragens ou de componentes de barragens. Esta análise permite o desenvolvimento de ferramentas para tomada de decisão das possíveis intervenções (FILHO, 2017).

Um ponto a se destacar e que está relacionado a vulnerabilidade, é a percepção do risco, definida como o julgamento intuitivo de um indivíduo ou grupo social acerca do risco ao qual está submetido. Esta avaliação é realizada com base nas informações, incertezas e experiências anteriores deste indivíduo ou coletividade. Indivíduos de uma mesma comunidade podem avaliar o risco de formas diferentes, por não possuírem a mesma informação sobre a probabilidade de um evento de risco ocorrer. Por isso, é importante que o processo de comunicação sobre risco e percepção do risco devem ser incentivados, de modo que as partes interessadas (comunidades, especialistas, gestores) compartilhem essas informações de forma

relativamente homogênea, o que pode ser promovido através de medidas educativas e de comunicação. (MESSNER e MEYER, 2005).

Para a avaliação do nível de segurança (ou de insegurança) dos vales com barragens, e em muitas outras situações, torna-se indispensável associar ao risco os potenciais danos associados ao acidente cuja probabilidade se quantifica. A avaliação do risco nos vales com barragens torna-se indispensável, no contexto da gestão do risco, por forma a obter uma referência sobre a segurança dos mesmos e sobre a prioridade ou necessidade de intervenção por meio da aplicação de medidas estruturais (reforço e manutenção da barragem) ou não-estruturais (controle de segurança com alerta e evacuação no vale a jusante) (ALMEIDA, 2006).

Comumente, um barramento é dito seguro quando atende aos critérios técnicos de segurança estrutural, ou seja, possui adequação entre projeto, execução e manutenção, de tal forma que possa garantir o seu correto funcionamento. Porém, também deve ser levado em conta o potencial de danos que uma hipotética ruptura do barramento possa provocar. Isso reflete diretamente na sensação de segurança passada pela estrutura. A história mostra que somente após acidentes fatais envolvendo barragens foram desenvolvidos estudos com o objetivo de avaliar a segurança, propor melhorias e gerenciar o risco. Muitos problemas poderiam ter sido evitados caso fossem elaborados e seguidos planos de monitoramento das condições do barramento e planos de ação em situações emergenciais (AGUIAR et al, 2014).

Desta forma, a segurança absoluta das barragens não pode ser garantida, mas sim gerida de modo a minimizar significativamente possíveis ocorrências e seus impactos. Em sua maioria, as barragens que romperam eram desprovidas de sistema de monitoramento do seu desempenho e de alerta. De acordo com MEDEIROS (2013), os erros podem ser atribuídos de acordo com alguns pontos destacados a seguir, e podem ser evitados se alguns desses pontos forem devidamente observados.

- A falha humana, durante as fases preliminares das investigações para o projeto (como investigação geológico-geotécnica simplificada, caracterização inadequada das fundações);
- Dados e critérios de projeto deficientes, fiscalização deficiente em fase pós-construtiva;

- Operação inadequada, monitoramento inadequado e erros de interpretação de dados do monitoramento e devido a operação indevida das estruturas hidráulicas;
- Negligência com manutenção das estruturas e/ou equipamentos hidráulicos, etc.

Os acidentes com barragens, normalmente têm suas origens em algum tipo de anormalidade em seu comportamento ou em algum tipo de falha, como os citados anteriormente, contudo, se devidamente detectada poderia ser identificado e mitigado antes mesmo de resultar em um acidente. Desta forma, torna-se imperativo um eficiente sistema de inspeção e monitoramento da barragem, assim como, o pronto tratamento, análise e interpretação dos dados, em qualquer programa que vise a avaliação e garantia de segurança de barragens. (MEDEIROS, 2013).

Como forma de apoiar a garantia da segurança das barragens, a Resolução Normativa nº 696/2015, assim como a Política Nacional Segurança de Barragens possuem ferramentas que contribuem para uma melhor gestão dos riscos, e uma dessas ferramentas é a elaboração dos mapas de inundação.

No que concerne ao zoneamento do risco, ele consiste na subdivisão da área de inundação em função do perigo da onda de cheia, que se modifica ao longo do vale. Assim sendo, pode-se elaborar um mapa de risco para cada uma das variáveis que interferem na capacidade de arraste e destruição, nomeadamente a altura máxima da lâmina d'água, o tempo de chegada da onda em determinada seção e a velocidade do escoamento. Além desses fatores, é possível analisar o risco hidrodinâmico, que corresponde ao produto entre a profundidade e a velocidade do escoamento, sendo este parâmetro o mais adotado para ilustrar o grau de perigo da cheia (VISEU, 2006).

Pode-se observar ainda que a Resolução Normativa nº 696/2015, como já mencionado no item 2.1.6, dispõe de outras ferramentas que possibilitam uma melhor gestão dos riscos, como as inspeções regulares, as inspeções especiais e a realização do monitoramento das barragens, por meio de instrumentações na própria barragem, com o uso por exemplo de piezômetros, garantindo o monitoramento da estabilidade da barragem, assim como o uso de equipamentos mais distantes, como estações telemétricas, que podem ser uma importante ferramenta acoplada ao

sistema da usina que permite o monitoramento das cheias. Todos esses mecanismos são essenciais para quantificação e qualificação dos riscos, permitindo tomadas de decisão e medidas preventivas mais pontuais.

De acordo com o IFTR (2018), para viabilizar a gestão segura das barragens, os empreendedores devem desenvolver e manter programas atualizados de gerenciamento de segurança de barragens, que se baseiam em toda estrutura organizacional da empresa. Deve haver um executivo especificamente encarregado da responsabilidade geral pela segurança das barragens, e este executivo deve estar plenamente consciente das preocupações com a segurança das barragens e das prioridades por meio de relatórios diretos e regulares de um profissional de segurança de barragens designado para garantir que "o equilíbrio seja correto" em termos das prioridades da organização.

2.2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA

2.2.1 Leis e princípios básicos

O escoamento em um curso d'água são regidos por leis físicas, sendo elas, o Princípio da Conservação da Massa, ou Princípio da Continuidade do Volume, o Princípio da Conservação da Energia e o Princípio de Conservação do Momento, ou Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento. Essas leis que constituem o modelo matemático geral para o escoamento de fluidos, também são chamadas de equações de Navier-Stokes quando descritas nas três dimensões, são expressas matematicamente na forma de equações diferenciais parciais.

Como o escoamento em rios ocorre em uma direção preponderante, essas equações tridimensionais podem ser simplificadas (promediação) em um sistema de equações unidimensionais, conhecido como equações de Saint-Venant (CUNGE et al. 1980).

As principais hipóteses simplificadoras normalmente aceitas para a dedução das equações de Saint-Venant são:

- Fluido incompressível;
- Variação gradual das seções transversais;

- Escoamento unidimensional, assim a velocidade média é representativa da variação espacial na seção e o sentido predominante do escoamento é longitudinal;
- Distribuição hidrostática de pressão na vertical, desprezando eventuais efeitos decomponentes de acelerações verticais;
- Ausência de singularidades, como contrações na calha, pilares de ponte, soleiras de fundo, entre outros;
- Declividade da linha de energia pode ser calculada por uma equação estabelecida para o regime permanente, como as equações de Manning ou Chézy.

A Equação da Continuidade quando aplicado em um volume de controle, representado por um trecho da calha do rio, compreendido entre duas seções consecutivas, o princípio da conservação da massa diz que a diferença entre o volume de água afluente à seção de montante e o volume efluente no trecho, num dado intervalo de tempo, corresponde exatamente à variação de água dentro desse trecho, durante o mesmo intervalo de tempo. Sendo assim, a equação da continuidade, como é conhecida a formulação matemática para o princípio da conservação da massa, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

A = área molhada da seção transversal (m²);

t = variável independente relativa ao tempo (s);

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

q_L = vazão lateral por unidade de comprimento, que entra ou sai do trecho considerado, no intervalo de tempo.

Já a equação dinâmica, quanto ao princípio da conservação da quantidade de movimento, quando aplicado ao mesmo volume de controle, diz que a variação da

quantidade de movimento do volume de controle, por unidade de tempo, é igual ao somatório de todas as forças externas que atuam nesse volume. Este princípio traduz a aplicação da segunda Lei de Newton. Considerando que as forças externas atuantes sejam as forças de contato (Pressão e Atrito) e a força de campo (Gravidade), tem-se a equação dinâmica, como é conhecida a formulação matemática para o princípio da conservação da quantidade de movimento, escrita como:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (2)$$

Onde:

v = velocidade média do escoamento (m/s);

h = profundidade do escoamento (m);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

t = variável independente relativa ao tempo (s);

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

S_0 = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

S_f = declividade da linha de energia (m/m).

2.2.2 Modelos matemáticos

2.2.2.1 Modelos utilizados para propagação da onda de ruptura

De acordo com Junior, E. (2013), o escoamento resultante da ruptura de uma barragem envolve fenômenos de difícil caracterização matemática e com grande variação das grandezas hidráulicas no tempo e no espaço. O processo para estudar a propagação de ondas de ruptura de barragens pode ser realizado através três classes de modelos, são eles: modelos físicos, usados em situações muito específicas de pesquisa devido as dificuldades do ensaio e os custos altos envolvidos; modelos empíricos, baseados em equações empíricas de previsão geralmente obtidas a partir de observações de eventos já ocorridos, por meio de regressão, considerando diversas variáveis de correlação; modelos matemáticos, desenvolvidos utilizando as equações diferenciais que regem os fenômenos envolvidos, sendo muito difundidos

os modelos que utilizam as equações de Saint-Venant, que realizam o balanço de massa e da quantidade de movimento em escoamentos unidimensionais.

Os modelos matemáticos podem ser divididos em analíticos ou numéricos, conforme o tipo de solução desenvolvido para as equações diferenciais envolvidas. De modo geral os modelos analíticos são soluções só possíveis para casos muito simplificados, sendo importantes, entretanto, para fazer a validação dos modelos numéricos. Já os modelos numéricos são de aplicação mais geral, permitindo modelar o escoamento provocado pela ruptura de uma barragem em condições mais reais. Os modelos numéricos baseados nas equações de Saint-Venant podem ser divididos conforme as hipóteses simplificadoras adotadas em: Modelos Hidrológicos ou de Armazenamento, Modelos Hidráulicos Simplificados e Modelos Hidrodinâmicos. (JUNIOR, E., 2013).

De acordo com CHOW (1959), os modelos de escoamento se dividem em dois grupos: os modelos hidrológicos que estão os que desprezam a equação dinâmica de Saint-Venant, considerando apenas o efeito do armazenamento no trecho de escoamento, e por isso, são geralmente chamados de modelos de armazenamento, como o modelo de Muskingum. E os modelos hidráulicos, que utilizam as duas equações de Saint-Venant, considerando ou não as soluções simplificadas por elas admitidas.

Os modelos que consideram todos os termos das equações de Saint-Venant são chamados de modelos hidrodinâmicos. A forma mais simples de aplicar um modelo hidrodinâmico a um trecho de rio, é considerar o escoamento unidimensional, ou seja, apenas um valor de altura de água e de velocidade em toda a seção transversal (JUNIOR, E. 2013).

A utilização de equações unidimensionais para simular ondas de propagação de inundações de rios é uma extrapolação, o qual deve-se observar as limitações pertinentes, pois raramente a aplicação do escoamento será estritamente unidimensional, visto que na natureza os rios são canais raramente retilíneos. Com frequência, uma vez que as águas da inundação deixam o canal principal, ultrapassando suas margens, seu comportamento subsequente é completamente independente do escoamento entre as margens submersas (VERÓL, 2010).

Em resposta às necessidades de se modelar vastas planícies de inundações, onde a aproximação unidimensional não se adequa, é que foram desenvolvidas as

chamadas técnicas de modelagem bidimensional. Uma possível representação do espaço bidimensional considera que a planície de inundação pode ser dividida em várias células, ou bacias de armazenamento, onde, em cada uma, a superfície de água é assumida horizontal (embora sua área superficial dependa do nível d'água na célula) e cada uma das quais comunica-se com sua vizinha e/ou com o canal principal (VERÓL, 2010).

Modelos que utilizam equações realmente bidimensionais tendem a representar melhor grandes superfícies d'água em movimento, mas são mais difíceis de resolver. Entretanto, estes modelos não são, necessariamente, uma melhor representação do problema de cheias em grandes planícies alagáveis, onde a topografia exerce um papel importante, com depressões ou elevações locais, com a presença de diques, estradas ou outras estruturas de porte importante, não havendo a formação única e homogênea de uma superfície de escoamento, o que dificulta o uso das equações bidimensionais, pois pode haver comportamentos matemáticos distintos para os escoamentos em diferentes partes da planície (VERÓL, 2010).

De modo resumido, baseando-se no que foi descrito por VEROL (2010), de acordo com a precisão da resposta obtida, os modelos podem ser divididos em simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1-D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2-D) e hidrodinâmicos tridimensionais (3-D).

Dentre os muitos modelos já desenvolvidos e difundidos no meio técnico e científico, os principais modelos destacados por VERÓL (2010) estão organizados por classificação na tabela 2.

Tabela 2 – Modelos de simulação de Ruptura

Classificação	Modelo	Desenvolvimento/ Suporte
1D	HEC-RAS	USACE
	NWS DAMBRK	NWS
	DAMBRK	
	SMPBRK	
	FLDWAV	
	PROPAG	MASCARENHAS
quasi-2D	MODCEL	COPPE/UFRJ

Classificação	Modelo	Desenvolvimento/ Suporte
2D	MIKE21	DHI
	DelftFLS	Delft Hydraulics
3D	MIKE3	DHI
	DelftFLS 3D	Delft Hydraulics

Fonte: VERÓL, 2010.

Dentre os modelos da tabela 2, pode-se evidenciar o HEC-RAS como um dos modelos mais difundidos na prestação de serviços no Brasil, desenvolvidos pelo Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano.

Assim, atualmente é mais comum para a execução de estudos de ruptura de barragem, a simulação a partir de modelos hidrodinâmicos unidimensionais, pois como dito por JUNIOR, J. (2013), constituem os tipos de modelos que apresentam melhor relação facilidade de utilização versus precisão dos resultados e não requerem muito tempo de cálculo. No entanto, segundo VERÓL (2010), este cenário está aos poucos se modificando, devido uma significativa parcela da comunidade científica está passando a utilizar e a investir mais em modelos hidrodinâmicos quasi-bidimensionais e bidimensionais.

2.2.2.2 Definição do modelo a ser utilizado neste trabalho

Para atendimento dos objetivos que se propõe esta dissertação, optou-se, dentre as possibilidades disponíveis, pelo uso do Modelo de Células de Escoamento – MODCEL, desenvolvido na UFRJ por Miguez no ano de 2001. O MODCEL passou a ser utilizado em inúmeros estudos, em âmbito acadêmico e profissional e está em constante desenvolvimento.

Apesar de ter sido muito empregado dentro do contexto de avaliações de cheias em corpos hídricos naturais e urbanizados, o MODCEL teve sua primeira aplicação para os estudos das ondas provenientes da ruptura de barragens em 2010, como trabalho desenvolvido por VERÓL e posteriormente ganhou destaque como o trabalho desenvolvido por JÚNIOR J. em 2013. Desta forma, esta dissertação busca dar continuidade na validação do modelo para o caso de inundações provocadas por

rupturas de barragens, de modo a corroborar cada vez mais o modelo, para aplicação nesses tipos de estudos.

Segundo MIGUEZ, (2001) e MASCARENHAS e MIGUEZ (2002), o modelo é baseado no princípio de que uma bacia pode ser subdividida em um conjunto de compartimentos homogêneos, interligados, chamados de células de escoamento, que se integram no plano da bacia, em um arranjo capaz de reproduzir os padrões de escoamento que ocorrem na mesma. Esse arranjo se dá a partir das interações entre as células, modeladas através de suas ligações, que formam uma rede de fluxo bidimensional com possibilidade de escoamento em várias direções.

Quanto mais discretizado for a etapa topográfica e hidráulica do processo, melhor será a interpretação e a transformação das informações do local a ser estudado em células, e obtendo-se assim um padrão a ser seguido pelo modelo com melhor qualidade. Nesta etapa constam a identificação de áreas alagáveis e das direções principais de escoamento, a definição das características hidráulicas e geométricas das seções de escoamento em trechos de rio, a definição geométrica de áreas homogêneas de armazenamento, e a definição das interações que ocorrem entre os diversos elementos topográficos ou estruturas hidráulicas identificadas (VERÓL, 2010).

Assim, de acordo com VERÓL (2010), para uma melhor caracterização do modelo, faz-se necessário apresentar as hipóteses do MODCEL associadas a ruptura de barragens.

- a) A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. Os rios, seus afluentes, planícies de inundação e bacias de contribuição são subdivididos em células, formando uma rede de escoamento bi-dimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca.
- b) Na célula, a área da superfície livre líquida depende da elevação do nível d'água no interior desta e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma, ou seja:

$$V_i = V(Z_i) \quad (3)$$

$$V_i = A_{si} \times (Z_i - Z_{0i}) \quad (4)$$

Z_{0i} é a cota do fundo da célula;

A_{si} é a área superficial da célula.

- c) O modelo proposto articula as células em loop (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada.
- d) Cada célula comunica-se hidráulicamente com células de sua vizinhança próxima.
- e) Cada célula recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão. Esta hipótese será considerada apenas nos casos em que se desejar simular o cenário de ruptura associado à máxima cheia provável (Probable Maximum Flood - PMF).
- f) Às vazões trocadas com as células vizinhas somam-se as vazões resultantes da transformação da chuva. Da mesma forma que no item anterior, esta hipótese é válida apenas para os cenários em que se considerar o fenômeno de ruptura associada à máxima cheia provável.
- g) O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros livres ou afogados, entre outras várias, sendo neste estudo, considerados os efeitos de inércia no escoamento que ocorre nos cursos d'água principais.
- h) A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células, ou seja:
$$Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$$
- i) As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
- j) Aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula.
- k) As células são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, caracterizando as relações de vizinhança e permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura.

2.3 MODELAÇÃO DE RUPTURA DE BARRAGENS

De acordo com VEROL (2010), a modelagem matemática, conseqüentemente a modelagem da ruptura de uma barragem é uma importante ferramenta de planejamento e apoio à segurança de barragens, uma vez que permite a simulação da ruptura hipotética de uma barragem e a propagação da onda decorrente do acidente. A partir daí, é possível realizar o mapeamento da planície de jusante, indicando as áreas mais suscetíveis ao risco e fornecendo informações, tais como cotas máximas e velocidades máximas em cada ponto, tempo de chegada da onda e o hidrograma de cheia, sendo esses dados fundamentais para a criação de um PAE.

Para um bom desenvolvimento e utilização do modelo, é importante que alguns aspectos sejam compreendidos. Dentre eles, pode-se citar: a modelação da brecha de ruptura, o hidrograma de ruptura, a propagação da onda de cheia, os possíveis tratamentos de onda de choque e o fator de velocidade.

2.3.1 Modelação de brecha

Inicialmente, antes de se determinar o hidrograma de ruptura, é necessário conhecer as características da formação da brecha, esta que é a principal formadora do hidrograma, sendo de suma importância elencar suas características, tais como, a configuração geométrica, tamanho da brecha e tempo de formação. Segundo Chauhan et al. (2004), essas características normalmente dependem da forma da barragem, do tipo da estrutura, da topografia do local do empreendimento, das características da fundação da barragem, das propriedades do material de construção utilizado na obra, da carga hidráulica presente no reservatório e do volume armazenado no momento da ruptura, o que, se tratando de um número considerável de variáveis, dificulta a modelação da brecha.

Assim, segundo FRANCA (2002), a ruptura pode ocorrer de duas formas basicamente, gradual ou quase instantânea, que variam quanto ao período de duração da ruptura e suas conseqüências. Se a ruptura é quase instantânea forma-se uma onda de frente abrupta (shock wave) com propagação para jusante, com velocidades e alturas de água muito superiores ao escoamento de base da linha de

água. A ruptura quase instantânea provoca uma libertação súbita de água do reservatório e o conseqüente abaixamento do nível de água, originando uma onda negativa ou com propagação para montante.

De acordo com WURBS (1987), a ruptura completa e instantânea é mais provável ocorrer para as barragens de concreto em arco, como sendo a hipótese que melhor se aproxima da realidade. Já no caso de barragens de concreto a gravidade, ou em contrafortes, é aceito como mais apropriado uma ruptura instantânea e parcial. Entretanto, para casos de barragens de terra, considera-se mais adequada, a ruptura gradual causada pelo galgamento da barragem ou pela erosão interna do talude (ICOLD, 1995).

De acordo com Almeida e Franco (1994), a formação da brecha tem sido simulada pelos métodos descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Métodos de Simulação de Brecha de Ruptura

MÉTODO	DESCRIÇÃO
Hidrograma de ruptura estimado	É o método mais simples, em que um hidrograma de ruptura é obtido a partir das estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório.
Evolução pré-determinada da brecha	É um método bastante popular para todos os tipos de barragens. Uma brecha de forma pré-determinada cresce de acordo com parâmetros de tempo de formação e dimensões máximas.
Evolução por erosão simplificada	Especialmente utilizado em barragens de terra, este método considera a erosão do material da barragem por alguma expressão de descarga sólida e os aspectos hidráulicos de forma simplificada, em geral por uma equação de vertedor de soleira espessa.
Evolução por erosão completa	Este método combina as equações hidrodinâmicas completas com equações de descarga sólida.

Fonte: Almeida e Franco (1994)

Para ser representativa no modelo, a formação da brecha pode ser incluída por meio de um artifício matemático, ou por meio da consideração dessa informação como

condição de contorno inicial (VERÓL, 2010). Uma estratégia utilizada é a consideração da ruptura como completa e instantânea para o caso de barragens de concreto, desta forma a brecha é obtida pelas próprias dimensões da barragem (MASCARENHAS, 1990).

