

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA
NA BACIA DO RIO DO PEIXE**

Matheus Willinghoefer

Orientadora: Nadia Bernardi Bonumá

2015.1



**Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA
NA BACIA DO RIO DO PEIXE**

Matheus Willinghoefer

**Trabalho apresentado à Universidade Federal
de Santa Catarina para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental.**

**Orientadora
Professora Doutora Nadia Bernardi Bonumá**

**FLORIANÓPOLIS – SC
JULHO/2015**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Willinghoefer, Matheus

Avaliação do Risco de Rompimento da Barragem de uma
Pequena Central Hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe /
Matheus Willinghoefer ; orientadora, Nadia Bernardi
Bonumá - Florianópolis, SC, 2015.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Ruptura de
Barragem. 3. Onda de Ruptura. 4. Modelo hidrodinâmico
unidimensional HEC-RAS. 5. Classificação do risco e dano
potencial associado. I. Bonumá, Nadia Bernardi. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

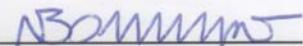
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO RISCO DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM
DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA NA BACIA
DO RIO DO PEIXE

MATHEUS WILLINGHOEFER

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão do
Curso em Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCC II

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Nadia Bernardi Bonumá
(Orientadora)


Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe
(Membro da banca)


Msc. Edney Rodrigues de Farias
(Membro da banca)

FLORIANÓPOLIS – SC
JULHO/2015

*Dedico este trabalho aos meus
pais, por dedicarem à minha
vida, grande parte das suas.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois foi a Ele que eu recorri nos momentos mais difíceis desta caminhada e onde sempre encontrei suporte para continuar em frente. Por mais que por vezes os caminhos por Ele traçados sejam tortuosos e que os obstáculos pareçam intransponíveis, é a superação destas dificuldades que me fortalece e me torna cada vez melhor.

Agradeço a minha família, pois sem eles nada disso seria possível! Aos meus pais, José Rogério Willinghoefer e Leania Fröhlich Willinghoefer, obrigado pelo amor incondicional, por toda a fé e confiança que vocês depositaram em mim, pelas palavras de carinho e incentivo e, principalmente, por terem me ensinado os valores e a ética que eu levarei, não apenas na minha profissão, mas por toda a minha vida. Do fundo do coração, muito obrigado. À minha irmã, Gabriela Willinghoefer, por todos os momentos de companheirismo e de alegria. Você é meu orgulho.

À minha namorada, Anna Paula Brancher, que vivenciou cada momento desta conquista e que esteve sempre ao meu lado me apoiando, trazendo calma e lucidez nos momentos mais difíceis! Obrigado pelo companheirismo, pelos ensinamentos, pelas revisões no meu TCC, enfim, obrigado por ser meu porto seguro, espero que eu consiga retribuir à altura tudo o que fizeste por mim.

À minha orientadora, Professora Nadia Bernardi Bonumá, por me indicar os melhores caminhos no desenvolvimento deste trabalho, agradeço pela orientação e pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço à empresa Engera pelos dados fornecidos para elaboração destes estudo e a todos os colegas que por lá passaram durante meus dois anos de estágio. Se hoje me sinto pronto para dar início à carreira profissional, foi graças aos conhecimentos adquiridos durante este período.

E por fim, agradeço aos amigos que fiz nestes anos de graduação, dentro e fora da UFSC, vocês tornaram esta parte da minha vida inesquecível.

RESUMO

A construção de barragens traz inúmeros benefícios para os seres humanos, desde o seu uso para a geração de energia elétrica até a regularização das vazões para fins de abastecimento e irrigação. Entretanto, há um elevado risco associado a obras deste porte. O rompimento de uma barragem pode trazer impactos catastróficos, que afetam o meio ambiente e a sociedade em geral, causando perdas de ordens social e econômica de grande magnitude. O presente trabalho tem o objetivo de simular, por meio da utilização do modelo unidimensional HEC-RAS, a ruptura de uma barragem situada na divisa entre os municípios de Ouro e Capinzal, no Oeste de Santa Catarina. Com isso, buscou-se avaliar os impactos causados pela propagação da onda de cheia no vale a jusante, com base nas características de uso e ocupação do solo desta região. Foram simulados dois cenários e, em ambos, considerou-se a ruptura total e instantânea. O primeiro cenário é referente a uma condição extrema, em que o rompimento da barragem ocorre durante um pico de vazão com tempo de retorno de 1000 anos. Já na segunda hipótese, a vazão do rio no instante da ruptura é a própria vazão média de longo termo do rio do Peixe, o que caracteriza uma condição de dia seco. De maneira geral, concluiu-se que a onda resultante da ruptura da PCH Águas de Ouro não altera de forma significativa as condições de jusante. No cenário 1, ocorre uma elevação de pouco mais de um metro no nível da lâmina d'água. Já no cenário 2, a onda de cheia não extrapola a calha do rio do Peixe. Assim, classificou-se a estrutura como sendo de risco e dano potencial associado baixos. Os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia podem ser utilizados na elaboração de um plano de ação emergencial, que vise mitigar os efeitos resultantes de eventos desta natureza e, com isso, proporcionar uma maior segurança às populações adjacentes.