2.3.2 Hidrograma de ruptura

O hidrograma de ruptura de uma barragem representa a formação da onda de cheia a jusante na ocorrência do evento de rompimento, sendo esta etapa fundamental para elaborar o estudo de propagação a jusante. Segundo JUNIOR, E. (2013), a largura da brecha e o respectivo tempo de ruptura influenciam significativamente nos valores das vazões de pico e nos níveis máximo.

A experiência tem mostrado que os hidrogramas resultantes, associados aos acidentes das obras, excedem em muito a magnitude daqueles relativos às cheias excepcionais com diferentes tempos de recorrência, por mais elevados que sejam os mesmos (VERÓL. 2010).

As características do hidrograma vão depender das dimensões de formação da brecha. No entanto, um hidrograma de ruptura tem como características básicas: a rápida ascensão até um valor elevado de descarga líquida e a subsequente depleção mais lenta até a obtenção de valores reduzidos de descarga. De acordo com o tipo de barragem, tipo de ruptura, características da brecha, dentre outros, essas características podem variar (MASCARENHAS, 1990).

Na tabela a seguir, são apresentadas expressões matemáticas estabelecidas por diversos autores, as quais resultam na vazão de pico defluente da ruptura, se baseando em características da barragem. Os valores obtidos nas equações levam a estimativas das vazões que podem ocorrer e, não a um valor exato. Assim, deve-se escolher a equação que melhor se enquadra nas características do problema em estudo, observando os critérios de segurança que serão adotados.

Tabela 4 - Equações para cálculo de vazões de pico.

Autor	Vazão de Pico	Características
Lou (1981)	$Q_p = 7,683H_d^{1,909} \quad (5)$	Baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa.
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_d V)^{0,48} \quad (6)$	Baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura.
Saint-Venant (-)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g Y_{médio}^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$	Desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
Schoklistch (1917)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_d}{B_b} \right)^{\frac{1}{2}} B_b \sqrt{g Y_{médio}^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$	Considera a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem.
Bureau of Reclamation (1982)	$Q_p = 19H_d^{1,85} \quad (9)$	Baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da ruptura.
Vertedor de Soleira Espessa (Singh, 1996)	$Q_p = 1,7B_b H_b^{\frac{3}{2}} \quad (10)$	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)	$Q_p = 1,7B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{t_p + \left[\frac{1,94A_s}{B_b \sqrt{H_d}} \right]} \right\} \quad (11)$	Considera a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t).

Q_p = descarga máxima defluente da barragem em ruptura (m^3/s)
 H_d = altura da barragem (m)
 V = volume do reservatório para o NA máximo (m^3)
 B_d = largura da barragem (m)
 $Y_{médio}$ = profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m)
 B_b = largura final da brecha (m)
 H_b = altura final da brecha (m)
 A_s = área do reservatório para o NA máximo (m^2)
 t_p = tempo para o desenvolvimento da brecha (s)

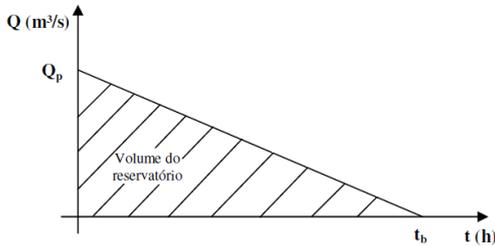
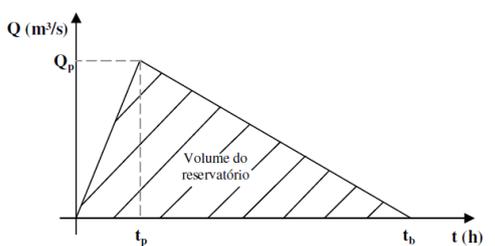
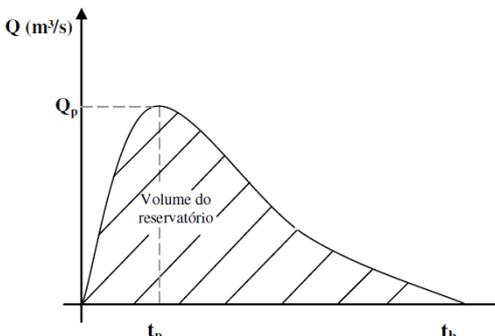
Fonte: Brasil, 2005.

Em seu trabalho, MASCARENHAS (1999) apresenta alguns tipos de hidrograma utilizado para simulação de propagação da onda, hidrograma triangular simplificado no caso de uma ruptura praticamente instantânea na qual a área do

hidrograma iguala o volume de água armazenado no reservatório; hidrograma triangular de ruptura gradual; e o hidrograma com decaimento parabólico, apresentado por Barfield *et al* (1981), é mais condizente com casos em barragens de terra.

No resumo apresentado na tabela 5, deve-se levar em consideração que o tempo de esvaziamento do reservatório é equivalente ao tempo de base do hidrograma.

Tabela 5 - Hidrograma de Ruptura.

<p>Hidrograma Triangular Simplificado Ruptura Instantânea</p>	 $t_b = \frac{2V}{Q_p}, \text{ para } t_p = 0 \quad (12)$
<p>Hidrograma Triangular Simplificado Ruptura Gradual</p>	 $Q(t) = Q_p - Q_p \left(\frac{t - t_p}{t_b - t_p} \right), \text{ para } t_p \neq 0 \quad (13)$
<p>Hidrograma com Decaimento Parabólico</p>	 $Q(t) = Q_p \left[\left(\frac{t}{t_p} \right) e^{\left(1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (14)$

Onde:

Q_p = descarga máxima efluente da barragem em ruptura (m^3/s);

V = volume do reservatório da barragem no momento da ruptura (m^3);

t_p = tempo de pico (s);

t_b = tempo de base (s); e

k = fator de ponderação, varia entre 1,5 e 5,0.

Fonte: MASCARENHAS, 1999.

2.3.3 Propagação da onda de cheia proveniente da ruptura

Os efeitos da cheia em regiões situadas muito a jusante dependem das características definidas para as brechas, contudo fatores como a propagação da onda de cheia, os efeitos dos coeficientes de rugosidade do leito e do armazenamento nos terrenos marginais podem provocar uma atenuação da intensidade da cheia, logo deve-se dar grande atenção para esses fatores (JUNIOR, E., 2013).

No HEC-RAS, por exemplo, para as diferentes estimativas dos parâmetros de brecha, será produzido um hidrograma de saída diferente. No entanto, uma vez que esses hidrogramas são determinados a jusante, tendem a convergir para um resultado em comum. A aproximação desses hidrogramas vai depender da distância que são determinados, da inclinação do córrego, da rugosidade do rio e da planície de inundação e da quantidade de armazenamento de planície de inundação disponível para atenuar o hidrograma. Se as áreas povoadas a jusante da barragem estiverem distantes, os hidrogramas resultantes das diferentes brechas da barragem podem ser de magnitude muito semelhante quando atingirem a área de interesse. No entanto, se as áreas de interesse estão mais próximas da barragem, os hidrogramas de brechas resultantes podem produzir um alcance significativo nos resultados. Nessa situação, a seleção dos parâmetros de brecha é ainda mais crucial (HEC RAS, 2010)

Conforme apresentado no Guia Técnica para *la elaboración de los Planes de Emergencias de Presas*, elaborado pelo Ministério de Meio Ambiente da Espanha em 2001, uma sugestão para definição do limite do estudo à jusante, ou seja, para a limitação do estudo de propagação da onda de ruptura é que estes sejam realizados até o ponto do rio onde os cálculos hidráulicos indiquem que já não existe perigo para as populações e pessoas situadas a jusante.

Deste modo, a seguir são elencadas algumas situações que podem ser adotadas como limite da simulação de ruptura:

- Não existir mais ocupações relevantes à jusante do ponto tais como habitações, serviços ou outros bens econômicos;
- Ao alcançar uma vazão máxima inferior a capacidade do leito fluvial, sem extrapolar significativamente a calha rio no ponto e nem à jusante;
- Foz do rio no mar ou em rio de maior porte com capacidade de absorver a onda de cheia sem extravasar significativamente a calha do rio principal;
- Entrada em outro reservatório capaz de absorver a onda de ruptura sem risco de atingir o NA máximo maximum deste reservatório, sendo essa condicionante válida apenas se a barragem formadora deste reservatório forem enquadradas como A ou B segundo a classificação de risco e dano potencial associado.
- Entrada em outro reservatório que possa produzir cenário de ruptura em cascata das barragens e que a barragem deste outro reservatório seja obrigada a dispor de PAE segundo a Lei Federal nº 12.334/2010.

Em resumo, a modelação matemática da propagação da onda, proveniente da ruptura da barragem, busca conhecer o comportamento do hidrograma efluente da ruptura para as diversas seções a jusante da estrutura, de modo a determinar medidas de proteção e controle para as atividades da região das margens do rio. Em termos matemáticos, isso significa que se deseja determinar os valores de altura de escoamento em uma seção (x) em um tempo (t), e a velocidade do escoamento na mesma seção (x) em um tempo (t), presentes nas equações de Saint-Venant (MASCARENHAS,1990).

2.3.4 Frente de onda de choque

A frente de onda de choque é um fenômeno que ocorre a partir da ruptura de uma barragem, formando uma frente de onda menos ou mais abrupta. De acordo com as condições em que ocorre o fenômeno, a onda pode se tornar cada vez mais

abrupta, rompendo-se e formando um forte ressalto móvel, denominado “onda de choque” (VEROL, 2010).

Esse fenômeno vem sendo estudado há anos e nesse contexto destacam-se como um marco para comunidade científica os estudos realizados por Ritter (1892), que apresentou uma solução analítica para o processo de ruptura instantânea de uma barragem baseadas nas equações de Saint-Venant. E estudos apresentados por Dessler (1952) que ampliou os conceitos de Ritter e elaborou um modelo que considera a resistência do fundo ao escoamento.

Como JUNIOR, J. (2013) comenta, na modelagem de uma onda de cheia proveniente de ruptura de barragem, as equações de Saint-Venant não podem ser aplicadas na região onde ocorre o fenômeno da onda de choque. Segundo Mascarenhas (1990), esse fenômeno é descrito pela variação brusca da vazão e da profundidade do nível de água e fisicamente corresponde à criação de uma região com fortes acelerações verticais, invalidando a hipótese de distribuição hidrostática de pressões. Nesse caso, forma-se uma descontinuidade no escoamento, na qual várias hipóteses para a dedução das equações de Saint-Venant perdem a sua validade. Para modelar essa região do choque podem ser aplicadas as seguintes abordagens:

- Método da pseudo-viscosidade: cria um artifício numérico introduzindo um termo dissipativo para representar a perda de energia provocada pelo choque;
- Método baseado nas soluções fracas das equações de Saint-Venant, que considera o sistema fluido baseado em leis conservativas e utiliza esquemas numéricos do tipo difusivo;
- Método do ajuste do choque (*shock fitting*), onde a onda de choque é tratada a partir da aplicação das equações de Hugoniot-Rankine (CUNGE et al., 1980), as quais representam uma condição de contorno interna que unem os trechos onde são válidas as equações de Saint-Venant.

2.3.5 Fator de velocidade

A variação do nível em uma situação de cheia é facilmente notada, contudo as forças hidrodinâmicas exercidas pelo movimento das águas, não são tão perceptíveis e são capazes de provocar instabilidade e danificar estruturas, conseqüentemente a exposição a essas forças possibilitam uma maior vulnerabilidade ao risco. Desta forma, o Fator de Velocidade (FV), assim como determinado por ZONSEIN (2007), pode ser caracterizado como uma forma de se determinar o potencial de destruição que uma situação de cheia ou de inundação a partir do rompimento de uma barragem podem proporcionar. A partir da interação de duas características, profundidade e velocidade da água, pode-se determinar níveis de risco em função dos prejuízos e danos causados.

Neste contexto, segundo ZONSEIN (2007), muitos pesquisadores desenvolveram estudos buscando determinar esses limites de risco, além de estudos de estabilidade para pessoas e estruturas. Dentre os trabalhos mais relevantes sobre esse tema destacam-se: Black (1975); Reiter (2000); RESCDAM (2000); Kelman (2002); DEFRA/EA (2003). A seguir, a através da equação, é representada o fator de velocidade, e a correlação entre a cota e a velocidade da água.

$$FV = h \times v \quad (15)$$

Onde:

FV: fator de velocidade (m²/s);

h: cota de inundação (m); e

v: velocidade da água (m/s).

O parâmetro velocidade individualmente não permite avaliar a potencialidade de ocorrência de danos, uma vez que é a sua associação com a cota que gera situações de risco. Locais onde se verificam inundações com baixas velocidades, mas grandes profundidades não oferecem perigo considerável de arraste. Por isso, o FV mostra-se conveniente para esta análise. Todos esses autores concordam que o produto (h * v) é o parâmetro chave para avaliar a consequência da propagação da onda em termos dos danos provocados a jusante, seja ela proveniente da ruptura de barragem ou não (ZONSEIN, 2007).

3 ESTUDO DE CASO

A seguir serão apresentadas as principais informações referentes a usina hidrelétrica Paranapanema, utilizada como estudo de caso e a região onde está situada. Esses dados foram cedidos gentilmente pela empresa Enel Green Power a partir de trabalhos desenvolvidos pela contratada Hydros Engenharia, sendo estes os Relatório de Avaliação Hidrológico-Hidráulica e Reavaliação de Segurança de Barragens.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA UHE PARANAPANEMA

A Usina Hidrelétrica Paranapanema, atualmente sob a concessão da Enel Green Power, está localizada no rio Paranapanema, no município de Pirajú, no estado de São Paulo, cujas coordenadas são 23°11'13" S e 49°23'02" W, onde a montante estão as Usinas Pirajú e Jurumirim e a jusante a Usina Hidrelétrica de Chavantes, como pode ser observado na figura 8.

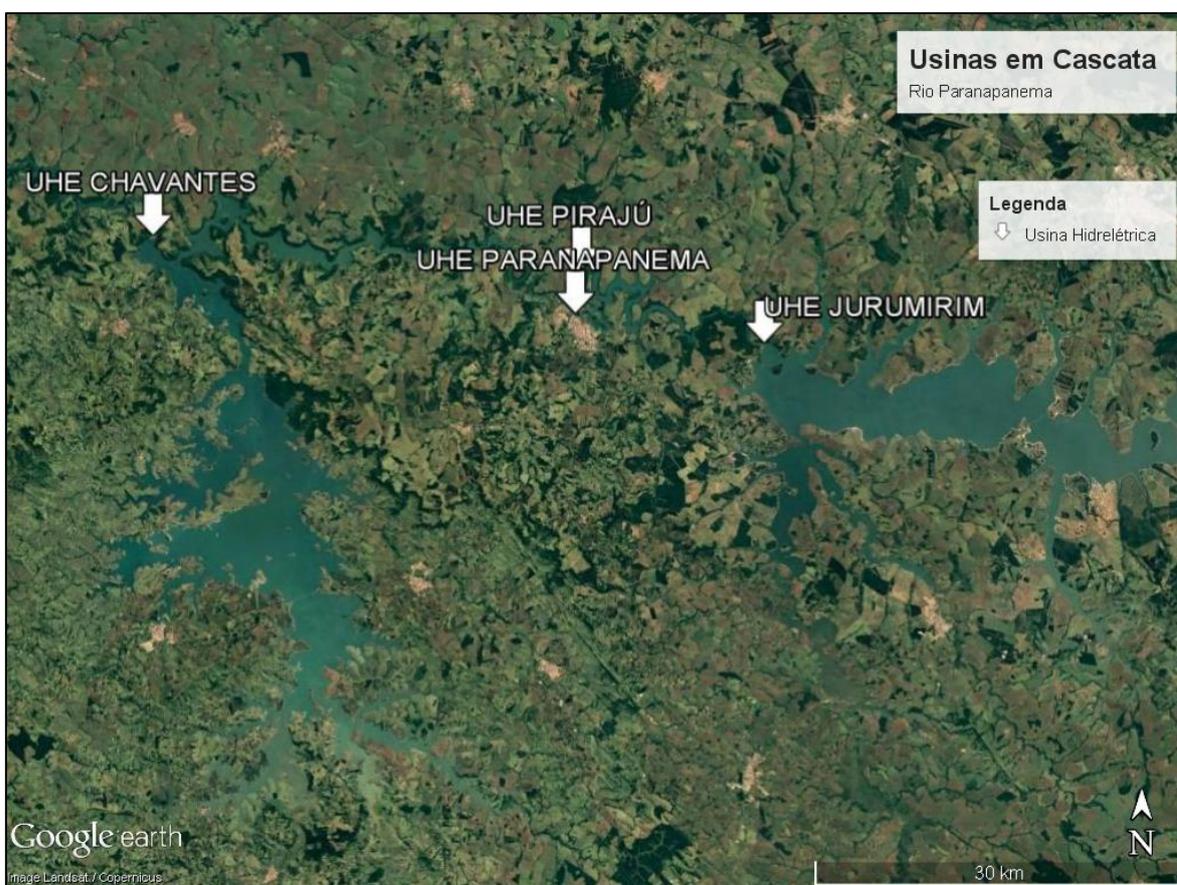


Figura 8 - Disposição das usinas no trecho do rio em estudo.

A UHE teve as obras de sua barragem iniciadas em 1925 e na época era considerada uma usina de grande porte. Sua capacidade instalada foi progressivamente ampliada, inicialmente foi construída uma casa de máquinas da margem direita, com três máquinas de 2,5 MW, posteriormente foi construída uma segunda casa de força na margem esquerda denominada casa de força 2 entrando em operação em 1957, sendo ampliada em 1970, com adição de uma das primeiras escadas para transposição de peixes do Brasil.

Em 1983, a barragem foi galgada e a casa de força 1 foi totalmente destruída sendo reconstruída em 1988 com a capacidade de aproximadamente 10 MW. Em 1998, uma terceira casa de máquinas (Casa de Força 3) foi construída mais a jusante, na margem esquerda, com 13,5 MW de capacidade, totalizando aproximadamente 31,5 MW, como pode ser observado na figura a seguir.



Figura 9 - Configuração da UHE Paranapanema, constituída de três casa de força, escada de peixe, canal de adução na margem esquerda, vertedouro e comportas. (Fonte: Santa Cruz Geração, 2017)

A barragem foi construída em concreto, com contraforte e fundações em rochas basálticas de boa característica geotécnica. Inicialmente o projeto foi elaborado para construção de uma ponte rodoviária, contudo foi adaptado para construção da barragem da UHE Paranapanema, com comprimento de 140 metros e altura em torno de 13 metros. A barragem é constituída de cavaletes metálicos preenchidos com concreto para servir de barramento e de vertedouro. Os pilares da ponte fazem papel de pilares do vertedouro, com 12 vãos controlados por comportas basculantes e 6 vãos livres de soleira delgada com 4,50 m de largura cada.

Adicionalmente há um trecho do canal de adução com crista livre, com cerca de 20 metros de extensão, que foi construído na época da construção da Casa de Força 3. Além dos vertedouros de superfície livre, o sistema extravasor possui ainda quatro descarregadores de fundo, controlados por comportas planas medindo 1,25 m de largura por 2,85 m de altura.

As vazões máximas de projeto são, conforme estudos existentes de aproximadamente 2.800 m³/s, com recorrência de 10.000 anos, essa vazão foi definida principalmente por influência do controle de cheias realizado pela usina hidrelétrica a montante, UHE Jurumirim. Além disso, é importante destacar os níveis de referência em que a barragem é operada, nível máximo maximum 506,70 m.s.n.m, nível máximo normal 505,50 m.s.n.m e nível mínimo normal 504,77 m.s.n.m.

Para vazões inferiores a 230 m³/s, todas as comportas de superfície permanecem fechadas, pois é necessário a manutenção do nível em 504,77 m.s.n.m para manutenção de uma pequena lamina d'água no vertedouro de superfície para fins cênicos e um mínimo de volume d'água para a manutenção da escada de peixes, atendendo a requisitos ambientais. As comportas são mantidas fechadas até atingir o nível 505,50 m.s.n.m, acima desse nível inicia-se a manobra para abertura das comportas.

De acordo com as informações fornecidas, o reservatório no nível máximo normal possui 2.988,16 m³ e apesar de sua capacidade total do reservatório não ser maior ou igual a 3.000.000 m³ e seu maciço não ser maior ou igual a 15 metros de altura, a usina Paranapanema possui dano potencial alto, como a existência do potencial de perdas de vidas humanas em áreas a jusante, impacto ambiental significativo e alto impacto socioeconômico. Logo, com elaboração de auto avaliação realizada internamente pelo detentor da concessão da usina, está encontra-se

enquadrada de modo preliminar na Resolução Normativa nº 696/2015 e classificada pela normativa da ANEEL como classe B, sendo obrigatória a elaboração do Plano de Segurança de Barragens da UHE Paranapanema.

3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA BACIA E DA ÁREA DE ESTUDOS

A seguir será apresentado um breve resumo elaborado pela empresa Hydros sobre os estudos de longa data desenvolvidos no rio Paranapanema.

Sabe-se, que em 1886 a Comissão Geográfica e Geológica da Província de São Paulo analisou as condições de navegabilidade e, vias de comunicação, uso e ocupação do solo, atividades comerciais e ocupação populacional envolvendo a bacia do rio Paranapanema desde sua foz até a barra do rio Itapetininga. Trabalhos relacionados às possibilidades de exploração hidrelétrica foram desenvolvidos pelo Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, nos anos de 1927 e 1928, visando caracterizar os desníveis mais significativos e as peculiaridades do regime fluvial, tendo em vista o levantamento da potencialidade hidráulica.

Após a implantação da usina Paranapanema, que ocorreu em 1936, a efetiva exploração sistemática desse potencial teve início com o aproveitamento de Salto Grande (UHE Lucas Nogueira Garcez), que entrou em operação em 1958. Na ocasião, os estudos então desenvolvidos já evidenciavam as possibilidades de aproveitamento hidrelétrico no trecho entre Salto Grande e a foz do rio Taquari. Pouco a jusante desse local iria situar-se a UHE Jurumirim (Armando A. Laydner), completada em 1962, que se destaca por propiciar significativa regularização das descargas afluentes, devido seu grande reservatório e sua capacidade de deplecionamento do reservatório para espera de cheias. Cabe mencionar que o citado trecho, com cerca de 140 km e com desnível da ordem de 200 m, foi estudado objetivando a implantação de usinas hidrelétricas, o que resultou na identificação de três sítios em sequência Piraju, Itararé (Chavantes) e Ourinhos.

Em junho de 1961, a USELPA – Usinas Elétricas do Paranapanema S.A. consolidou os estudos da UHE Piraju, situando-a no sítio anteriormente cogitado e

mantendo o mesmo arranjo geral. Em 1965, a Canambra estabeleceu o esquema de partição de queda do rio Paranapanema, e, em 1966, mediante apresentou o estudo de viabilidade da UHE Piraju, com 120 MW instalados. Posteriormente, a partição de queda proposta pela Canambra sofreu ligeiras modificações, como a alteração do N.A. máximo normal da UHE Capivara e a subdivisão da UHE Canoas. Seguiu-se a implantação das UHEs Chavantes, em 1970 e Capivara, em 1976.

A UHE Paranapanema faz parte da bacia hidrográfica do rio Paraná, de acordo com a ANA e Itaipu Binacional, esta bacia é caracterizada por uma área de 820.000 km² até a confluência com o Rio Iguaçu e inclui a região mais industrializada e urbanizada do Brasil. É a bacia hidrográfica com a maior capacidade instalada de energia elétrica do país e também a de maior demanda. Na bacia existem 57 grandes reservatórios e seus principais afluentes são os rios Grande, Paranaíba, Tietê, Paranapanema e Iguaçu.

A seguir é apresentada a tabela 6 com os aproveitamentos hidrelétricos que compõem o rio Paranapanema.

Tabela 6 - Usinas Hidrelétricas do rio Paranapanema.

Barragem	Capacidade de produção	Área do reservatório
Usina Hidrelétrica de Jurumirim	98 MW	449 km ²
Usina Hidrelétrica Piraju	80 MW	12,75 km ²
Usina Hidrelétrica Paranapanema	31 MW	1,5 km ²
Usina Hidrelétrica de Chavantes	414 MW	400 km ²
Usina Hidrelétrica de Ourinhos	33 MW	4,33 km ²
Usina Hidrelétrica de Salto Grande	74 MW	12 km ²
Usina Hidrelétrica de Canoas II	72 MW	22,5 km ²
Usina Hidrelétrica de Canoas I	81 MW	30,85 km ²
Usina Hidrelétrica de Capivara	619 MW	576 km ²
Usina Hidrelétrica de Taquaruçu	526 MW	80,1 km ²
Usina Hidrelétrica de Rosana	353 MW	220 km ²

(Fonte: adaptado Duke Energy Brasil).

O reservatório da UHE Paranapanema abrange áreas urbanas e rurais do município de Pirajú. Localiza-se em ponto central da cidade contando com calçadas em toda a sua extensão urbanizada. O volume útil do reservatório foi conferido com as informações recebidas das seções topobatimétricas, e novo valor de reservatório foi estimado e utilizado como referência no presente trabalho, o volume do

reservatório resultou em aproximadamente 9 milhões de m³ e área inundada de 1,494 km².

As áreas do vale do rio Paranapanema localizadas a jusante do barramento apresentam moradias e estruturas urbanas, com presença de casas e área de lazer a nascente de Pirajú, além disso, em quilômetros mais a jusante, já um trecho considerado como sendo mais rural, há moradias mas de modo geral situadas em regiões mais elevadas.

O trecho imediatamente a jusante da UHE Paranapanema apresenta uma sequência de corredeiras nas quais é comum a prática de “rafting”, com presença de uma edificação/estrutura situada numa praça da margem esquerda do rio, com finalidade de apoio a este esporte e para passeios de “boia cross” e prática de “rafting”.

No trecho de maior declividade da corredeira há um estrangulamento hidráulico do rio, situado a cerca de 700 metros da barragem, denominada corredeira do Inferno, que pode favorecer a ocorrência de inundações a montante. Um aspecto relevante é a existência de uma ponte na rodovia SP - 303 – Rodovia Francisco Viana, cerca de 22 km a jusante do aproveitamento, que se situa no trecho nitidamente remansado do reservatório da UHE Chavantes.

Atualmente a área urbana da cidade de Piraju ocupa as duas margens do rio Paranapanema, onde a porção principal ocupa a margem esquerda e a outra porção a margem oposta. A travessia existente do rio, ou seja, a ligação das duas porções da cidade, só é possível por meio da estrutura metálica acima da crista, que sustenta uma ponte rodoviária que serve de escoamento do tráfego urbano entre ambas as margens do rio. A ponte é estreita e está posicionada em cota baixa, interferindo nas questões operacionais do barramento, em especial na operação das comportas basculantes do vertedouro e em eventos de cheias maiores, a travessia pode até ficar interdita.

A posição geográfica da bacia encontra sujeita a dois regimes climáticos, o da região sul, com menor influência, onde as chuvas se distribuem praticamente ao longo de todo o ano e a irregularidade interanual é muito acentuada e, o da região sudeste, que predomina na bacia, onde a sazonalidade das chuvas é marcante, com um período de estiagem bem definido. Resulta daí um regime com menores precipitações no semestre de abril a setembro, mas que, com razoável frequência, fica sob o domínio da circulação atmosférica típica da região sul e, conseqüentemente, sujeita

às chuvas intensas desse período. Resumidamente, no que diz respeito à produção de vazões elevadas observa-se que não obstante as ocorrências mais frequentes sejam no período de outubro a março, elas podem acontecer em qualquer época do ano.

As enchentes observadas nos anos de 1935, 1954, 1956, 1957, 1976, 1983, 1987, 1989, 2012, 2013 e 2014, resultantes de chuvas intensas no semestre abril a setembro, ilustram esse comportamento. Em outros termos, nos últimos 84 anos, período da série oficial consistida, constata-se que cerca de 14% das cheias ocorreram no citado semestre. Além disso, o mês de junho destaca-se por deter a ocorrência de 8% das cheias anuais, incluindo a de 1983. Este ano foi um pouco diferenciado, pois tiveram chuvas no final de maio e início de junho, sobre a bacia até a seção de Jurumirim, atingindo totais de cerca de 170 mm em três dias, e da ordem de 470 mm em 16 dias seguintes. Os registrados nesses anos subsequentes, acrescentado de 2016, onde evidenciou-se vazões altas, comprovam a recorrência de eventos fluviométricos significativos.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia apresentada a seguir permitiu estabelecer as etapas de aplicação do modelo, assim como representar o fenômeno da ruptura da barragem da usina de Paranapanema, os efeitos causados na cidade onde a usina está situada e nas áreas a jusante da barragem. As informações de levantamento realizado em campo foram inseridas no modelo e permitiram um melhor detalhamento do efeito da ruptura em toda planície associada a calha do rio.

Justifica-se a aplicação da metodologia aqui apresentada visto outros estudos já desenvolvidos na área, como o trabalho feito por Verol (2010), que dividiu seu trabalho em três momentos, um primeiro em que usa de um modelo físico de laboratório para validar o MODCEL como modelo capaz de representar o fenômeno de propagação de onda de ruptura. Um segundo momento em que usa como estudo de caso a UHE Funil, simulando a ruptura hipotética da barragem com o MODCEL de forma comparativa com o trabalho realizado por Mascarenhas (1990) que usa o modelo PROPAG para o mesmo estudo de caso.

Em um terceiro momento Verol (2010), considerando que o MODCEL representa bem o fenômeno de ruptura, é feita uma modelação da barragem já modelada, Funil, no entanto enfatiza o fato do MODCEL ser um modelo quasi-2D para se obter efeitos do transbordamento da calha do rio para as planícies.

Desta forma, Verol faz uso de informações da topografia local, inseridas como dados de entrada, para se observar a representação do modelo não só na calha do rio confinado, mas também nas planícies associada a calha do rio. Segundo Verol, os resultados obtidos por meio do MODCEL se mostraram com boa correlação com o modelo comparado no estudo de Mascarenhas (faz uso do PROPAG), além de ter se mostrado uma ferramenta capaz de simular a ruptura de barragem adequadamente, com a vantagem de ser um modelo que considera a planície de extravasamento e não exige recursos de computação muito avançados.

Outro caso similar e baseado no desenvolvido por Veról (2010) foi o estudo desenvolvido por Junior, J. (2013), que aumentou e refinou a base de dados utilizadas por Veról, fazendo tanto uso do MODCEL, quanto uso do modelo HEC-RAS, que é um modelo de significativa aplicabilidade na área ruptura de barragens. Desta forma,

pode-se perceber que a metodologia proposta pelo trabalho do Junior se baseia e se equivale ao desenvolvido e aplicado por Veról.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos por ambos modelos, Junior (2013) concluiu que existe uma razoável diferença entre os resultados dos modelos, mas esse fato é observado devido o MODCEL resultar em certo amortecimento dos dados, diferenciando assim os valores de vazão, nível e tempo de chegada da onda, entre os dois modelos estudado, no entanto este fato ocorre em trechos onde o escoamento se desloca por planícies mais vastas. Já em trechos onde o vale é mais encaixado, os resultados do MODCEL e HEC-RAS se aproximam muito.

Sendo assim, baseando em ambos os estudos citados acima que foram desenvolvidos com o MODCEL para ruptura de barragens, e após a definição do local onde será feito o estudo de caso, temos a seguir, de forma resumida e em etapas, a metodologia adotada para o presente trabalho:

- a) Primeira etapa: Definição do cenário a ser estudado, definindo em que condições ocorrerá o rompimento.
- b) Segunda etapa: Coleta de dados e informações necessárias para realização da modelação matemática, informações como levantamentos de campo, com dados de topobatimetria, registro de vazões e níveis em pontos de referência.
- c) Terceira etapa: Construção dos arquivos de entrada do Modcel, e para isto inicialmente se analisa as informações de campo obtidas na etapa anterior, verificando o comportamento do escoamento na topografia da área de estudo. Em seguida, faz-se a delimitação da área a ser estudada, posteriormente a área é dividida em células, o qual são caracterizadas por tipo de células e tipo de escoamento. Assim, com base nessas informações é possível construir os dados de entrada.
- d) Quarta etapa: Após entendimento de como será verificada a frente de onda de choque, o fator de velocidade, e a elaboração de mapas de inundação, iniciou-se a etapa de calibração. Esta é uma etapa muito importante, pois é onde ocorre o ajuste do modelo que está sendo criado com as condições reais da área de estudo. Definiu-se um período de dados medidos como

referência e o modelo é ajustado em função desses dados. Nova calibração é feita, já com os dados do cenário a ser simulado, para melhor caracterização do momento da ruptura, nova calibração é feita para ajustar o ponto de aproximação na célula logo a jusante da barragem com testes do coeficiente de Manning para obtenção da rugosidade que melhor representaria o momento da ruptura.

- e) Última etapa: Realização da simulação desejada já com todos os parâmetros ajustados na tentativa de aproximar ao máximo a um cenário real, com toda limitação e a capacidade de representação do modelo utilizado.

Após a finalização da modelação, foram analisados o fator de velocidade nas células e gerados os mapas de inundação dos trechos, estes são ferramentas básicas para tomada de decisão tanto para o plano de ação emergencial, quanto para o zoneamento do risco.

4.1 CENÁRIO SIMULADO

No presente estudo foi considerado cenário de ruptura correspondente à ruptura por galgamento da barragem ou também conhecido por *overtopping*, considerando ocorrência de onda de cheia de projeto com período de retorno de 10.000 anos e $Q_{10.000} = 2.800 \text{ m}^3/\text{s}$, além disso levou-se em consideração a inoperância das comportas do vertedouro, o que reduz a capacidade de vazão pelas estruturas. Neste cenário a vazões foi considerada constante, foi adotado a ruptura instantânea da barragem, com formação de brecha proporcional a dimensão da barragem, visto que é considerado o tombamento da estrutura completa. O dado de vazão foi obtido por meio dos estudos de Avaliação Hidrológica e Hidráulica da empresa Hydros Engenharia. De forma resumida tem-se:

- **Cenário** - Ruptura por galgamento para a cheia de projeto com período de retorno $Q_{10.000} = 2.800 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as comportas inoperantes.

4.2 MODCEL

4.2.1 Divisão de células

A divisão das células para compor o modelo, passa pela interpretação do caminho percorrido pelo escoamento superficial, observando-se as características topográficas. Desta forma, neste primeiro momento é realizada a coleta de dados e informações necessárias para a realização da modelação matemática. Destacam-se os dados e as informações obtidas através dos levantamentos topobatimétricos e do modelo digital de terreno, realizados por trabalhos em campo e sobrevoo da região em estudo, como pode-se observar na figura 10. Os dados topobatimétricos (escala 1:1.000) utilizados no presente trabalho foram cedidos pela concessionária responsável pela usina hidrelétrica, a Enel Green Power, e foi desenvolvido pela subcontratada Topocart. Além disso, a empresa responsável pela concessão da usina de jusante, UHE Chavantes, também cedeu informações batimétricas do reservatório, sendo assim possível verificar seções mais a jusante da UHE Paranapanema.

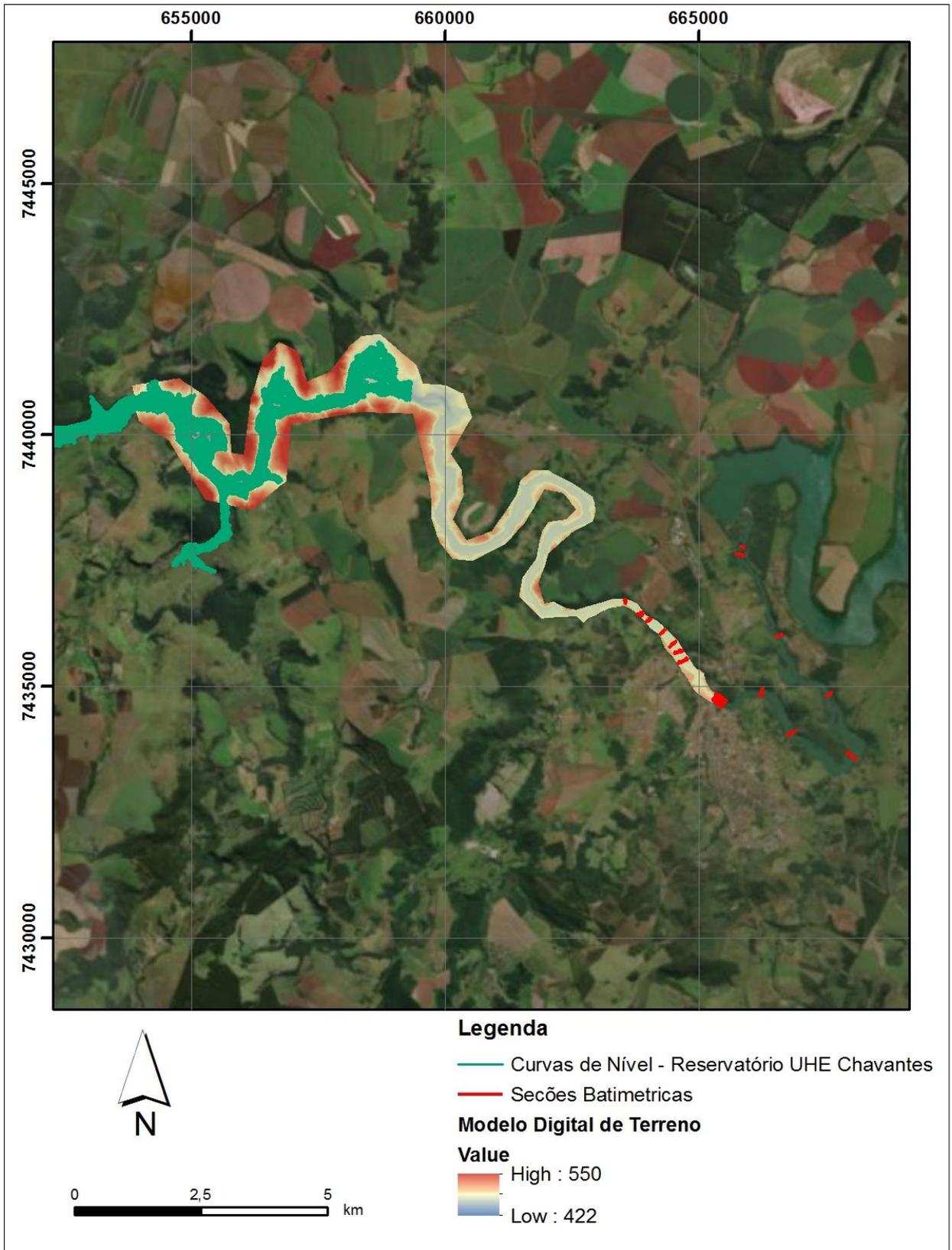


Figura 10 – Modelo Digital de Terreno e levantamento topobatimétricos partir de dados cedidos pelas Enel Green Power.

Com os dados adquiridos foi possível obter a área de interesse por meio da delimitação da bacia de forma detalhada. Iniciou-se pela definição do formato das células por meio das curvas de nível, dos modelos digitais de terreno e da imagem de satélite da região. Para tornar a área de interesse mais robusta em informações, foram acopladas informações dos modelos digitais de terreno, obtidas pelo INPE, aos dados iniciais. Nesta etapa, pode-se destacar o uso das ferramentas como o AutoCad e o ArcGis.

O modelo utiliza-se de diferentes tipos de células e diferentes tipos de ligações. A seguir, destacam-se somente os tipos que serão aplicados para o presente trabalho, se enquadrando para o caso de ruptura de barragem. É importante comentar que apesar de ser normalmente utilizado a letra “C” para caracterizar ligações do tipo Canal, no presente trabalho foi determinada como melhor opção caracterizar a ligação destas células como “P”, devido às restrições observadas no modelo.

Tabela 7 - Tipos de Células e Ligações (adaptação Manual MODCEL, 2018)

	Tipos	Descrições
Célula	Rio ou Canal	Tipo 0 - escoamento principal da drenagem se desenvolve a céu aberto.
	Planície urbana	Tipo 2 - escoamento a superfície livre através das ruas que compõem a paisagem urbana, bem como para a representação de áreas de armazenamento.
	Reservatório	Tipo 3 - Simula o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento.
	Planície	Tipo 4 - Célula criada para representar os locais onde o escoamento, à superfície livre, se desenvolve em planícies alagáveis.
	Encosta	Tipo 4 - São áreas elevadas, em termos de cotas topográficas, que têm a finalidade de conduzir água das chuvas para dentro do modelo. Ao se definir o uso destas células, em função da própria cota da encosta, usualmente o escoamento ocorre em um único sentido, ou seja, afluindo ao modelo. Este tipo de célula é normalmente definido nas bordas da bacia em estudo e não considera a existência do padrão de urbanização utilizado na célula tipo 2.
Ligação	Canal	Para escoamento à superfície livre com termos de inércia, representada pela letra “P”;

	Tipos	Descrições
	Planície	Para escoamento à superfície livre sem termos de inércia, representada pela letra “ P ”;
	Vertedouro	Clássico, livre ou afogado, representada pela letra “ V ”;
	Reservatório	(Orifício + vertedouro), representada pela letra “ R ”;

Fonte: Manual do MODCEL (2010)

A representação dos rios e canais principais pode ser feita pela composição com as células de canal, margeadas por células de planície com função de vertedouro, que recebem o extravasamento do rio na cheia, sendo estas células, por sua vez, ladeadas por células de alagamento, para onde fluem as águas que saíram dos rios, podendo, a partir daí, seguir seu próprio caminho através destas células de planície. A própria calha pode, por exemplo, ser dividida em calha principal e secundária, com células justapostas (VERÓL, 2010).

A montante do barramento da UHE Paranapanema, as células foram divididas até o barramento da usina de Pirajú, respeitando as seções batimétricas levantadas na calha do rio, observando as planícies adjacentes. A divisão deu sequência por toda a calha a jusante da UHE Paranapanema, até o reservatório da UHE Chavantes, sempre considerando toda microbacia que contribui para os trechos do rio em estudo, respeitando a variação das curvas de nível, dando preferência para trechos curtos, variando em torno de 10 metros ou 20 metros de distância quando mais próximos a calha do rio.

A região de estudo ficou dividida em 528 células, sendo das quais 27 representam a região do reservatório da barragem de Chavantes e sua região de remanso, 11 representam a região do reservatório da barragem de Paranapanema, 22 são referentes às células da calha do rio, 39 correspondem às células de planície urbanizadas e 429 correspondem às demais células tanto de planície quanto de encosta. A divisão das células pode ser vista na Figura 11 e em mais detalhes na Figura 12, com destaque em amarelo para localização da barragem em estudo.