Palavras-chave: Ruptura de barragem; Onda de ruptura; Modelo hidrodinâmico unidimensional.

ABSTRACT

Dams provide several benefits to human beings, from electricity generation to flow regularization for supply and irrigation purposes. However, its collapse may cause catastrophic impacts to the environment and society, causing large social and economic losses. The present study aims to simulate, with the one-dimensional model HEC-RAS, the rupture of a dam located by the cities of Ouro and Capinzal, Santa Catarina, Brazil. Based on the region land use, it was possible to evaluate the impacts caused by the flood wave propagation in the downstream valley. Two scenarios were simulated, both considering total and instantaneous failure. The first scenario is related to an extreme condition, in which the dam-break occurs during a flow peak with 1000 years return period. In the second case, applies the long-term average flow of Peixe River as the flow rate at the time of the dam-break, configuring a sunny day dam failure. Results show that the dam-break wave does change not significantly the downstream conditions. In scenario 1, there is a rise of a bit more than one meter in the water level. In the second scenario, the flood wave does not overpass the main channel of Peixe River. Therefore, the structure was classified as low risk and low associated potential damage. The results may be used for the elaboration of an Emergency Action Plan (EAP), to mitigate the effects of dam break events and provide greater security for the surrounding populations.

Keywords: Dam-break; Flood wave; One-dimensional hydrodynamic model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Grandes barragens inauguradas a cada década	32
Figura 3.2 - Barragem de Malpasset antes e depois da ruptura.	34
Figura 3.3 - Barragem de Valmont após a passagem da onda de cheia. 35	
Figura 3.4 - Barragem de Orós após a reconstrução	36
Figura 3.5 - Orifício que provocou o esvaziamento do reservatório.	37
Figura 3.6 - Imagem aérea da UHE Campos Novos após o acidente.	38
Figura 4.1 - Arranjo ilustrativo da PCH Águas de Ouro	47
Figura 4.2 – Perspectiva da barragem da PCH Águas de Ouro.....	48
Figura 4.3 - Localização da PCH Águas de Ouro	49
Figura 4.4 - Localização da Estação fluviométrica Rio Uruguai	51
Figura 4.5 – Área de drenagem da PCH Águas de Ouro.....	52
Figura 4.6 - Condição topográfica a jusante do barramento.....	53
Figura 4.7 - Distribuição das seções topobatimétricas	54
Figura 4.8 - Curva cota x volume do reservatório	56
Figura 4.9 - Uso e ocupação do solo na área diretamente afetada.....	57
Figura 4.10 - Uso e cobertura do solo na área diretamente afetada.....	58
Figura 4.11 - Hidrograma inserido no Cenário 1, com Tempo de Retorno de 1000 anos.....	61
Figura 4.12 - Curva-chave da Estação Rio Uruguai.....	62
Figura 4.13 - Plano de ruptura proposto para a PCH Águas de Ouro ...	63
Figura 4.14 - Sequência de ferramentas aplicada para obtenção da mancha de inundação.....	64
Figura 5.1 - Comparação entre as curvas-chave da estação e do modelo HEC-RAS.....	65
Figura 5.2 - Hidrograma gerado na simulação de ruptura da PCH Águas de Ouro – TR 1000.....	67
Figura 5.3 - Níveis de água no início da simulação (área preenchida) e no momento do pico de vazão (tracejado).....	68
Figura 5.4 - Hidrograma gerado na simulação de ruptura da PCH Águas de Ouro – <i>Sunny day</i>	69
Figura 5.5 - Níveis de água no início da simulação e no momento do pico de vazão.....	70
Figura 5.6 - Variação do nível de água nos primeiros 30 minutos após a ruptura	71
Figura 5.7 - Condição do rio no momento da ruptura (esquerda) e 73 horas após a ruptura (direita)	72
Figura 5.8 - Condição do rio no momento do pico de vazão (esquerda) e 20 minutos após a ruptura (direita).....	73