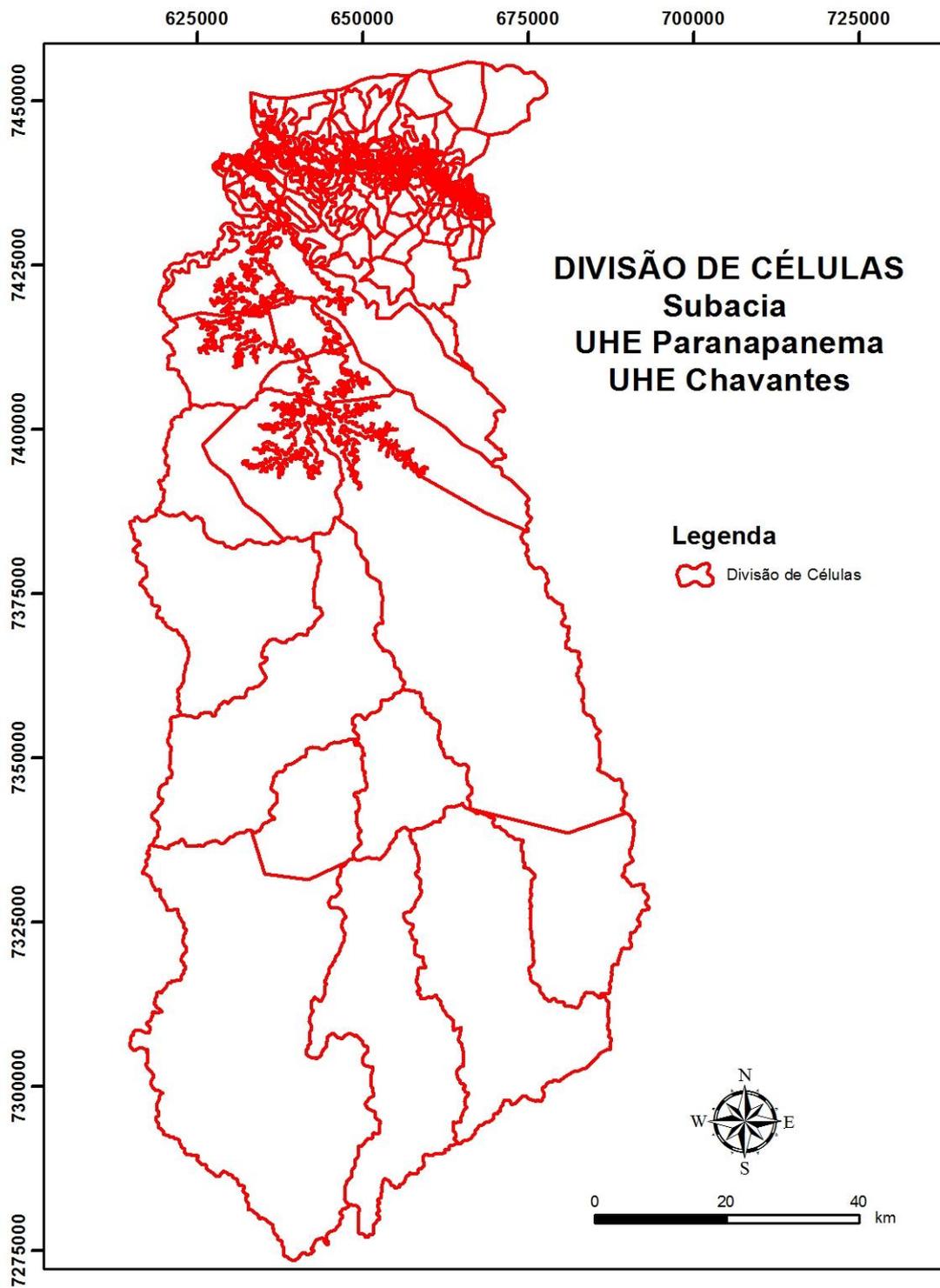


Figura 11 – Divisão de células da bacia de interesse

DIVISÃO DE CÉLULAS

Montante e Jusante Barramento UHE Paranapanema



Legenda

-  Divisão de Células
-  Barragem

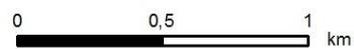


Figura 12 – Detalhe da Divisão de células da área de interesse (jusante e montante do barramento UHE Paranapanema)

De modo a tornar mais didático para análise e conclusões, na tabela 8 e na figura 13 estão representados toda a área do estudo, que está segmentada por

trechos, variando em blocos de células. De toda bacia delimitada, optou-se por destacar as células próximas a calha do rio, pois são as células mais relevantes, onde poderá se observar maior efeito da inundação após ruptura.

Tabela 8 - Tabela de referência Trechos versus Células da área de estudo.

Trechos	Células Equivalentes	Descrição
Trecho 1	6100 até 6070	Células do Reservatório (montante para jusante)
Trecho 2	6060 até 6000	Células do Reservatório
Trecho 3	100 até 1100	Células Jusante da Barragem
Trecho 4	1200 até 2000	Células Jusante da Barragem
Trecho 5	2100 até 2500	Células Jusante da Barragem
Trecho 6	2600 até 6120	Células Jusante da Barragem até o reservatório da UHE Chavantes

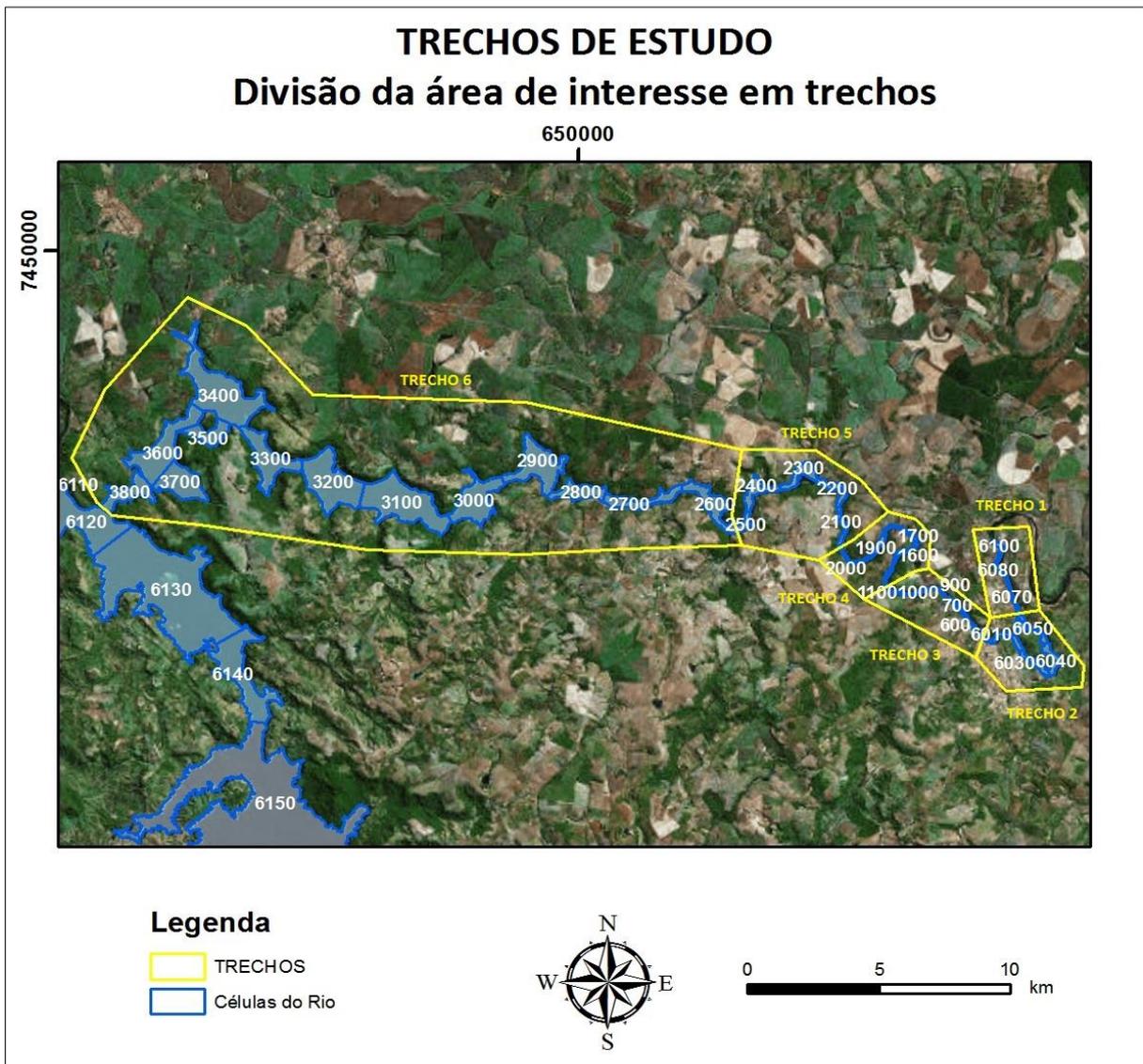


Figura 13 – Área de estudo segmentada em trechos para melhor análise dos resultados.

4.2.2 Topologia do escoamento

Após a divisão de células, foi elaborado um esquema topológico que integra a rede de células, o qual mostra como ocorre o escoamento, por meio das interações com as células vizinhas, assim como as condições de contorno necessárias.

De modo a organizar topologicamente as células, a seguir serão descritas a forma que as células serão nomeadas. Esta definição foi adaptada da forma adotada por JUNIOR, J. (2013).

As células do trecho de interesse foram numeradas de 100 em 100 para facilitar a identificação, variando de 100 a 3800 no canal, de montante para jusante na área de estudo, sendo que cada trecho de canal possui suas células de planícies ou de encostas correspondentes, que contribuem para aquele trecho. Desta forma as células da margem direita foram classificadas como as células de números pares e as células da margem esquerda com numerações ímpares. Assim, como exemplo tem o trecho do rio canal 100, onde a célula de planície da margem esquerda tem numeração 101, e da margem direita possui numeração 102, a numeração dá sequência até completar a numeração das células daquela área contribuinte, não havendo, desta forma duplicidade das identificações das células.

Para todas as células que compõem as áreas dos reservatórios (tanto o reservatório da UHE Chavantes, quanto o reservatório da UHE Pirajú), sejam elas células de canal, planícies e encostas, foram adotadas uma numeração específica, identificadas pela numeração na ordem de 6000. Foi iniciada sua numeração pelo próprio número 6000 até 6210, porém de jusante para montante iniciando no barramento da UHE Pirajú, e variado de 10 em 10, sendo adotada a mesma metodologia anterior quanto as margens direita e esquerda.

O fato de serem identificadas de 10 em 10, acarretará uma limitação quanto a quantidade de células de planície e encosta correspondentes a determinado trecho do reservatório, pois quando se tem mais de 10 células se atinge a identificação do próximo trecho do rio. Desta forma, para esses casos foi adotada a seguinte metodologia ao finalizar a contagem daquela margem, a última numeração é repetida e acrescentando um novo número ímpar ou par, de acordo com a margem em questão. Como exemplo tem-se o trecho do rio 6030, sua margem esquerda 6031 e a margem direita 6032, dando continuidade as planícies correspondentes a aquele

trecho de reservatório, preenche-se as células até o **6039**, contudo havendo ainda mais células, inicia-se o acréscimo de um número ímpar neste último, **6039₁**, na próxima **6039₃**.

A célula 01, localizada a jusante de toda área de estudo, representa a célula dita como exultório artificial, onde devido suas características de cota, é como se toda a água do modelo que chega nesta célula fosse absorvida, sem ocorrência de um possível remanso para montante.

Devem ser levados em consideração que as células de determinado grupo só entram em comunicação com:

- As do seu próprio grupo (grupo central);
- Com as células do grupo posterior, ou superior, (localizado na linha imediatamente acima na topologia)
- E com as células do grupo anterior, ou inferior (localizado na linha imediatamente inferior na topologia).

4.2.3 Arquivo de entrada modelo MODCEL

Após a divisão, cada célula será caracterizada por diversos parâmetros, tais como, código de identificação da célula, tipo da célula, área, área de armazenamento, cota de fundo, nível de água, coeficiente de escoamento superficial (Run Off), tipo de ligação que ocorre com as células vizinhas, área geométrica da ligação, coeficiente de ligação (coeficiente de Manning), essas informações constituem o arquivo de base de dados.

Além do preenchimento desses parâmetros e elaboração da base dados, há construção dos dados de entrada como o arquivo de chuva, as condições iniciais com definição dos intervalos de tempo do modelo, e as condições de contorno. Com todas as informações das células no instante inicial da modelação, é possível iniciar a etapa de calibração do modelo, posteriormente a verificação e enfim a modelação do cenário a serem estudado.

Nesta etapa de calibração, foi utilizado um posto fluviométrico, um para a calibração, localizado a jusante da UHE Paranapanema, e identificado por Estação UHE Chavantes Pirajú Jusante (64220050).

Quanto ao coeficiente de escoamento, baseado na relação de declividade das áreas formadas pelas células e do uso do solo, foram inicialmente estimados e adaptados com referência das planilhas da apostila de hidrologia da UFRRJ e da planilha do DNIT. Já o coeficiente de Manning foi estimado e adaptado baseado nas relações estabelecidas por CHOW (1959), e pela planilha do DNIT, variando de acordo com as características da célula em estudo. Ambos os coeficientes estavam passíveis de ajustes mediante verificação da necessidade durante a etapa de calibração.

4.2.4 Frente de onda de choque

Dentre os métodos para o tratamento do problema associado à frente da onda de choque, apresentados em 2.3.4, percebe-se que o MODCEL, ao utilizar as equações de Saint-Venant na sua forma conservativa, tem a seu favor o benefício das ditas soluções fracas destas equações, que permitem representar o fenômeno da ruptura de uma barragem.

De acordo com VEROL (2013), o ajuste de choque não é aplicável no caso de uma simulação de ruptura de barragem utilizando o MODCEL porque a modelação presente no MODCEL não foi formulada para este fim. O método da pseudo-viscosidade, por sua vez, pode também ser utilizado, adicionalmente, de forma adaptada.

Sendo assim, foi aplicado o método da pseudo-viscosidade, onde deve ser empregada uma dissipação artificial para as zonas em que ocorre a descontinuidade. Mascarenhas (1990) propõe trabalhar com um aumento na rugosidade de Manning, como forma equivalente de introduzir o efeito da pseudo-viscosidade. Em geral, são disponíveis curvas do coeficiente de rugosidade em função da profundidade para várias seções do trecho. Em caso da não disponibilidade de tais curvas, Mascarenhas (1990) sugere que, a partir da estimativa da velocidade média de propagação da frente de onda se faça variar abruptamente, por meio de tentativas, o valor do coeficiente de rugosidade em cada seção (usando, por exemplo, o seu valor extremo) quando da chegada estimada da frente de onda à mesma. Este artifício, em termos numéricos,

induz uma parcela dissipativa adicional, que é o que torna o processo equivalente ao artifício da pseudo-viscosidade.

Assim, o coeficiente de Manning foi majorado no trecho logo a jusante da ruptura, onde o perfil de linha d'água na saída do reservatório ficasse parecido com o proposto por Ritter e Dressler, ou seja, onde o ponto de articulação, no local em que ocorre a ruptura da barragem, tem altura de escoamento $h(0,t)$ constante e igual a $(4/9)h_0$, onde h_0 corresponde a altura inicial de água no reservatório junto à barragem, caracterizando um regime crítico (SOUSA apud MASCARENHAS, 1990 e VEROL, 2010). Para o cenário estudado o Manning adotado também variou de 0,05 até o melhor valor a ser atingido, no caso 0,22. Esses valores de coeficiente de Manning foram calibrados para que o perfil gerado pelo modelo respeitasse os critérios estabelecidos pela metodologia da pseudo-viscosidade.

4.2.5 Fator de velocidade

Baseando-se no estudo desenvolvido por ZONSEIN (2007), no presente trabalho foi utilizada a relação entre a cota de inundação e a velocidade da água para determinar o fator de velocidade e analisar a capacidade de arraste.

Para determinar o FV foram identificadas as células com maior vulnerabilidade de ocorrência de inundações na condição do rompimento da barragem da UHE Paranapanema. Logo, a partir dessas informações, as células selecionadas foram analisadas baseando-se na relação definida nos estudos desenvolvidos por REITER (2000) apud DEFRA/AE (2003), que determinam limites de potencial de danos a pessoas, carros e casas para diversos fatores de velocidade.

A tabela com a relação FV e efeitos pode ser observada a seguir.

Tabela 9 - Relação Fator de Velocidade e Efeitos (Fonte: REITER, 2000 apud ZONSEIN, 2007).

FV (m ² /s)	EFEITO
< 0,1	Baixo potencial de danos a crianças.
0,25	Alto potencial de danos a crianças.
0,7	Alto potencial de danos a adultos.
1,5	Alto potencial de danos a veículos (e seus ocupantes).
2,5	Alto potencial de danos a construções leves (barracos).
>7	Alto potencial de danos a construções pesadas (alvenaria)

Para posterior análise das respostas de vulnerabilidade, assim como do fator de velocidade, células que representariam maior importância do ponto de vista populacional, na ocorrência de um evento crítico de ruptura de barragens formam identificadas, sendo evidenciadas na tabela a seguir as células mais vulneráveis por apresentarem risco a vida humana. De forma ilustrativa, segue tabela 10 e figura 14 com indicação das células selecionadas para estudo de vulnerabilidade e seus respectivos trechos.

Tabela 10 - Células Potencialmente Vulneráveis

Caracterização/ Localização	Células Vulneráveis Observadas
Próximo ao reservatório de Paranapanema	6001, 6012 e 6072
Área da Usina Paranapanema	101, parcialmente 301 e 303
Cidade de Pirajú	103, 104, 202, 301, 303, 401.
Jusante da Cidade de Pirajú	703, 1702, 1802, 1804, 2202, 2302, 2402, 2602 e 2702.
Outros pontos	3602 e 3803

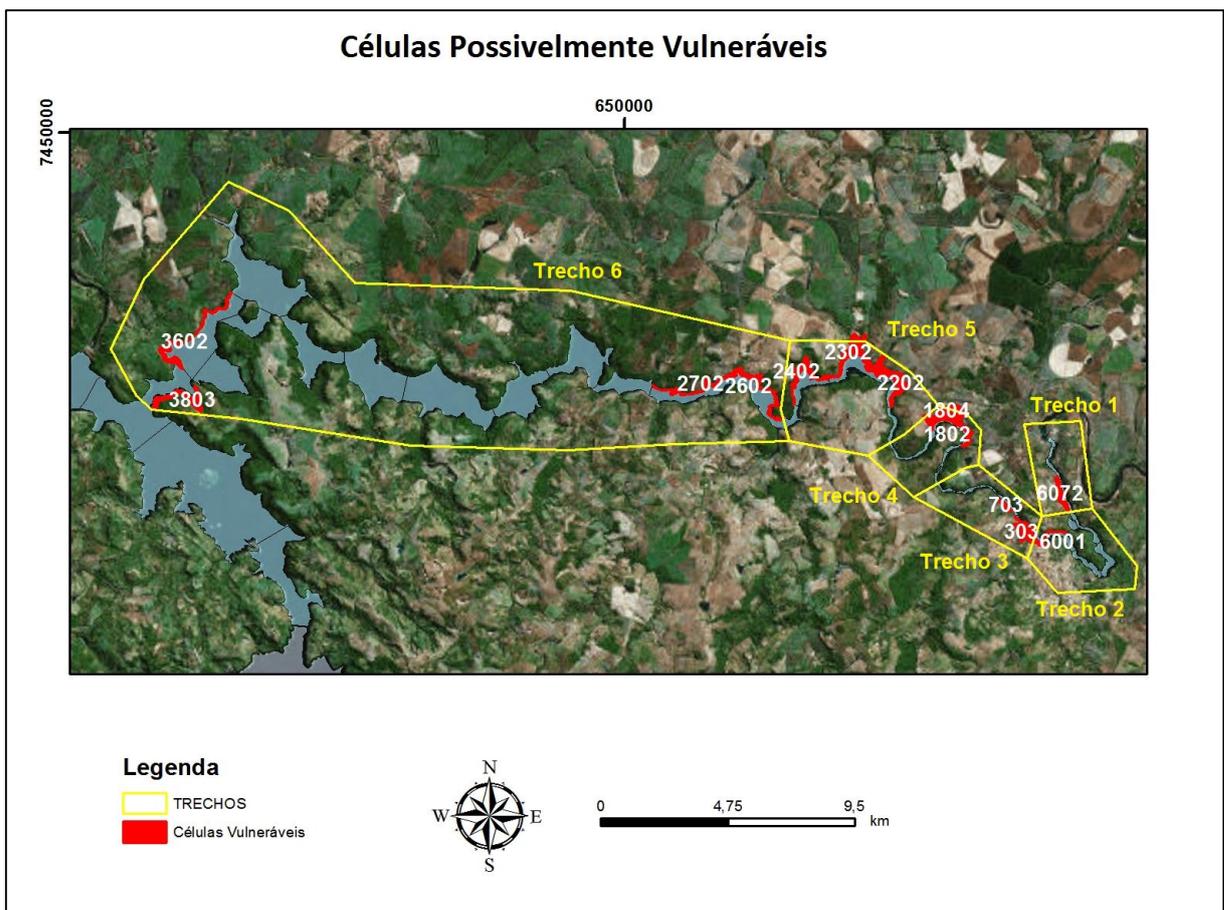


Figura 14 - Células potencialmente vulneráveis e seus respectivos trechos.

4.2.6 Mapas de inundação

Com a modelação no MODCEL é possível obter os níveis máximo atingidos nas células e consequentemente gerar os mapas de inundação para o cenário simulado.

As manchas podem ser apresentadas por meio do próprio MODCEL ou até mesmo a partir dos resultados de níveis máximos, fazer uma interface com o ArcGis e o Basemap de modo que seja mais representativo a observação das regiões inundadas.

Na apresentação dos mapas de inundação, optou-se por plotar o mapa em trechos, de modo que fosse possível observar melhor as áreas inundadas. Desta forma, dividiu-se o reservatório da UHE Paranapanema em Trecho 1, que se situa a montante do barramento e no trecho 2, que é composto pelas células que completam o reservatório até a usina hidrelétrica de montante, UHE Pirajú.