Figura 5.9 - Condição do rio do Peixe 5 minutos após a ruptura, juntamente com a condição topográfica do vale a jusante.	74
Figura 5.10 - Condição inicial do rio (esquerda) e após a completa dissipação da onda de ruptura da PCH Águas de Ouro (direita).....	75
Figura 5.11 - Condição do rio no momento do pico de vazão (esquerda) e 30 minutos após a ruptura (direita)	76
Figura 5.12 - Condição do rio do Peixe 5 minutos após a ruptura, juntamente com a condição topográfica do vale a jusante.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Vazões de referência	53
Tabela 4.2 - Cota x Volume do reservatório.....	55
Tabela 5.1 - Classificação quanto a categoria de risco da PCH Águas de Ouro.	78
Tabela 5.2 - Classificação quanto ao dano potencial associado	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Classificação das barragens de acumulação de água.....	45
Quadro 4.1 - Classificação quanto ao dano potencial associado - DPA (Acumulação de água).....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CT	Características Técnicas da estrutura
DPA	Dano Potencial Associado da estrutura
EC	Estado de Conservação da estrutura
Epagri	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
Fatma	Fundação do Meio Ambiente
HEC-RAS	<i>Hydrological Engineering Center – River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
PAE	Plano de Ação Emergencial
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PS	Plano de Segurança de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UHE	Usina Hidrelétrica
USACE	<i>United States Army Corp of Engineers</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
2. OBJETIVOS	29
2.1. OBJETIVO GERAL	29
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1. BARRAGENS: ASPECTOS GERAIS E CONTEXTO HISTÓRICO .	31
3.2. SEGURANÇA DE BARRAGEM: CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O TEMA	33
3.2.1. <i>Ruptura de barragem: conceitos básicos e casos históricos</i>	33
3.2.2. <i>Legislação de segurança de barragens: uma visão a nível mundial e a situação no Brasil</i>	38
3.2.3. <i>Plano de Ação Emergencial: conceitos básicos e situação no cenário atual brasileiro</i>	40
3.3. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA: CONCEITOS BÁSICOS E APRESENTAÇÃO DO MODELO	41
3.3.1. <i>HEC-RAS</i>	42
3.4. AVALIAÇÃO DO RISCO: ASPECTOS GERAIS	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
4.2. DADOS HIDROLÓGICOS	50
4.3. BASE CARTOGRÁFICA E GEOMETRIA DO MODELO	53
4.4. COTA x VOLUME	55
4.5. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	56
4.6. CLASSIFICAÇÃO DO RISCO E DANO POTENCIAL ASSOCIADO..	58
4.7. APLICAÇÃO DO MODELO HEC-RAS	60
4.7.1. <i>Determinação dos cenários de ruptura</i>	60
4.7.2. <i>Calibração do modelo</i>	61
4.7.3. <i>Simulação hidrodinâmica</i>	62
4.7.4. <i>Geração da mancha de inundação</i>	63
5. RESULTADOS	65
5.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO	65
5.2. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA	66
5.2.1. <i>Cenário 1 – $Q_{TR}=1000$ anos</i>	66
5.2.2. <i>Cenário 2 – Sunny Day</i>	68

5.3. MANCHAS DE INUNDAÇÃO	72
5.3.1. Cenário 1 – $Q_{TR} = 1000$ anos	72
5.3.2. Cenário 2 – <i>Sunny Day</i>	74
5.4. CLASSIFICAÇÃO DO RISCO E DANO POTENCIAL ASSOCIADO..	
.....	77
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	79
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas transversalmente a cursos d'água, geralmente feitas com o intuito de armazenar água ou rejeitos. A sua utilização em controle de cheias, regularização de vazões para irrigação, abastecimento humano e geração de energia, entre outras funções, contribuiu de forma singular para o desenvolvimento das civilizações, sendo diretamente responsável, inclusive, pela ascensão e queda de muitas delas (JANSEN, 1983).

No Brasil, a construção de barragens teve início após uma grande seca ocorrida na Região Nordeste no ano de 1877 e, com isso foram construídos os primeiros açudes para armazenamento de água. No mesmo período, na região Sudeste do País, era dado início à instalação das primeiras hidrelétricas (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982). Atualmente, a matriz energética brasileira é constituída em mais de 60% de aproveitamentos hidrelétricos, como CGHs, PCHs e UHEs (ANEEL, 2014), além de inúmeras obras destinadas a reservação para consumo humano, contenção de cheias e demais usos.

Apesar dos inúmeros benefícios promovidos pelas barragens, a onda de cheia resultante da ruptura destas estruturas foi responsável por alguns dos mais devastadores acidentes dos últimos séculos (XIONG, 2011). Assim como outras obras do mesmo porte, a segurança absoluta de barragens não pode ser garantida (ALMEIDA, 2001), desta forma, é necessária a definição criteriosa de medidas de segurança, seja em etapas de projeto ou durante a operação do empreendimento.

A preocupação com a segurança de barragens se tornou crescente nas últimas décadas. Em razão disso, foram estabelecidas legislações em diversos países do mundo, com o intuito de regulamentar as etapas de construção e operação e definir planos de ação emergencial (VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012). No Brasil, no ano de 2010, foi sancionada a primeira lei relacionada ao tema, a Lei nº 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010). Entre os instrumentos previstos pelo Art. 6º, destacam-se para este trabalho: a classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado e a necessidade da realização de um Plano de Segurança de Barragem, caso o empreendimento se encaixe entre as categorias de dano médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perdas de vidas humanas, conforme a Resolução nº 143, de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

As medidas em casos de emergência visam fornecer uma maior segurança ao vale a jusante da barragem e, para isso, é necessário que se

tenha conhecimento do comportamento da onda resultante da ruptura do barramento, definindo não apenas sua extensão, mas também seu tempo de chegada, vazões de pico e velocidades de escoamento. Para que se obtenham estas informações, são utilizados modelos matemáticos que permitem simular a ruptura da barragem, o que torna possível avaliar a propagação da onda de cheia e seus efeitos nas regiões adjacentes (CUNGE; HOLLY; VERWEY, 1980 apud VERÓL, 2010). Esta simulação, aliada à classificação da área diretamente afetada quanto ao uso e ocupação do solo, possibilita avaliar o risco ao qual o vale está submetido no caso do rompimento da barragem.

Este trabalho objetivou simular o rompimento hipotético de uma barragem e a consequente propagação da onda de cheia resultante, com o intuito de avaliar a influência no vale a jusante em função do uso e ocupação do solo característicos dessa região, fornecendo subsídios para a realização de um Plano de Ação Emergencial e para a avaliação do risco conforme os critérios gerais estabelecidos pela Resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, em atendimento ao requerido pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. O estudo de caso foi realizado com base na barragem da PCH Águas de Ouro, que será construída entre os municípios de Ouro e Capinzal, no Oeste de Santa Catarina.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da ruptura da PCH Águas de Ouro no vale a jusante da estrutura, baseado na mancha de inundação resultante e no uso do solo característicos da região.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular a onda de cheia resultante do rompimento hipotético da barragem;
- Verificar as áreas atingidas, vazões máximas e tempos de chegada da onda de cheia, para dois cenários de ruptura;
- Classificar a área diretamente afetada quanto ao uso e ocupação do solo;
- Classificar a barragem por categoria de risco e dano potencial associado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BARRAGENS: ASPECTOS GERAIS E CONTEXTO HISTÓRICO