Para as células de jusante, o mapa foi dividido em 4 trechos, que variam do barramento da UHE Paranapanema até o barramento da UHE Chavantes.

Com base nos mapas de inundação gerados, foram desenvolvidos os mapas de perigo e vulnerabilidade, e recomendada propostas de planos de contingência para as regiões afetadas.

4.3 CALIBRAÇÃO MODCEL

A metodologia apresentada pode contribuir diretamente no processo de melhoria da gestão de segurança e meio ambiente. Desta forma, a partir dos dados de entrada, os ajustes no modelo foram feitos e pode-se conferir a seguir os resultados obtidos.

Os ajustes foram realizados como parte do processo de aprendizado do modelo, buscando obter maior correlação entre os dados. Desta forma é possível definir parâmetros que viabilizam a correlação entre os dados de cota e vazão registrados e os resultados do modelo.

4.3.1 Ajustes células jusante e montante da barragem

As células correspondentes a calha do rio, tanto a montante quanto a jusante, foram ajustadas usando como referência os dados levantados em campo pela empresa Topocart, os dados de nível e vazão do barramento da UHE Paranapanema obtidos pelos operadores, assim como uma estação existente no trecho do rio em estudo. A estação utilizada foi Estação UHE Chavantes Pirajú Jusante (64220050), localizada a jusante do barramento da UHE Paranapanema, mais precisamente situada na célula 6000 do modelo.

Além disso, foram utilizadas informações dos barramentos das usinas da UHE Piraju e da UHE Chavantes, obtidos no site da ANA, compondo estes com os dados medidos em campo. O ajuste foi realizado para um período de vazões mais altas, variando em torno de 1.000 m³ à 1.250 m³, de 17 de janeiro de 2016 à 20 de janeiro de 2016.

De acordo com a resposta do modelo, as células foram sendo observadas em suas particularidades e alguns parâmetros foram sendo ajustados. O objetivo desta etapa foi obter resultados do modelo com valores de níveis mais próximos do que foi medido de acordo com o registro. Desta forma, algumas informações de entrada foram sendo alteradas em relação ao o que foi determinado inicialmente, como por exemplo áreas de algumas células, algumas faixas de coeficiente de Manning, largura das ligações, localização dos centros de célula e cotas de fundo.

4.3.2 Curva cota x área x volume do reservatório

Ao consultar os dados disponíveis, verificou-se que o empreendimento não dispunha de informações da curva Cota X Área X Volume. Desta forma, na tentativa de melhor caracterizar o reservatório da UHE Paranapanema, foi feito uma estimativa de Cota X Área para compor as células tipo reservatório, utilizando-se dos dados das seções batimétricas que foram levantadas, podendo assim, através dos níveis máximos normais obter o valor do volume do reservatório estimado.

Por meio dessa análise foi possível observar que o volume total do reservatório, considerado da célula 6000 até a célula mais a montante de reservatório 6100, ou seja trecho 1 e trecho 2, resultou em um volume superior as informações iniciais do empreendimento. Após nova verificação decidiu-se por adotar o volume obtido pelo MODCEL, pois conclui-se que os dados de entrada do modelo apesar de estimados em função dos dados de campo, estão coerentes com essas informações.

4.3.3 Hidrograma e cotagrama

Para calibração do modelo, foram sendo verificadas as respostas de duas células específicas, a primeira célula logo a montante do barramento (6000) com dados medidos pela usina (na interseção entre o trecho 2 e trecho 3) e a segunda, célula de jusante, o qual localiza-se uma estação telemétrica (600), dentro do trecho 3. Ambas apresentam dados de vazão e cota para o período definido para a calibração, ou seja, são apresentados os cotagramas e hidrogramas das células de referência, resultantes da comparação dos valores medidos e dos valores obtidos pelo modelo.

Foi considerado para calibração do modelo os períodos de dados entre os dias 17 de janeiro de 2016 à 20 de janeiro de 2016. Pode-se observar nas figuras 15 e 16, correspondentes ao cotagrama e ao hidrograma, respectivamente, da célula 6000, que o modelo resultou em boa aderência dos valores, obtendo-se uma diferença de 0,01% entre os valores de níveis, e quanto aos dados de vazão, a maior diferença apresentada é de 3,35%, sendo que a diferença média obtida é em torno de 0,19%.

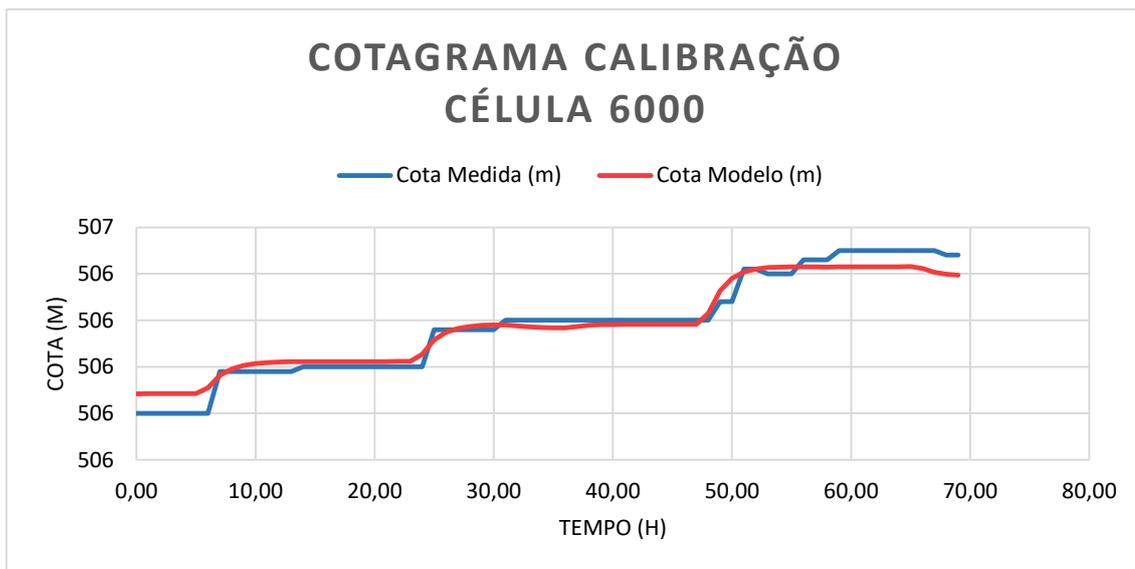


Figura 15 - Cotagrama célula 6000 – Janeiro de 2016

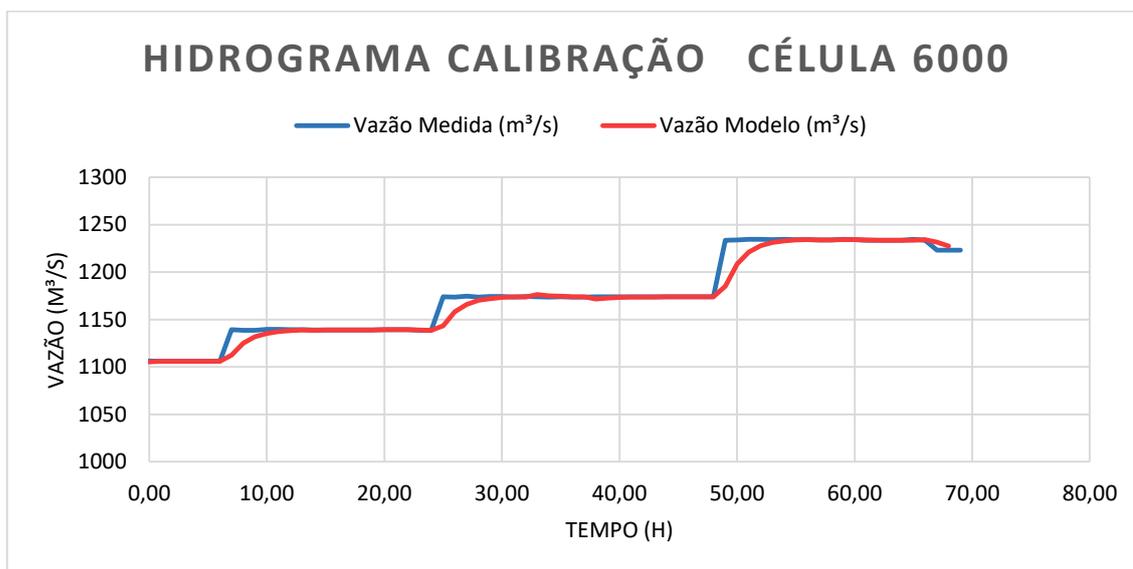


Figura 16 - Hidrograma célula 6000 - Janeiro de 2016

Nas figuras 17 e 18, correspondente a célula 600, são apresentados dos dados da estação hidrométrica e os dados obtidos no MODCEL, observa-se que a calibração quanto ao nível foi coerente, atingindo uma diferença média de 0,0013% dos valores, quanto aos dados de vazão, a maior diferença apresentada é de 3,18%, sendo que a diferença média obtida é em torno de 0,82%.

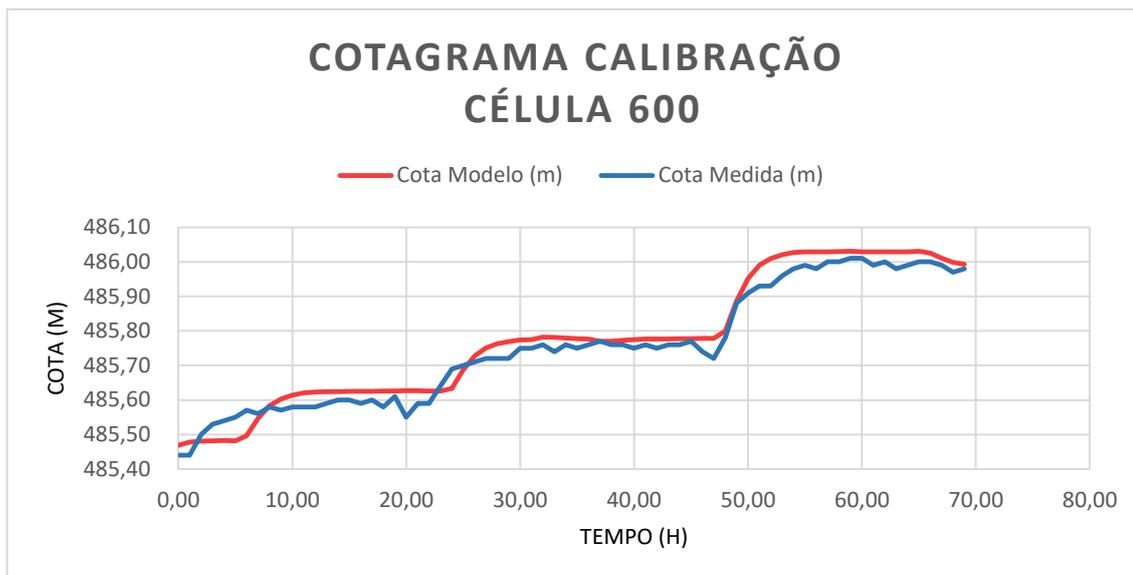


Figura 17 - Cotagrama célula 600 – Janeiro de 2016

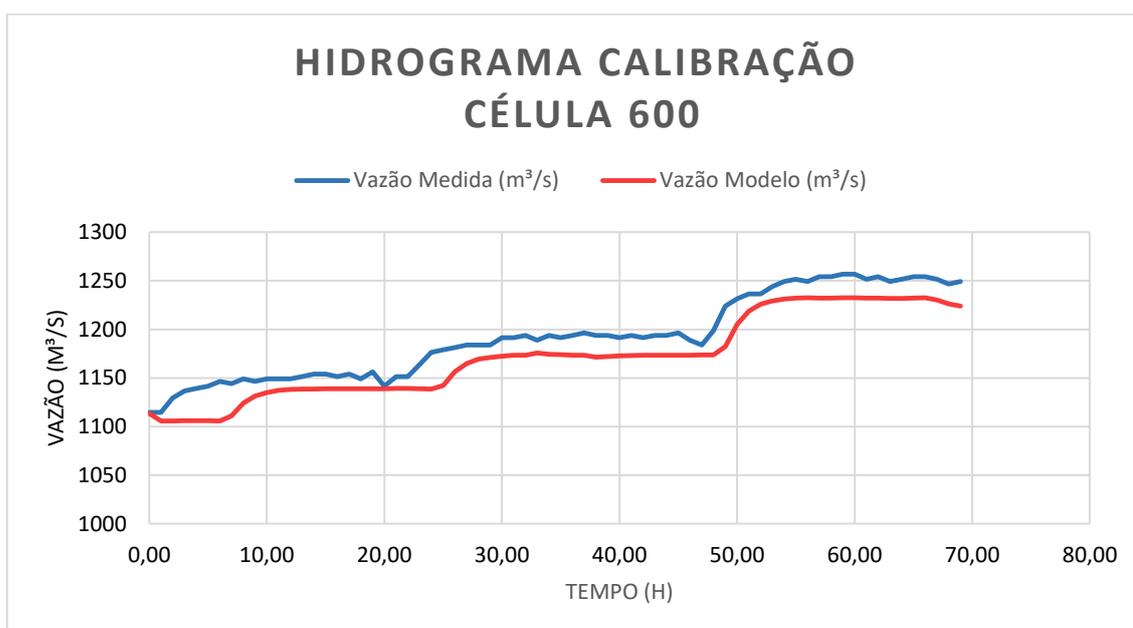


Figura 18 - Hidrograma célula 600 - Janeiro de 2016

Assim, como pode-se observar para ambas as células, o modelo resultou em um traçado do gráfico equivalente ao traçado das curvas dos dados medidos, não sendo significativa as diferenças obtidas. Desta forma, após serem comparados, os resultantes nesta etapa de calibração foram satisfatórios, sendo possível considerar o modelo como calibrado.

4.3.4 Calibração Momento da Ruptura

Assim, como já introduzido no item 4.2.4, o coeficiente de Manning foi majorado no trecho logo a jusante da ruptura, onde o ponto de articulação, no local em que ocorre a ruptura da barragem, tem $h(0,t)$ constante e igual a $(4/9)h_0$. Sendo assim, o valor calculado baseou-se na diferença entre os níveis de jusante e montante do barramento atingidos antes da ruptura. Desta forma, sendo a cota de montante o valor de 509,20 m (célula 6000) e cota de jusante o valor de 495,31m (célula 100), temos uma diferença de 13,89m, logo calculando $4/9$ desse valor é obtido 6,27m, que somados ao valor de 495,31 m, obtém-se 501,48 m, sendo este o nível que deve ser atingido no ponto de articulação.

Para o cenário estudado, iniciou-se os testes para um Manning no valor de 0,05, variando de 0,05 em 0,05 até atingir o nível mais aproximado do calculado no momento referente a ruptura, ou seja, variou-se o coeficiente em 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e por meio dessas variações de valores foram analisados os níveis atingidos na célula 100 no momento referente a ruptura.

Dentre os resultados obtidos, o modelo resultou em respostas melhores quando o valor de Manning se aproximou de 0,20, e por este motivo verificou-se de forma mais detalhada uma melhor aproximação, obtendo-se assim o valor de 0,22 como Manning de maior proximidade quanto ao calculado, como pode-se observar na tabela 11, onde constam as variações dos coeficientes e dos níveis correspondentes.

Tabela 11 - Coeficiente de Manning e Níveis Alcançados

Coeficiente Manning	0,05	0,10	0,15	0,20	0,22	0,25
Níveis Alcançados	503,99	503,35	502,61	501,71	501,49	500,71

Na figura 19 e com mais detalhes na figura 20, são apresentados a influência das variações dos coeficientes de Manning em relação ao ponto de articulação que pretende-se atingir com a onda de ruptura, além disso também é apresentado a curva exata do coeficiente que atinge aproximadamente o valor pretendido.

Para se observar melhor, foi traçado o valor aproximado do nível a ser atingido no ponto de articulação (caracterizado pela linha pontilhada vermelha “valor aproximado”), assim como foi inserido no gráfico todos os resultados da variação do

coeficiente de Manning. Destaca-se que essa análise foi iniciada na célula mais a montante da área de estudo de caso, ou seja, a primeira célula do modelo da UHE Paranapanema (célula 6100), passando pela região do barramento (caracterizado pela linha contínua preta), finalizando mais a jusante (célula 100).

Sendo assim, por meio de testes e com o uso do método da pseudo viscosidade, foi possível definir o coeficiente a ser aplicado para o momento da ruptura, sendo este em 0,22, atingindo assim um perfil de linha d'água como proposto por Ritter e Dressler.

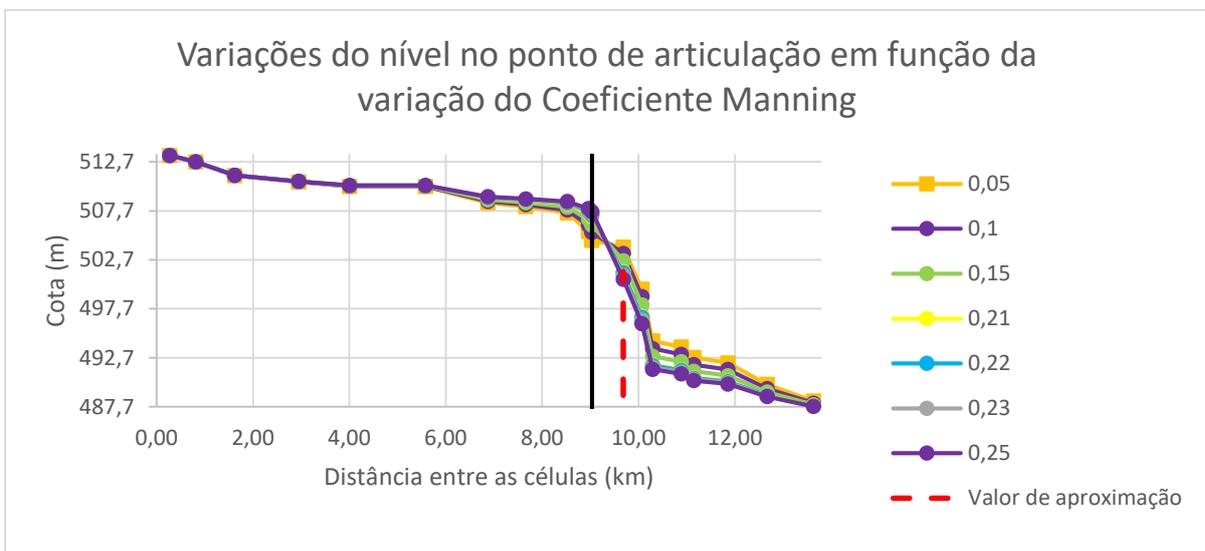


Figura 19 – Resultados dos níveis atingidos conforme o aumento do coeficiente de Manning.

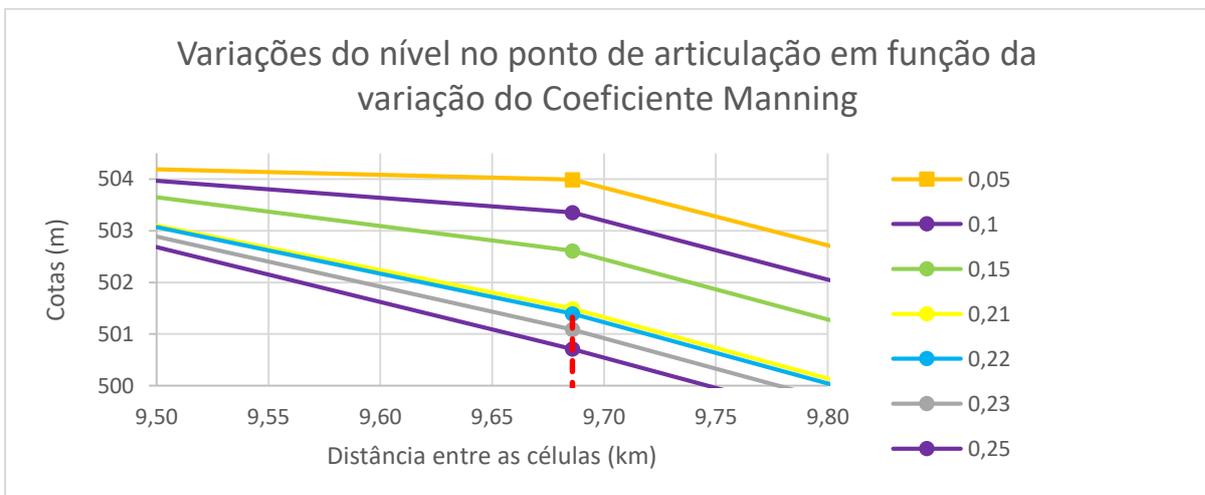


Figura 20 - Detalhe (em zoom) Resultados dos níveis atingidos conforme o aumento do coeficiente de Manning.

5 RESULTADOS

Neste capítulo estão descritos os resultados da aplicação da metodologia, com os resultados, pretende-se identificar as áreas de risco do trecho de rio em estudo para o cenário proposto, com o objetivo de contribuir para a segurança da barragem e da população ao redor.

5.1 RESULTADOS MODCEL

5.1.1 Vazões

O hidrograma de ruptura calculado pela fórmula de Saint-Venant, considerando a situação do reservatório completamente cheio para uma vazão decamilenar ($2.800\text{m}^3/\text{s}$) e atingindo uma cota de $509,20\text{ m}$, tem formato simplificado, considerado para o caso de ruptura praticamente instantânea. A vazão de pico correspondente é de $5.055,208\text{ m}^3/\text{s}$,

Quanto ao tempo de esvaziamento do reservatório, o hidrograma simplificado para ruptura praticamente instantânea indica um esvaziamento no tempo correspondente a $0,989$ horas ($3.560,68$ segundos) após a ruptura da barragem.