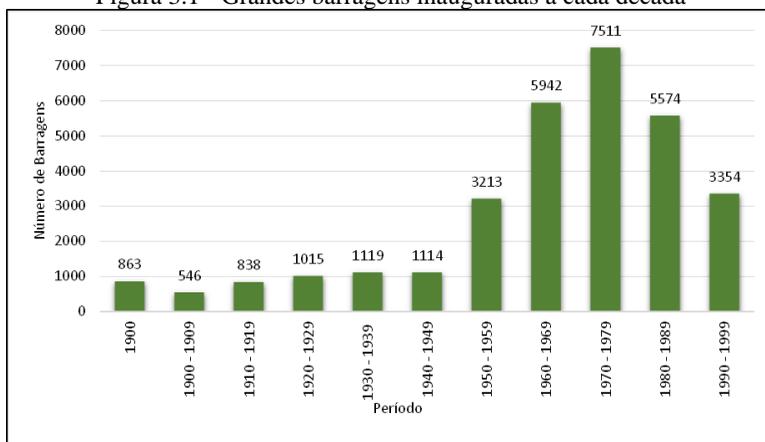
O termo barragem pode ser definido como uma estrutura construída transversalmente a um rio ou talvegue, com finalidade de obter elevação de seu nível d'água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água, seja de regulação das vazões do rio, ou de outro fluido (BRASIL, 2002). Esta definição é complementada ainda por Hulsing (1968), que afirma que barragens são estruturas que formam uma seção de controle na qual a descarga está relacionada com o nível d'água superficial a montante.

Desde o princípio das civilizações, as barragens ofereceram aos seres humanos benefícios essenciais para sua sobrevivência, como a reservação para abastecimento e irrigação, de forma a garantir a subsistência em períodos de seca, o controle de inundações e, mais recentemente, a geração de energia. Os registros das primeiras barragens datam de aproximadamente 5000 anos e as ruínas destas obras ainda podem ser encontradas em países como Índia e Egito (JANSEN, 1983).

A partir do início do século XX, houve um crescimento significativo no número de grandes barragens¹ inauguradas. Este aumento se deu principalmente em função da demanda gerada pelo desenvolvimento industrial e pelo crescimento populacional no período (VERÓL, 2010). Conforme apresentado na Figura 3.1, entre os anos de 1950 e o início da década de 80, o crescimento na inauguração de novas estruturas de barramento foi ainda maior, com um pico de 7511 grandes barragens inauguradas entre os anos de 1970 e 1979. Atualmente, segundo o levantamento mais recente da Comissão Internacional de Grandes Barragens, há 39188 grandes barragens registradas. Destas, 1431 estão localizadas no Brasil (ICOLD, 2014).

¹ O ICOLD (*International Commission on Large Dams*) classifica grandes barragens como aquelas com altura superior a 15 metros, ou aquelas com altura entre 5 e 15 metros e reservatório com mais de 3 km².

Figura 3.1 - Grandes barragens inauguradas a cada década



FONTE: Adaptado de SÓRIA, 2008.

No Brasil, ainda há uma dificuldade muito grande em quantificar o número de barragens existentes e a sua distribuição pelo território nacional. Esta dificuldade resulta principalmente da falta de cadastros por parte dos estados (ANA, 2012). Segundo dados disponibilizados por órgãos fiscalizadores federais e estaduais, dentre as 13.529 barragens existentes, 11.748 são destinadas a usos múltiplos, 1261 para geração hidrelétrica, 264 para rejeitos de mineração e 256 são relativas a armazenamento de resíduos industriais (ANA, 2012).

É notável o grande número de barragens que possuem como destinação final a geração de energia. De acordo com o Banco de Informações de Geração da ANEEL, atualmente existem 1142 aproveitamentos hidrelétricos em operação no Brasil, que somados são responsáveis por 63% da matriz energética nacional. Dentre estes, 189 estão localizados em Santa Catarina, que contribui com 3.183.456 kW de potência. No estado há ainda 36 empreendimentos que estão atualmente em construção ou em etapa de licenciamento.

Desta forma, com a crescente instalação de novos aproveitamentos, aumenta também a preocupação com fatores de segurança, principalmente aqueles relacionados a eventos críticos, como por exemplo a ruptura da estrutura de barramento, tema central deste estudo.

3.2. SEGURANÇA DE BARRAGEM: CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O TEMA

Barragens são obras geralmente associadas a um elevado potencial de risco (BRASIL, 2002). Jansen (1983) afirma que o risco de rompimento de barragens é um dos fardos inevitáveis que a civilização carrega e, desta forma, uma responsabilidade básica da engenharia é a de minimizar estes riscos. A preocupação com a segurança destas estruturas teve início após a ocorrência de alguns acidentes graves, principalmente entre as décadas de 1960 e 1970 (ICOLD, 1995 apud VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012).