O hidrograma calculado pelo MODCEL apresenta no primeiro instante de tempo uma vazão de $5.576,03\text{ m}^3/\text{s}$, no entanto a vazão máxima atingida é $6.812,97\text{ m}^3/\text{s}$, com uma inclinação bem acentuada, o que caracteriza a aproximação de ruptura quase instantânea para a barragem da UHE Paranapanema, como pode ser observado a figura 21. Ainda de acordo com os dados do MODCEL, após um espaçamento de tempo de aproximadamente 4 horas e 50 minutos, que a vazão tende a estabilizar nos $2.800\text{ m}^3/\text{s}$.

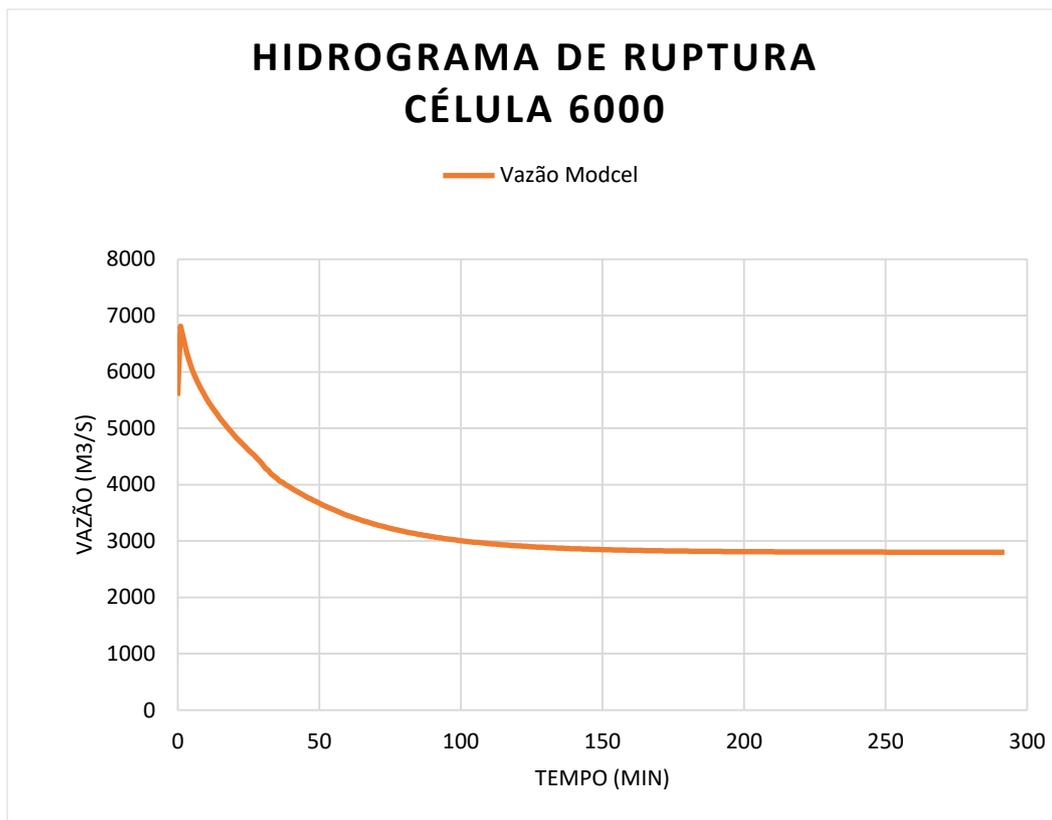


Figura 21 - Hidrograma de Ruptura - Célula 6000

Na figura 22 são apresentadas todas as vazões trocadas entre as células até a chegada nas células de reservatório de jusante, esta análise foi realizada a partir do trecho 3, onde localiza-se o barramento da UHE Paranapanema. Pode-se observar que os comportamentos de modo geral são homogêneos, sendo perceptível o movimento da vazão de pico da ruptura ao longo do rio, além da diminuição dessa vazão na medida que se afasta do barramento, isso ocorre devido ao amortecimento da cheia. Outro ponto importante é a tendência de estabilização das vazões na medida que se aproximam da influência do reservatório de jusante, pode-se perceber pelo gráfico isso ocorre a partir das células 2200[2100], 2300[2200], que tendem a estabilizar além de pouco sofrerem influência da onda de ruptura.

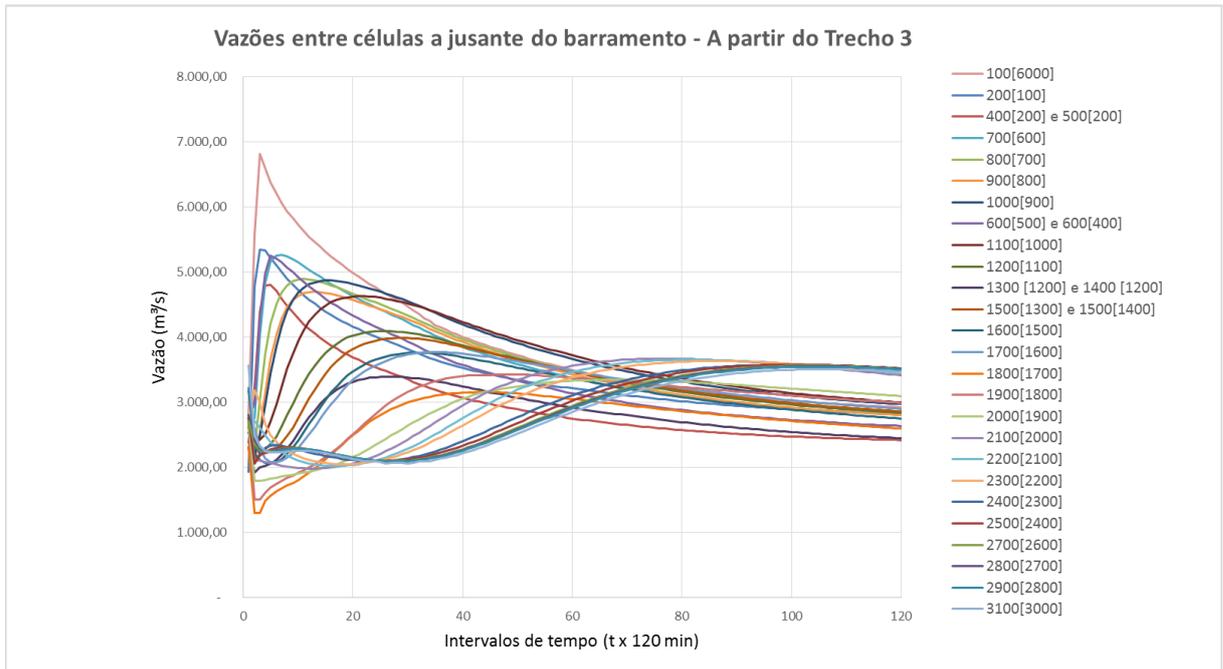


Figura 22 - Vazões entre células ao longo do rio a partir do trecho 3.

Nas figuras seguintes 23, 24, 25 e 26, as vazões trocadas entre as células foram segmentadas de acordo com os trechos, sendo possível verificar o comportamento da onda de ruptura com mais detalhes.

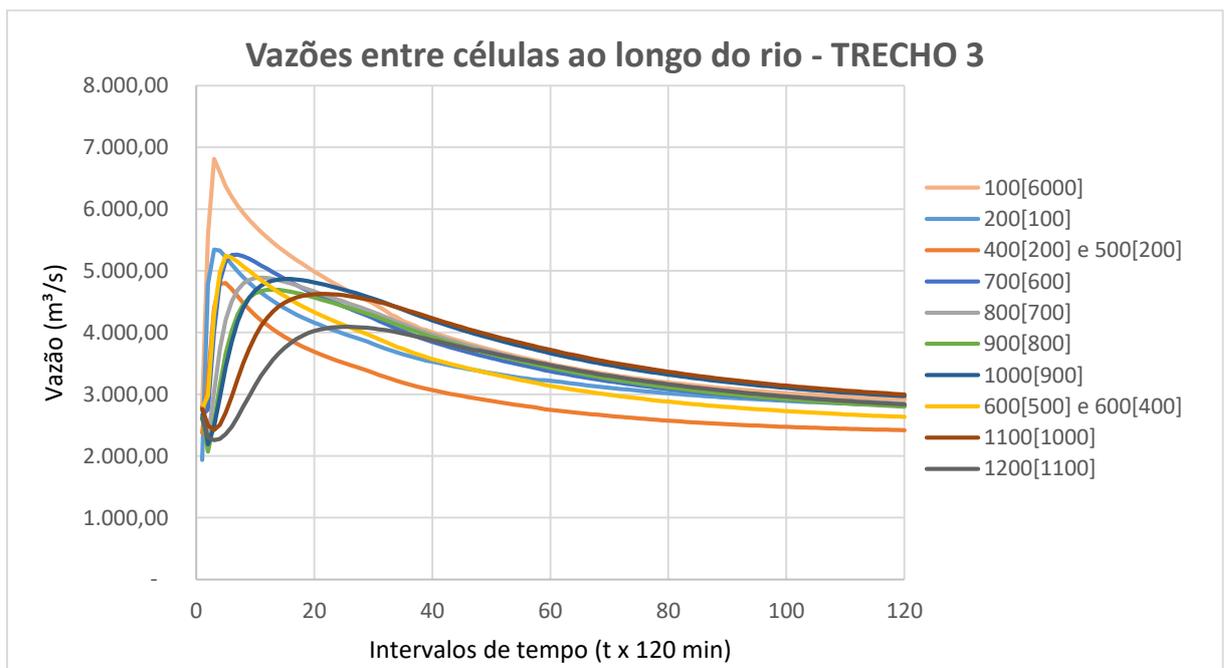


Figura 23 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 3 (entre as células 100 até 1100)

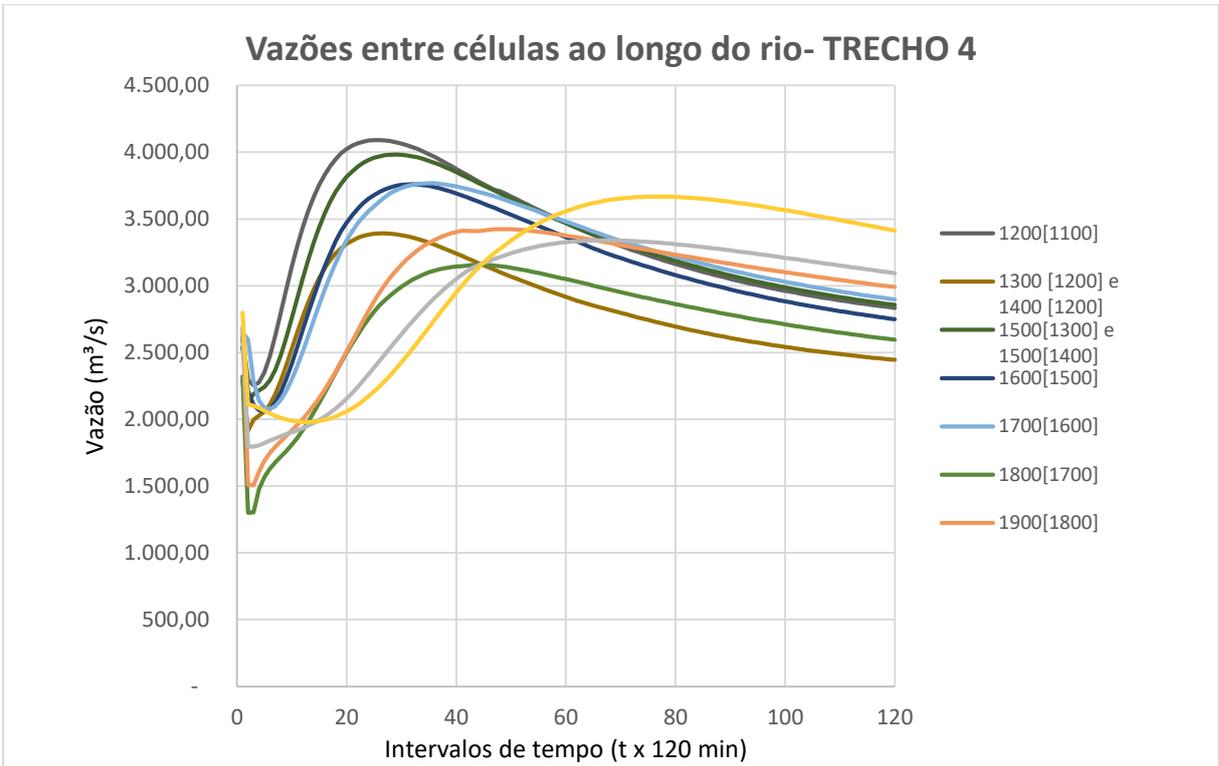


Figura 24 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 4 (entre as células 1200 até 2000)

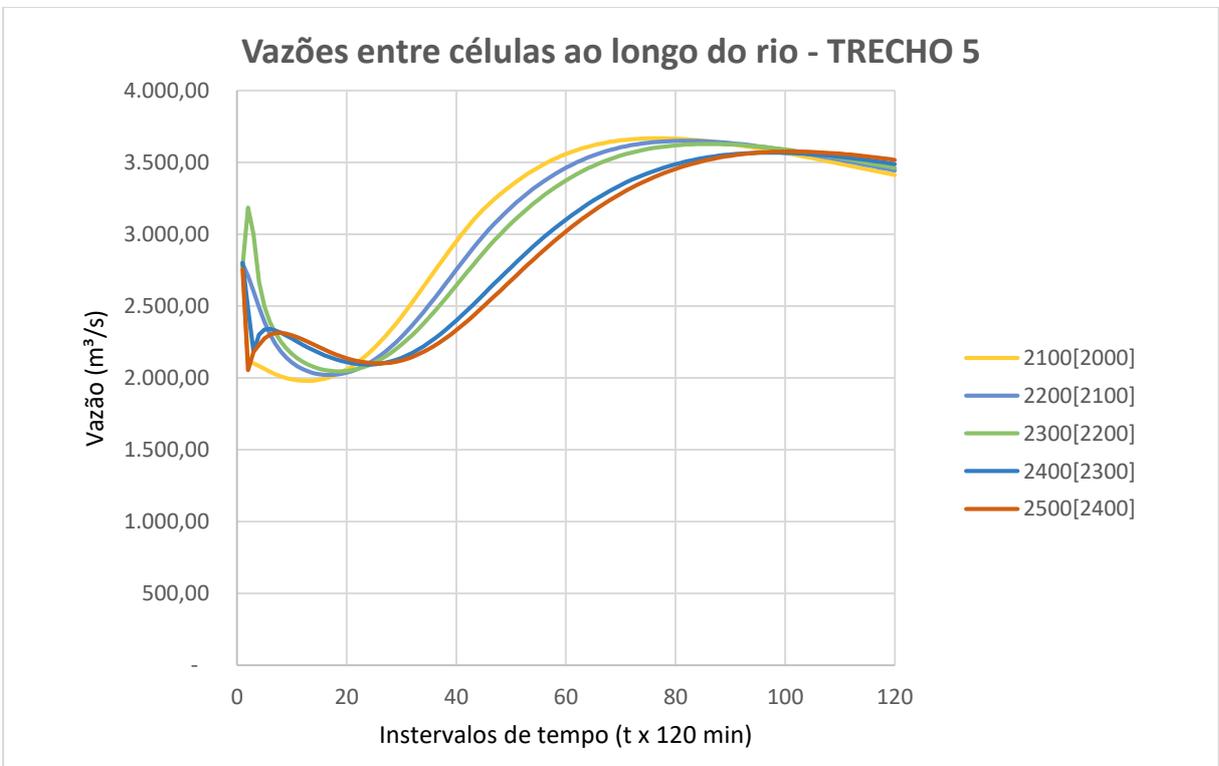


Figura 25 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 5 (entre as células 2100 até 2500)

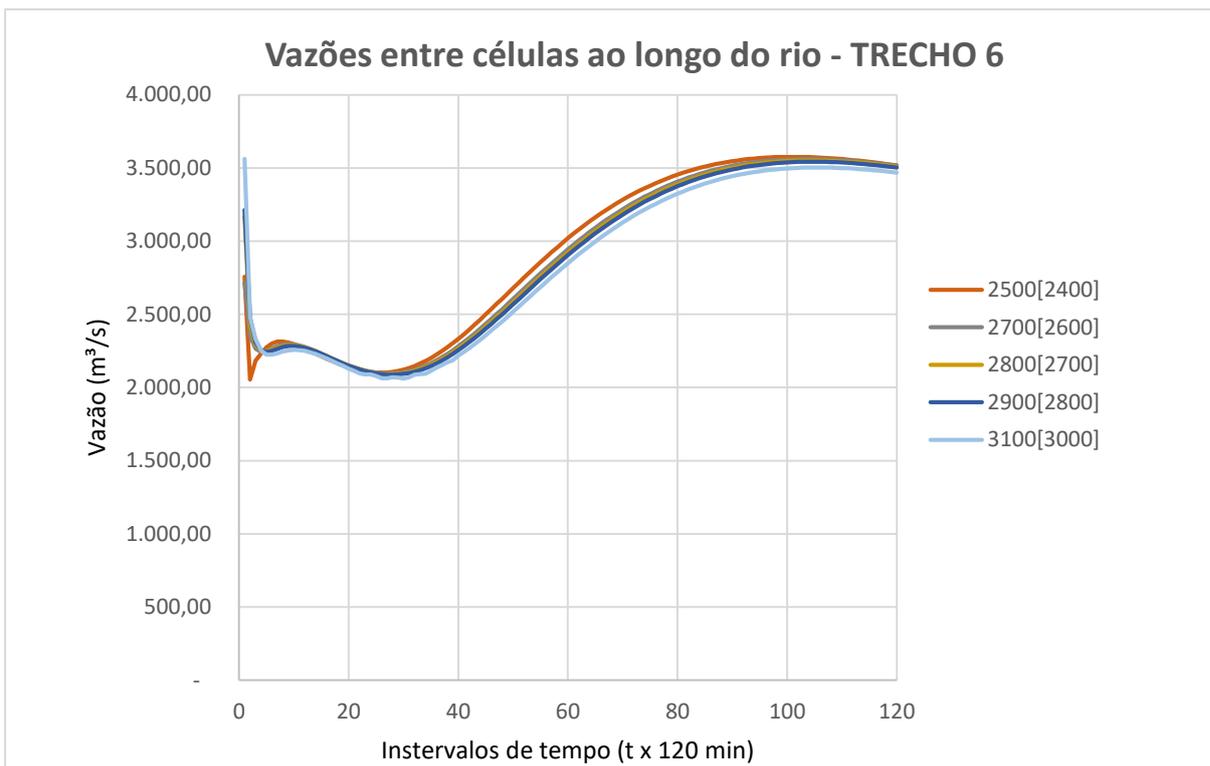


Figura 26 - Vazões entre as células ao longo do rio - Trecho 6 (entre as células 2600 até 3100)

5.1.2 Profundidades

Uma das saídas do MODCEL são os níveis máximos que cada célula atinge, onde é possível obter as variações das profundidades em função da subtração das cotas resultantes do modelo e com a cotas de fundo de cada célula.

A figura 27 apresenta a variação das profundidades obtidas nas células ao longo do rio, onde pode-se notar que não variam de acordo de forma homogênea. Apesar de reduzir à medida que se afasta do barramento, ainda assim apresenta variações devido as irregularidades do rio, sendo constituído de trechos de corredeiras, as vezes mais profundo as vezes mais raso.

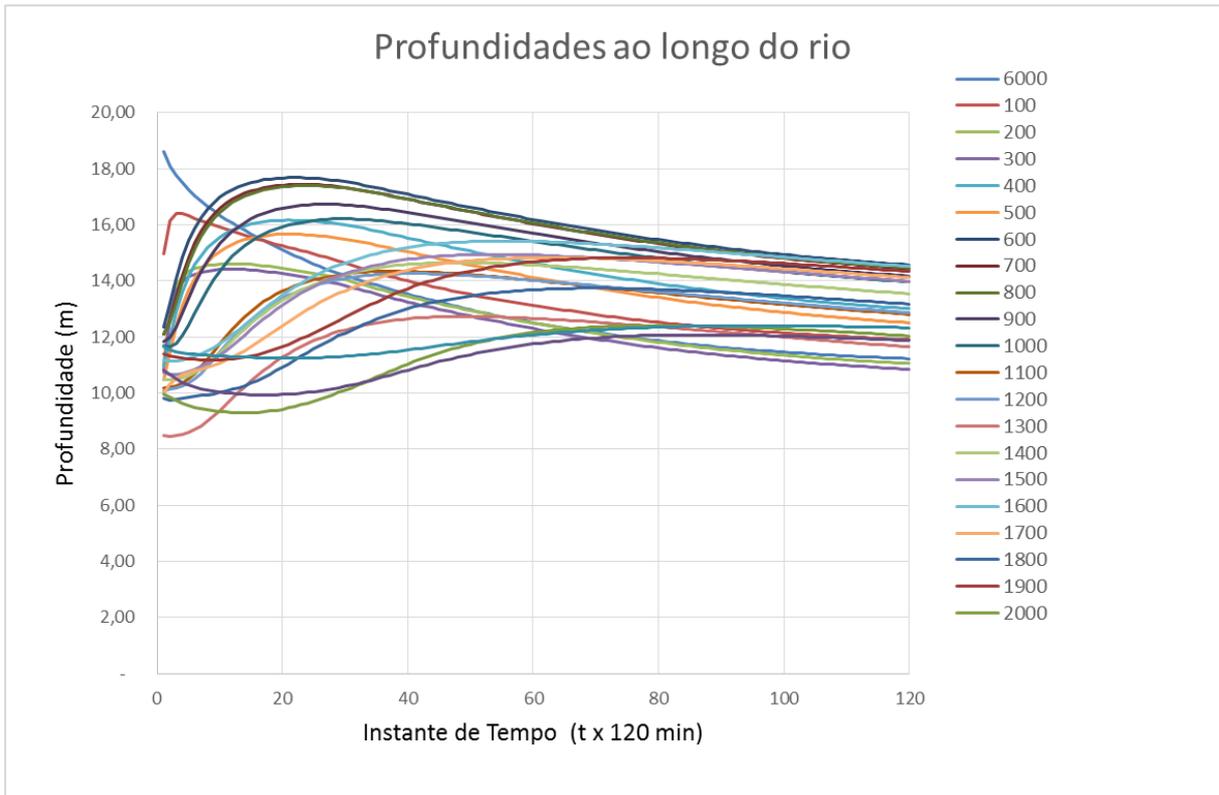


Figura 27 - Profundidade ao longo do rio

Na figura 28 tem-se o perfil do rio com as cotas máximas atingidas, considerando todos os intervalos de cálculo, é possível observar no gráfico que quando atingido a distância em torno de 20 km (20.000 m) a jusante do barramento, os níveis se estabilizam em torno da cota máxima operacional do reservatório que é 474m, isto indica a absorção da onda de ruptura pelo reservatório da UHE Chavantes sem maiores danos para estrutura a jusante da UHE Paranapanema.

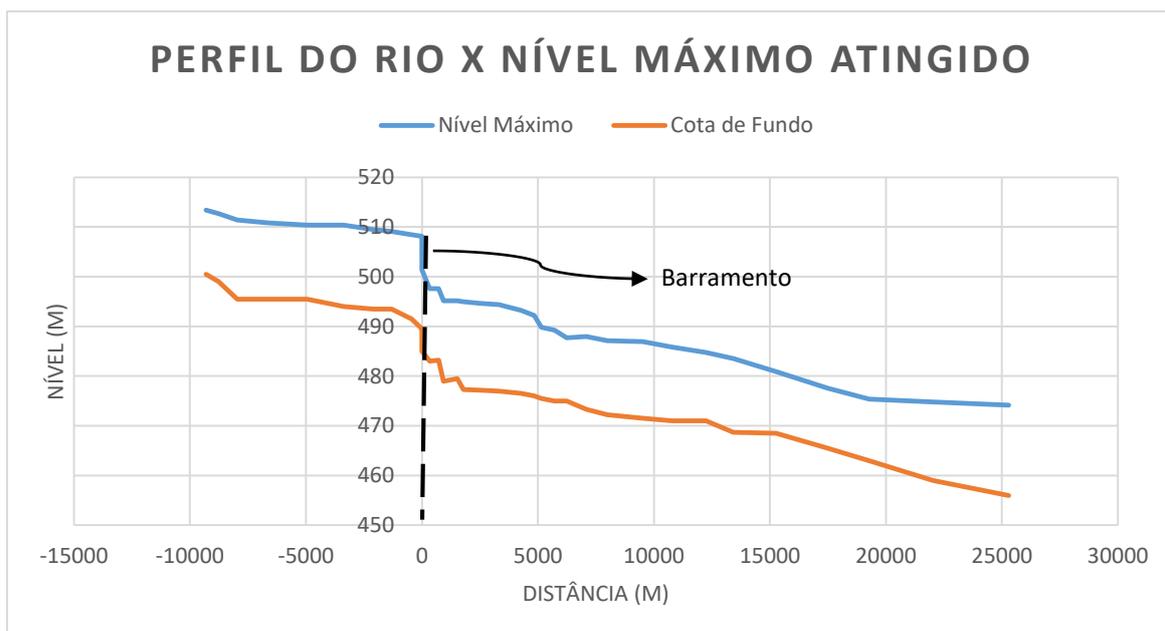


Figura 28 - Perfil do Rio e Níveis máximos atingidos pelas células,

5.1.3 Fator de velocidade

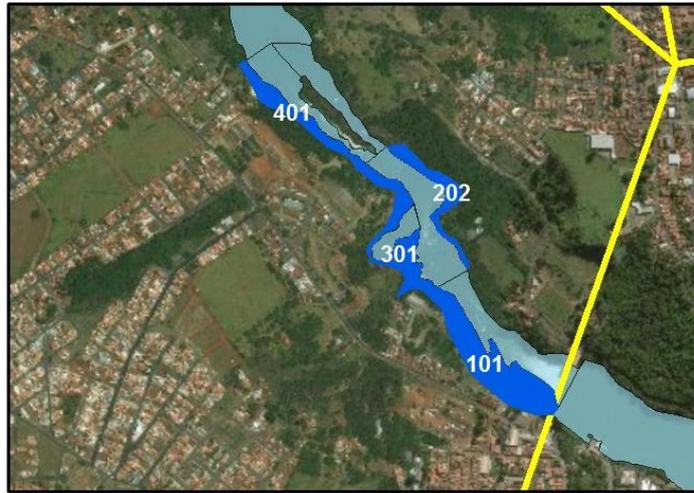
Em função das velocidades e cotas obtidas nas células de maior preocupação, destacadas no item 4.2.5, pode-se calcular os fatores de velocidade e a capacidade de arraste atingida em cada uma dessas células.

No entanto, a partir dos resultados obtidos no MODCEL, atentou-se que somente algumas células, das destacadas anteriormente como vulneráveis, sofreram com efeitos de inundação, foram estas 101, 202, 301, 401, 1702, 1802, como demonstrado na tabela a seguir. As células inundadas também podem ser verificadas na figura 29 e 30, separadas por seus respectivos trechos.

Tabela 12 - Célula que apresentam inundação comparadas a Tabela 10.

Caracterização/ Localização	Células Vulneráveis	Células Inundadas
Próximo ao reservatório de Paranapanema	6001, 6012 e 6072	-
Área da Usina Paranapanema	101, parcialmente 301 e 303	101 e 301
Cidade de Pirajú	103, 104, 202, 301, 303 e 401	202, 301 e 401
Jusante da Cidade de Pirajú	703, 1702, 1802, 1804, 2202, 2302, 2402, 2602 e 2702	1702 e 1802
Outros pontos	3602 e 3803	-

Células Inundadas Trecho 3



Legenda

-  Células Inundadas
-  TRECHOS



0 0,25 0,5 km

Figura 29 - Células inundadas Trecho 3

Células Inundadas Trecho 4



Legenda

-  Células Inundadas
-  TRECHOS



0 0,75 1,5 km

Figura 30 - Células inundadas Trecho 4

As velocidades nestas células variaram de 1m/s à 4m/s e os níveis de aproximadamente 4,0 m à 8,0 m. Desta forma, aplicando a equação apresentada no item 2.3.5, calculou-se o fator de velocidade dessas células atingidas e pode ser observado na tabela a seguir.

Tabela 13 - Resultado Fator de Velocidade células inundadas

Células Inundadas	Cota Máxima (m)	Velocidade Máxima (m/s)	Fator de Velocidade (m²/s)
101	5,19	4,73	24,55
202	8,59	2,03	17,44
301	5,62	4,73	26,58
401	7,17	2,37	16,99
1702	8,98	2,09	18,77
1802	4,2	1,24	5,21

De acordo com a tabela 8 correspondentes a relação fator de velocidade e seus efeitos, quando o fator de velocidade é superior a 7m²/s, a área classificada apresenta alto potencial de danos a construções pesadas (alvenaria). As células atingidas apresentam elevado fator de velocidade, o que pode ser justificado pela ocorrência da ruptura, onde naturalmente tende a ter maiores velocidades do escoamento, além de altos níveis.

5.2 GESTÃO DOS RISCOS

Conforme visto no item 2.6, a estimativa dos riscos pode ser quantitativa e qualitativa. Neste trabalho, serão abordados os riscos qualitativos através da análise dos resultados do modelo, bem como os mapas de inundação e os mapas de perigo e vulnerabilidade.

5.2.1 Mapas de inundação

A seguir serão apresentados os mapas de inundação, nestes poderão ser visualizados as possíveis áreas, estradas e a população atingidas no caso da ocorrência de um evento de ruptura. Para a ruptura, os mapas de inundação apresentados foram confeccionados com auxílio do ArcGis, tendo seus resultados numéricos obtidos por meio do MODCEL, de acordo como discutido anteriormente.

Nas figuras 31 e 32, são apresentadas as manchas de inundação dos trechos do reservatório, trechos 1 e 2, observa-se duas células que apresentam alagamento em suas planícies nos trechos do reservatório da UHE Paranapanema, são as células 6062, próximo a célula de canal 6060 e a célula 6092, próximo a célula de canal 6090, atingindo níveis máximos correspondentes a 0,69m e 1,25m, respectivamente. Nessa região em que as células estão localizadas não há indícios de povoamento, o que reduz os riscos envolvidos.



Figura 31 - Mapa de Inundação - Reservatório Trecho 1



Figura 32 - Mapa de Inundação - Reservatório Trecho 2

Nas figuras 33, 34, 35 e 36 são apresentadas as manchas de inundação referente aos trechos de jusante da barragem da UHE Paranapanema (6000). Observa-se que os trechos 3 e 4 (figuras 33 e 34, respectivamente) apresentam inundação ao longo de suas planícies em praticamente todo trecho, com cotas que variam até aproximadamente 13 metros.

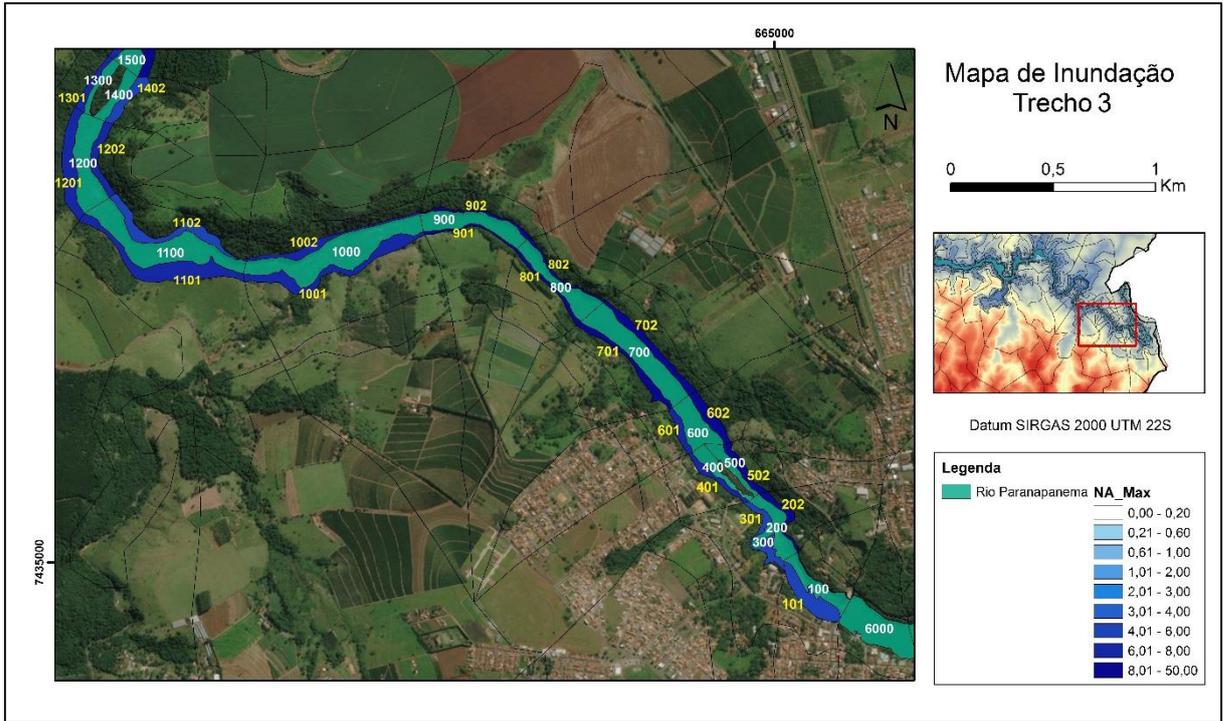


Figura 33 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 3

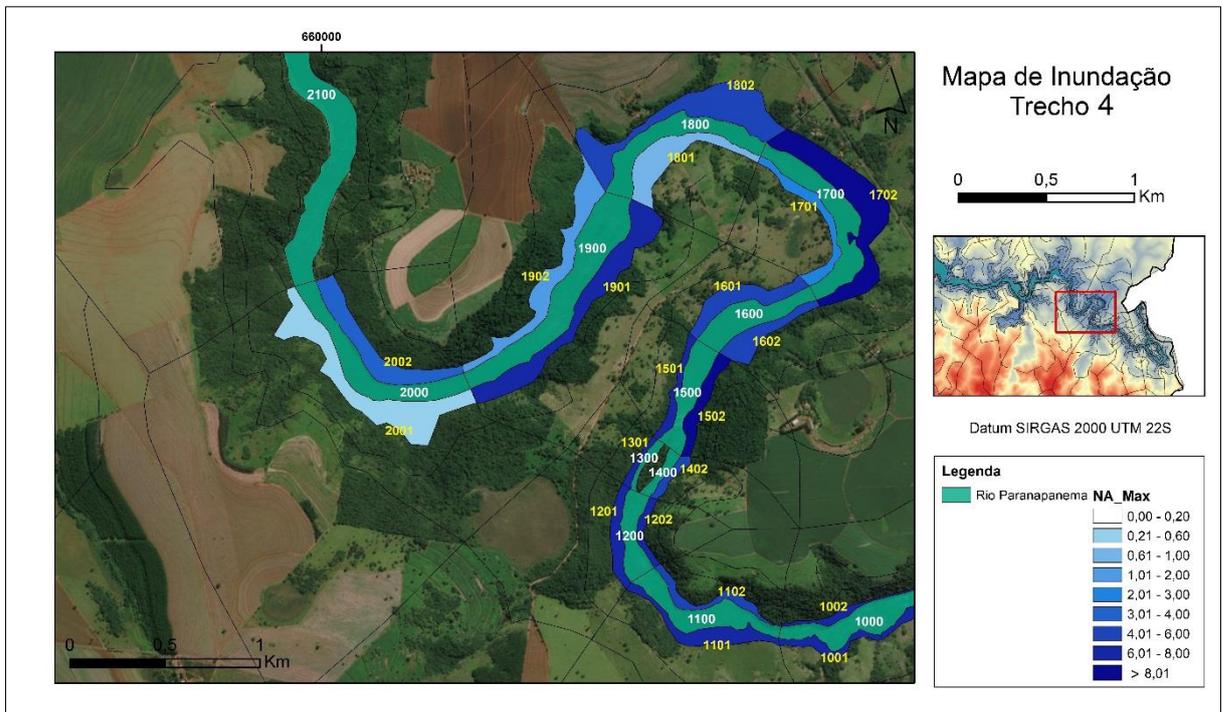


Figura 34 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 4

Nas figuras 35 e 36, os trechos 5 e 6 são trechos mais a jusante já no encontro com o reservatório da usina hidrelétrica de jusante, a Usina Hidrelétrica Chavantes, em torno da célula 2300. Nota-se que poucas planícies apresentaram inundação, somente as células 2401 e 2301 apresentaram níveis de inundação aproximadamente de 2m, no entanto são áreas não habitadas e observando o mapa pode-se dizer que são planícies de inundação naturais.

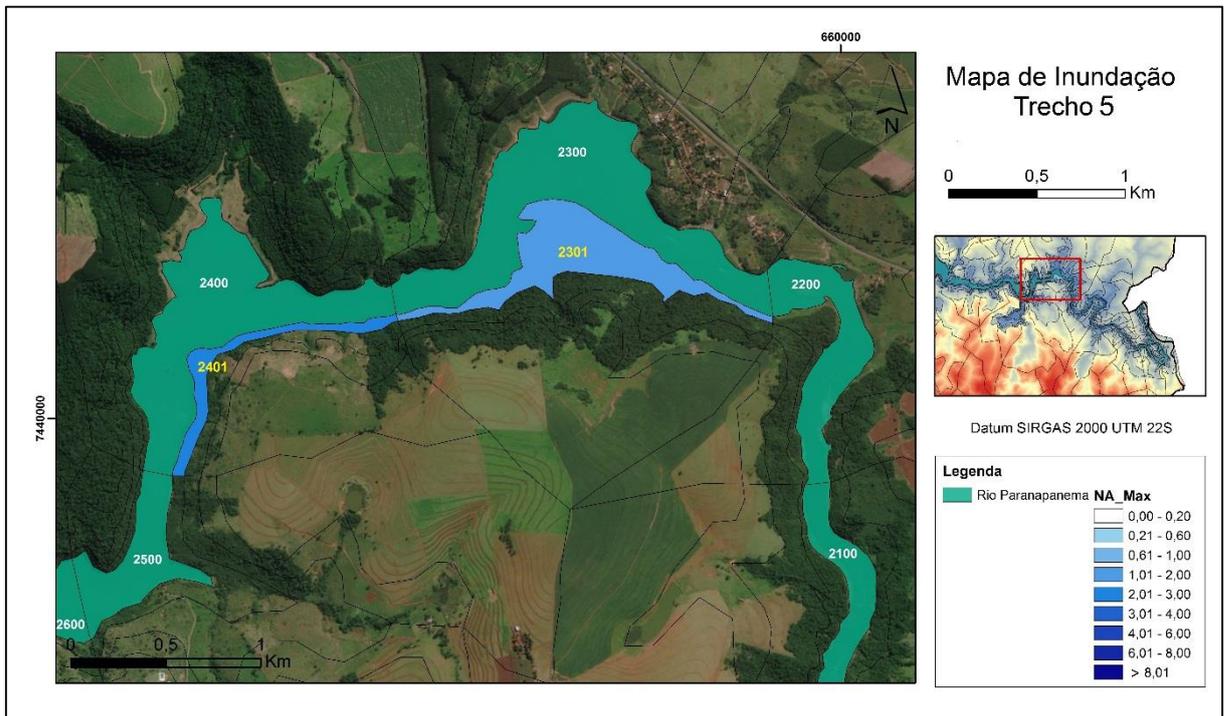


Figura 35 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 5



Figura 36 - Mapa de Inundação - Jusante Trecho 6

Também pode-se destacar como uma resposta a condição que as planícies dessas regiões já não apresentam inundação, o fato do reservatório da usina de jusante possuir condições significativas de amortecimento da onda de cheia da UHE Paranapanema.

5.2.2 Mapas de perigo e vulnerabilidade

Foram observadas as células que representariam maior importância do ponto de vista populacional de acordo com a mencionada no item 4.2.5, E pelos resultados obtidos dos itens 5.2.1 ao 5.2.4, as células que se mantem em evidencia, caracterizando perigo e vulnerabilidade foram destacas na tabela 12.

As células inundadas apresentadas são importantes e exigem uma maior atenção, visto que localizam-se em área povoadas, seja pela instalação da própria usina, por áreas de circulação da cidade ou por moradias isoladas, são área onde a ocorrência de ruptura representa um elevado risco, pois pessoas ficam suscetíveis

aos efeitos da onda de cheia, principalmente nas células 301 e 303, onde encontra um parque de lazer da cidade. Destaca-se em amarelo na figura 37 e 38 a seguir, as células que sofrem inundação.