A segurança de barragem consiste na condição que visa manter a integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (BRASIL, 2010). Dinçergök (2007) afirma ainda que a segurança de barragem deve contemplar não apenas as boas condições estruturais do empreendimento, mas também mitigar os impactos que possam ocorrer a jusante em caso de ruptura da barragem.

3.2.1. Ruptura de barragem: conceitos básicos e casos históricos

A ruptura de uma barragem consiste na perda da integridade estrutural, podendo ocorrer uma liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório, ocasionada pelo colapso da barragem ou parte dela (BRASIL, 2002). Viseu e Almeida (2001) afirmam que a ruptura pode ser considerada um acidente tecnológico de baixa frequência, mas com consequências potenciais muito significativas no vale a jusante. Quando ocorre a ruptura de uma obra de barramento, as vazões e os níveis resultantes podem ser muito superiores às máximas naturais no trecho a jusante do reservatório, atingindo populações antes a salvo das cheias e, conseqüentemente, potencializa os danos em função do despreparo destas regiões (COLLISCHONN; TUCCI 1997). De acordo com Almeida (2002), a ordem de grandeza da probabilidade de ruptura, por ano, de uma barragem é de 0,000001.

Mascarenhas (1990) divide os principais causadores de ruptura entre dois grupos, aqueles resultantes de causas materiais, como o galgamento (*overtopping*) e entubamento (*piping*) e os resultantes de falhas humanas, como falhas nos procedimentos operacionais e terremotos induzidos, podendo ser causadas por eventos isolados ou pela combinação de mais de um fator.

Carmo (2009) complementa esta divisão, através da classificação da ruptura de acordo com a temporalidade de ocorrência do evento, sendo elas:

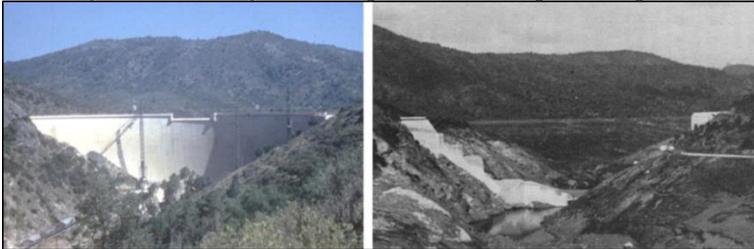
- Ruptura total e rápida (ou instantânea);
- Ruptura parcial e usualmente rápida;
- Ruptura parcial e lenta.

Um dos primeiros acidentes com barragens de que se tem registro ocorreu há aproximadamente 3000 anos antes de Cristo em Wadi el-Garawi, no Egito. Com 11 metros de altura e 107 metros de comprimento, a barragem Sadd el-Kafara foi construída com a intenção de realizar o represamento de água para os trabalhadores de pedreiras localizadas nas proximidades. Entretanto, acredita-se que não foi construído um vertedouro para que fosse possível a liberação do fluxo em períodos de grande precipitação. Desta forma, logo após o término da construção a estrutura sofreu galgamento em função de um evento de cheia (JANSEN, 1983).

Ainda de acordo com Jansen (1983), entre os anos de 1900 e 1980 ocorreram cerca de 200 acidentes envolvendo ruptura de barragens, o que causou um total aproximado de cerca 8000 mortes, além de prejuízos econômicos de grande ordem.

Durante o século 20, diversos acidentes com barragens foram registrados, como por exemplo o rompimento da Barragem Malpasset no ano de 1959 (Figura 3.2), ocasionado devido à natureza geológica da área. Este acidente culminou com um total de 421 mortes. As marcas deixadas pela onda de cheia mostraram que o nível d'água foi elevado mais de 20 metros em relação ao nível normal do rio Le Reyan.

Figura 3.2 - Barragem de Malpasset antes e depois da ruptura.