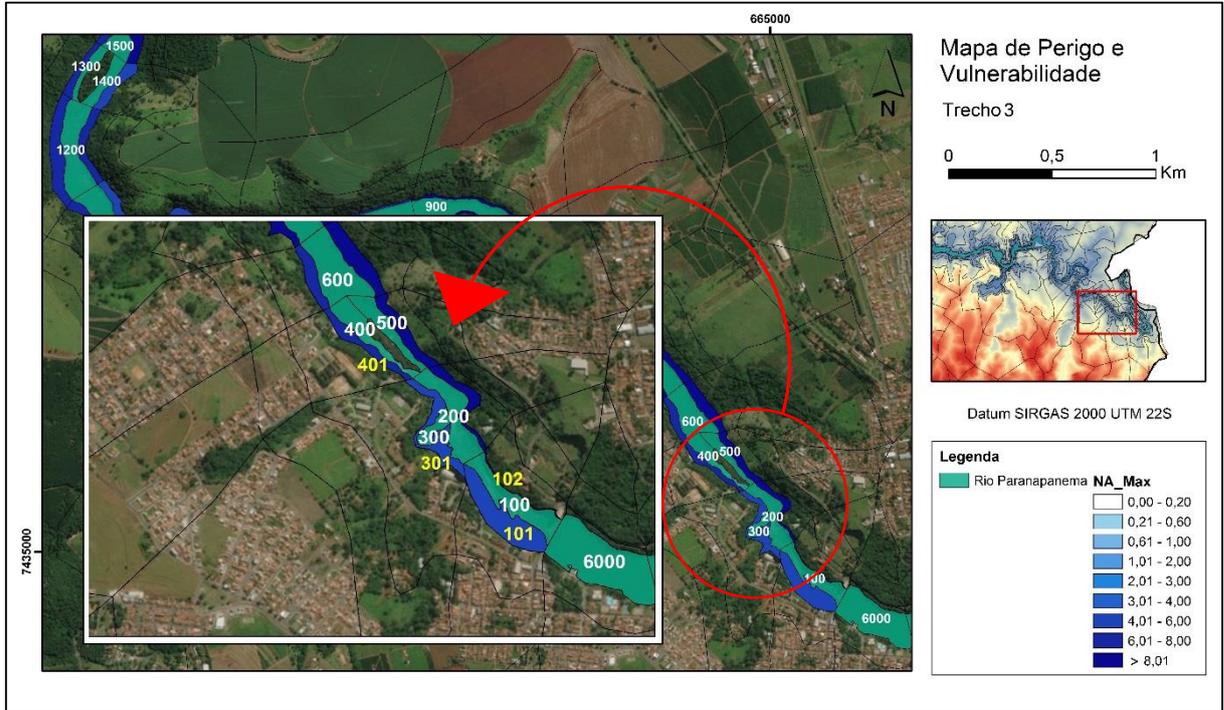


Figura 37 - Mapa de Perigo e Vulnerabilidade - Trecho 3

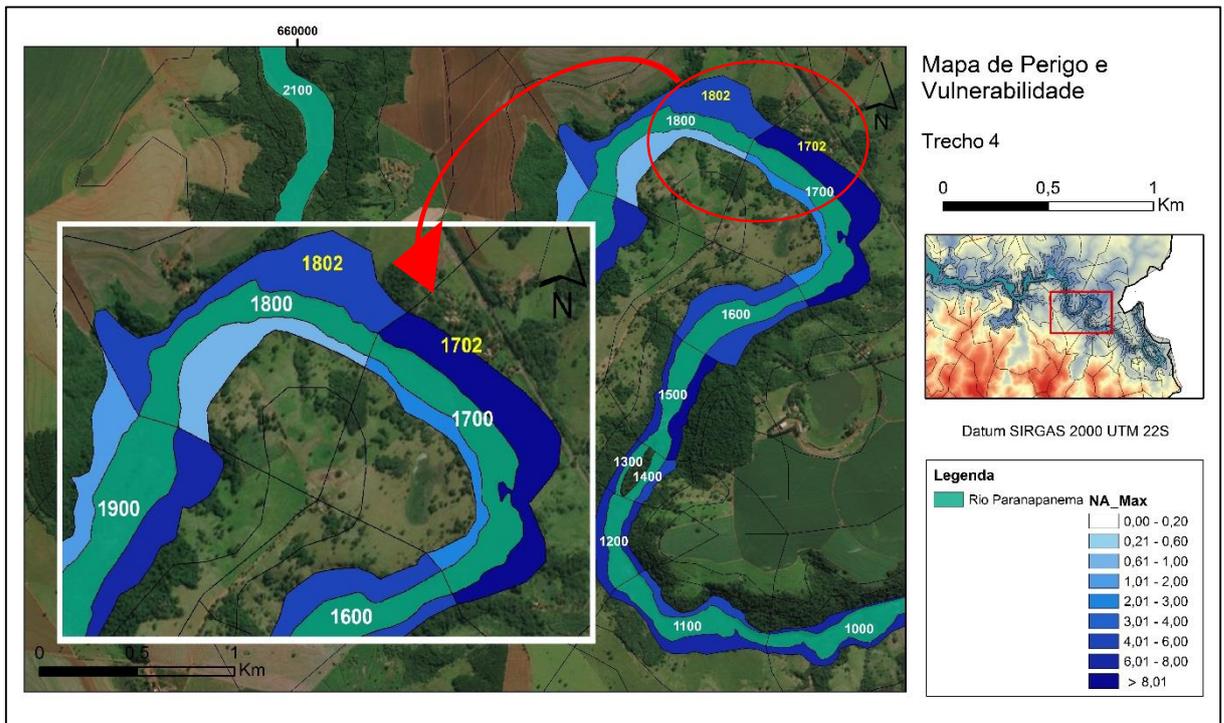


Figura 38 - Mapa de perigo e Vulnerabilidade - Trecho 4

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Com o objetivo de realizar o estudo de propagação e inundação da onda de cheia em cidades vizinhas a uma usina hidrelétrica, além de analisar os riscos envolvidos nesse processo, o presente trabalho teve como estudo de caso o rompimento da barragem da UHE Paranapanema, localizada no estado de São Paulo, no rio Paranapanema, como parte do atendimento a legislação e as boas práticas de engenharia e segurança.

De acordo com as condições locais, em que a usina hidrelétrica de montante tem um volume de espera para controle de cheias, foi modelado o pior cenário, onde a ruptura ocorreu por galgamento para a cheia de projeto com período de retorno de 10,000 anos, considerando as comportas inoperantes.

Desta forma, após definição da bacia hidrográfica contribuinte para o trecho em estudo, o modelo foi construído desde o primeiro traçado, com o desenho das células, inserção de informações da topografia, definição de parâmetros, definição dos tipo e ligações entre células, entre outras características que foram essenciais por todo processo de aprendizagem, conhecimento e percepção do modelo, principalmente durante a etapa de calibração.

O uso do MODCEL como ferramenta de trabalho para o estudo de ruptura de barragens tem sido difundido no meio acadêmico e aos poucos ganhando espaço no mercado profissional por mostrar-se apto para aplicação em tal função. No presente estudo o modelo apresentou resultados de grande relevância para tais análises, permitindo uma avaliação do processo de ruptura de barragens ao longo do vale e das planícies suscetíveis ao alagamento, além de fornecer dados para o mapeamento dos locais alagáveis.

Neste contexto foram evidenciadas algumas limitações no desenvolvimento do estudo, devido a região analisada possuir um relevo muito acidentado, ou mesmo pela carência ou incerteza de dados. A calha do rio no trecho em estudo é formada por muitas corredeiras, meandros, variações abruptas de declividades, controles hidráulicos naturais, o que restringiram e dificultaram a segurança no momento da

realização dos trabalhos de levantamento de campo, além de inviabilizarem a aplicação de boas técnicas para o levantamento devido aos altos custos envolvidos.

Desta forma, foi possível definir o estudo de caso, utilizando dos dados disponíveis para construção do modelo. Foram aplicadas as informações disponíveis ao modelo escolhido, MODCEL, e assim foram produzidos os resultados para o cenário de ruptura por galgamento com não operação das comportas, utilizando uma vazão decamilenar, Foram gerados mapas de inundação que evidenciaram alagamentos em diversas áreas das planícies, principalmente as que cercam a calha do rio, no entanto devido o rio estar situado em um vale bem encaixado, poucas áreas habitadas sofreram com o impacto do alagamento, sendo estas destacadas nos mapas de perigo e vulnerabilidade.

O fator de velocidade é percebido quando avaliada a cota e a velocidade ocorrida na área em questão. Das áreas selecionadas para análise algumas apresentaram alto potencial de danos, o que é coerente diante dos impactos que uma ruptura pode provocar.

Sendo assim, no âmbito do desenvolvimento do PAE, são áreas onde deve-se ter mais atenção e ser aplicado com prioridade um plano de contingências para essas áreas, propondo-se medidas de realocação caso seja necessário, criando alertas de ocorrência de eventos de cheia, executando zoneamento para evitar ocupação nessas áreas, sempre de forma a respeitar e a atender a legislação vigente, sendo informações relevantes à tomada de decisão para mitigação dos efeitos da cheia.

Destaca-se que, embora a usina Paranapanema tenha sido a primeira da cascata, sua estrutura da barragem apresenta uma considerável resistência, visto que em situação de evento mais intenso ocorrido no ano de 1983, onde a vazão atingiu valor em torno de 2.769,00 m³/s, no qual a barragem foi galgada e a casa de força destruída, a estrutura da barragem não sofreu maiores danos apesar dos esforços sofridos.

É importante ainda considerar a comunicação entre os empreendedores das usinas em cascata como uma ferramenta fundamental para manutenção da segurança. Em eventos extremos, o reservatório da UHE Jurumirim por ter um porte maior é capaz de deplecionar e amortecer ondas de cheia, operando concomitantemente as usinas da cascata, sendo considerado a UHE Pirajú e principalmente a UHE Paranapanema uma restrição em sua operação.

Além do mais, o cenário considerado foi de situação extrema, uma situação limite de segurança e ainda assim evidenciou-se que a UHE Chavantes, localizada a jusante da UHE Paranapanema, possui um reservatório de porte significativo, e com base nos resultados do modelo, pode-se observar que o reservatório foi capaz de absorver a onda de ruptura que se propagou a jusante de Paranapanema, reduzindo os riscos às cidades mais a jusante e até a própria usina de Chavantes.

6.2 RECOMENDAÇÕES

A metodologia apresentada contribui significativamente para a gestão do risco de empreendimentos hidrelétricos, tanto por parte do empreendedor quanto por parte da sociedade em si, com a intervenção das prefeituras e a da defesa civil. Com base nisso, e diante do que vem sendo discutido pelos empreendedores e órgãos públicos regularizador e fiscalizador da segurança das barragens no Brasil, muitas etapas ainda devem ser melhor desenvolvidas, aperfeiçoadas e prioritariamente aplicadas, de modo que o PAE, por exemplo, seja treinado e aplicado não só nas instalações das usinas, mas nas cidades próximas que podem sofrer com eventual acidente.

Uma das práticas atuais de comunicação da ocorrência de um evento de emergência ocorre por meio de sirenes distribuídas em pontos estratégicos nas cidades vizinhas, contudo, dependendo da área de impacto observada nos estudos de *dam break*, o custo da instalação desses equipamentos pode se tornar consideravelmente alto, por conseguinte é interessante a análise e estudo de novas formas de alerta a população, possibilitando uma maior predisposição dos empreendedores a executar o PAE da melhor forma possível.

Apesar de o trabalho ter a intenção de mostrar o impacto da ruptura isolada da barragem da UHE Paranapanema, outros cenários podem ser criados quando se envolve um ponto importante da legislação vigente, o estudo dos casos em que as usinas enquadradas na Lei de Segurança de Barragens possuem suas instalações em cascata com outras usinas, este é um cenário de significativa importância e que deve ser realizado em trabalho em conjunto com outros empreendedores da cascata.

Desta forma, a seguir sugerem-se variações e melhorias do estudo do presente trabalho:

- Realizar o estudo para um cenário de ruptura para vazão média de longo termo, o qual possivelmente o efeito da ruptura será mais perceptível a jusante, justamente por ser mais clara a variação abrupta da vazão e do nível, conseqüentemente da onda de cheia, Além de outros cenários de vazões altas, no entanto para vazões menores que a decamilenar.

- Detalhamento das células de planícies localizadas, principalmente, nas margens da calha do rio, com objetivo de perceber melhor as variações dos níveis e trocas de vazões ocorridas com as planícies.

- Levantamento e monitoramento da calha maior do trecho do rio entre o barramento da UHE Paranapanema avançando até o trecho que ocorre maior percepção do reservatório da UHE Chavantes, para o refinamento e melhor definição dos parâmetros como coeficiente de Manning ou Runoff, Esse é um trecho que interfere diretamente na evolução da onda de ruptura e avanço do alagamento para as planícies, desta forma será possível ajustar cada célula as interferências naturais da calha, como a vegetação existente.

- Realizar complementação da batimetria da UHE Chavantes, principalmente no trecho de interseção do início do reservatório de Chavantes com a parte mais a jusante da UHE Paranapanema, onde as informações não estão muito coerentes.

- Realizar levantamento de novas seções topobatimétricas entre o início dos dados de batimetria de Chavantes e a última seção topobatimétrica levantada no presente estudo, de modo a ter mais clareza nesse trecho do rio, pois devido a escassez de informações o trecho teve informações interpoladas.

- Aprofundamento do estudo de ruptura de barragem da UHE Paranapanema, a partir da construção de cenários que envolvam o rompimento das usinas em cascata, localizadas na bacia hidrográfica em estudo, principalmente as usinas localizadas logo a montante desta, como a UHE Pirajú e UHE Jurumirim. Assim como focar com maior detalhamento nas áreas que tenham maior vulnerabilidade em eventos extremos ou na ocorrência da ruptura.

- Aplicação de outro software para esse estudo de caso, possibilitando assim um estudo comparativo entre este e o MODCEL, confirmando assim, mais uma vez, a aplicabilidade do MODCEL para estudos de segurança de barragens.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. **Resolução nº 742**. Brasília, 2011. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2011/742-2011.pdf>. Acesso em: 08 jun, 2017.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Resolução nº 91**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2012/91-2012.pdf>. Acesso em: 16 mai, 2017.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Resolução nº 236**. Brasília, 2017. Disponível em: < <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/236-2017.pdf>>. Acesso em: 03 fev, 2018.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília, 2016. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Seguranca/RelatorioSegurancaBarragens_2016.pdf. Acesso em: 06 jan, 2018.

ANA - Agência Nacional de Águas, **Segurança de Barragens**. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/cnbarragens.aspx>. Acesso em 04 jan, 2017.

ANA - Agência Nacional de Águas, **Região Hidrográfica do Paraná**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/parana.aspx>>. Acesso em: 07 set, 2017.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Guia de Orientação e Formulário do Plano de Ação de Emergência**. Brasília, 2016.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 695 de 15 de dezembro de 2015. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/063/resultado/ren2015695.pdf>>. Acesso em: 10 mai, 2017.

AGUIAR, D. P. O; FAIS, L. M. C.; GENOVEZ, A. I. B e FILHO, J. G. D, **Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 20 p 360 – 368. Porto Alegre, 2015.

ALMEIDA, A. B. **A gestão do risco em sistemas hídricos conceitos e metodologias aplicadas a vales com barragens**. 2003. Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em < <http://www.civil.ist.utl.pt/~joana/artigos%20risco%20ABA/pub-2003/a%20gest%C3%A3o%20do%20risco%20em%20sistemas%20h%C3%ADdricos%20-%20SILUSBA03.pdf>>. Acesso em: 02 mar 2018.

ALMEIDA, A. B. **Emergências e gestão do risco, In: INAG, Curso de Exploração e Segurança de Barragens**. Lisboa: INAG, 2001, Capítulo 7, 115 p.

ALMEIDA, A. B. **Risco associado à segurança de barragens**. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243001/texto-riscos.pdf>. Acesso em: 31 jan, 2018.

AQUAFLUXOS. **Modelagem Hidrodinâmica da Onda de Cheia Decorrente da Ruptura De Barragem**. Disponível em: <http://www.aquafluxus.com.br/modelagem-hidrodinamica-da-onda-de-cheia-decorrente-da-ruptura-de-barragem/>. Acesso em: 08 nov, 2017.

BRADLOW, D. B. PAMIERI A., SALMAN M. A. S, **Regulatory Frameworks for Dam Safety, A Comparative Study (Law, Justice and Development)** - World Bank Publications, 2002.

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**, 2005, 203 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2005.

BRASIL, L. S. S. et al- **Modelagem unidimensional de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem-estudo de caso: barragem de Rio de Pedras, Minas Gerais, Brasil**. Trabalho apresentado no XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa, 2005.

BRASIL. Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de barragens**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 04 mai, 2017.

BRASIL. Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acesso em: 12 out, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira**. 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+ano+ref,+2015+%28PDF%29/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4?version=1.1> Acesso em: 10 jan, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Renováveis devem manter participação de 43% na matriz energética em 2017**. 2017. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/renovaveis-devemmanter-participacao-de-43-na-matriz-energetica-em-2017. Acesso em: 04 mai, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, **Segurança de Barragem**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/governanca-ambiental/licenciamento-e-avalia%C3%A7%C3%A3o-ambiental/item/10589-seguran%C3%A7a-de-barragens>. Acesso em: 04 mai, 2017.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Proteção e Defesa Civil, Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Orientações para apoio a elaboração de planos e contingência Municipais para barragens**. 2016.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança de Barragens**. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da barragem em Mariana (MG)**. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 143**. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 144**. 2012

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS – manual user**. California, 2010. Disponível em: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2017.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of small dams: a water resources technical publication**. 3. ed. Denver: United States Government Printing Office, 1987. 860 p.

CBGB - Comitê Brasileiro de Grandes Barragens –. **Guia Básico de Segurança de Barragens**. 1999, São Paulo.

CETESB. **Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos**. v. 01. São Paulo, 2003.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 661 p.

CIGB/ICOLD. **Barragens e a água do mundo**. 2007. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/publicacoes/DAMS_AND_THE_WORLDS_WATER_traducao.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2017.

COLLE, G. A., FABIANI, A. L. T., OTA J. J. **Metodologias De Análise de Risco Para Classificação de Barragens Segundo a Segurança**. 2017. XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte, 2017.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Apresentação das Barragens**. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20das%20Barragens>>. Acesso em: 10 mai. 2017.

COMITÊ BRASILEIRO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM. **Guia Básico de Segurança de Barragem**. 2001. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/simposio/Guia%20Seg.%20Barr%20-%20CBDB-SP.pdf>> Acesso em: 11 jun. 2017

CUNGE, J. A., HOLLY, F. M., VERWEY, A. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1980. 420p.

DEFRA/EA. **Flood Risks to People, In: Flood and Coastal Defence R&D Programme.** Reino Unido, 2003.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de Drenagem de Rodovias.** 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006. 333 p.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria 416 de 03 de setembro de 2012. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-416-em-03-09-2012-do-diretor-geral-do-dnpm>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 526 de 09 de dezembro de 2012. Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-526-em-09-12-2013-do-diretor-geral-do-dnpm>>. Acesso em: 11 jun. 2017.

DUFFAUT, P. **The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013.

DUKE ENERGY BRASIL. **ABC da Energia: A história da Duke Energy no Brasil.**

EL PAIS INTERNACIONAL. **Risco de barragem romper faz com que 200.000 deixem suas casas na Califórnia.** Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2017/02/13/internacional/1486970163_671581.html> Acesso em: 20 jul. 2017.

ENEL GREEN POWER. **Reavaliações De Segurança De Barragens Relatório de Avaliação Hidrológico-Hidráulica.** Rio de Janeiro, 2018.

ESPAÑA. Ministerio de Medio Ambiente. **Guia para la elaboración de los planes de emergencia de presas.** 2001.

FILHO, J. M. **Segurança de Barragens - Introdução à Gestão de Riscos.** 2017. Universidade Federal Do Paraná, Paraná, 2017.

FRANCA M, J, R. P. **Caracterização e Modelação Numérica e Experimental Da Ruptura Provocada por Galgamento de Barragens de Enrocamento.** 2002. 112 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002.

FRANCO, C. S. S. P. A. **Segurança de barragens: Aspectos regulatórios.** 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

G1. **Acúmulo de lama é uma das causas da ruptura de barragem.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em->

mariana/noticia/2016/08/acumulo-de-lama-e-uma-das-causas-da-ruptura-de-barragem-diz-auditoria.html>. Acesso em: 12 ago. 2017.

ICOLD. **Dam Failures Statistical Analysis**. Paris, 1995. 73 p

ICOLD. **Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD**. Disponível em: <http://www.icold-cigb.net/GB/dams/dams_safety.asp>. Acesso em 05 jul. 2017.

IFTR. Independent Forensic Team Report. **Oroville Dam Spillway Incident**. 2018.

ITAIPU BINACIONAL. **Bacia do Rio Paraná**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/bacia-do-rio-parana>>. Acesso em: 07 set. 2017.

JUNIOR E. C. - **Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens – UHE Três irmãos estudo de caso**. 2013. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista – São Paulo, 2013.

KELMAN, I. **Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England**. Ph.D., University of Cambridge, Reino Unido, 2002.

LARA, P. G., GOODEL, C., BONUMA, N. B. **Previsão Do Risco De Cota De Inundação Induzido Por Rompimento De Barragens**. Comitê Brasileiro De Barragens XXXI - Seminário Nacional De Grandes Barragens. Minas Gerais. 2017.

Malcolm J. et al. **Twort's Water Supply**. 7ª ed. ELSEVIER, 2015

MASCARENHAS, F.C.B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por ruptura de Barragens**. 1990. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G. **Urban Flood Control through a Mathematical Cell**. In: **Water International Resources**, Vol. 27, Nº 2, p. 208-218, 2002.

MEDEIROS, C. H. A. C. **Um Novo Conceito de Segurança de Barragens baseado na Análise de Probabilidade De Risco**. 1999. 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. São Paulo, 1999.

MENEZES, D. S. A. B. **Classificação dos Danos Decorrentes da Ruptura de Barragens de Acumulação de Água. Estudo de Caso: Barragem de Santa Helena – BA**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) - Universidade Federal Da Bahia, Salvador, 2016.

MESSNER, F., MEYER, V. **Flood damage, vulnerability and risk perception – challenges for flood damage research**, Leipzig, Alemanha. 2005.

MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Manual do MODCEL** – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, 2010.

MIGUEZ, M.G. **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Eber. A. **Livro Hidrologia Estatística**. Minas Gerais: CPRM, 2007. 552 p.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 520 p.

RECLAMATION MANAGING WATER IN THE WEST. **Teton Dam History**. Disponível Em: <<https://www.usbr.gov/pn/snakeriver/dams/uppersnake/teton/index.html>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

REITER, P. **International methods of Risk Analysis, Damage Evaluation and Social Impact Studies concerning Dam-Break Accidents**, Helsinki: PR Water Consulting. 2000.

RESCDAM, **The use of physical models in dam-break flood analysis**. In: **Final Report, Helsinki University of Technology**, Finlândia, 2003.

Secretaria de Estado de Aguas y Costas – Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. – Subdirección General de Gestión del Dominio Público Hidráulico. **Guía Técnica para la elaboración de los Planes de Emergencias de Presas**. Espanha, 2001.

SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G.. **Hidráulica Fluvial**, volume 1. 2ª ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003. 306 p.

SOUSA, M. M. **Avaliação Comparativa De Metodologias De Modelagem Hidráulica 2d e Seu Impacto Na Interpretação e Avaliação De Ondas De Cheia**. 2017. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PEREIRA, G. M. **Descrição de Casos de Ruptura de Barragens a partir da década de 50, em Âmbito Mundial**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Defesa e Segurança Civil) - Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro.

WISEU, T. **Segurança dos vales a jusante de barragens: Metodologias de apoio à gestão do risco**. 2006. 358 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Meio Ambiente) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

ZONENSEIN, J. **Índice de Risco de Cheia como Ferramenta de Gestão de Enchentes**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.