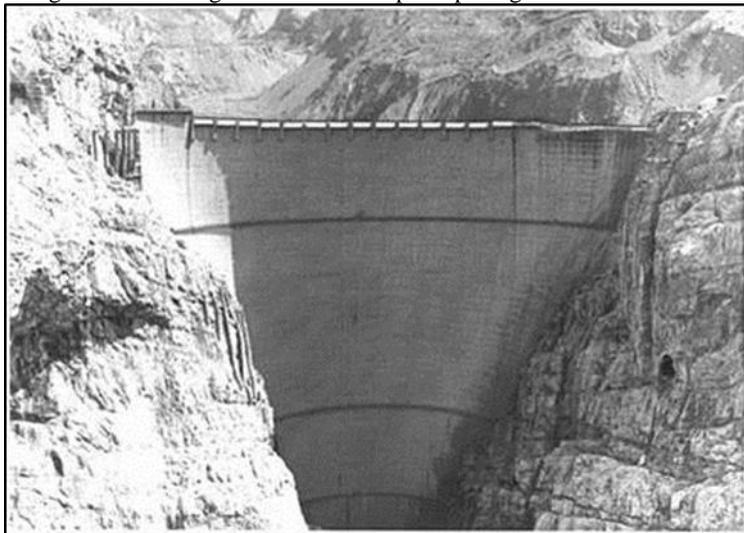


FONTE: DUFFAUT (2013)

Quatro anos depois, em 1963, a Barragem de Vajont, na Itália, foi o local de outro acidente de grandes proporções (Figura 3.3). Apesar de

não ter ocorrido o colapso da estrutura, a onda de cheia, resultante de um deslizamento de terra de aproximadamente 270 milhões de metros cúbicos, ultrapassou em mais de 100 metros a altura da crista da barragem, destruindo quase que inteiramente a cidade de Longarone, localizada logo a jusante da estrutura e atingindo os demais vilarejos próximos. Mais de 2000 pessoas perderam a vida neste desastre, que ficou conhecido como a maior tragédia dos anos 60 (HENDRON e PATTON, 1985).

Figura 3.3 - Barragem de Valmont após a passagem da onda de cheia

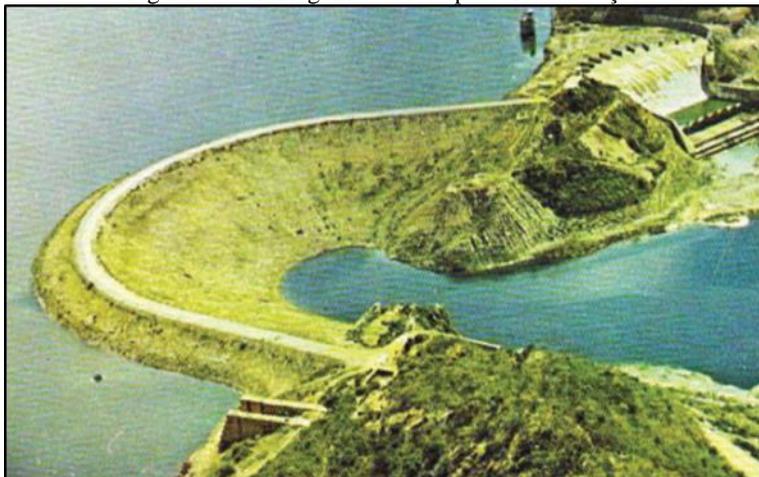


FONTE: ANNOVI (2007) apud BALBI (2008)

No Brasil, o pior acidente ocorrido com barragens foi a ruptura do açude de Orós, no Ceará, em 1960 (VERÓL, 2010). Em função de um evento hidrológico, em que a precipitação foi superior a 635 mm em menos de uma semana, houve a formação de uma brecha na estrutura, ocasionando um galgamento. As estruturas de proteção não foram erguidas em tempo suficiente e, como resultado, formou-se uma brecha de 201 metros de largura. A onda de cheia destruiu o vale a jusante e se estendeu por cerca de 338 quilômetros, atingindo o Oceano Atlântico (MASCARENHAS, 1990). A vazão de pico foi estimada em 9.600 m³/s por volta de 90% do reservatório foi esvaziado (LAURIANO, 2009). Aproximadamente 1000 pessoas morreram em função deste acidente

(MCCULLY, 2001 apud VERÓL, 2010). A Figura 3.4 apresenta a barragem de Orós após a reconstrução.

Figura 3.4 - Barragem de Orós após a reconstrução



FONTE: CBDB (1992) apud LAURIANO (2009).

Outro exemplo é o rompimento da barragem Camará, na Paraíba, que rompeu devido a problemas na rocha de fundação da ombreira esquerda (Figura 3.5), dando origem a um orifício que liberou para jusante cerca de 17 hm³ (MENESCAL; VIEIRA; OLIVEIRA, 2005 apud BALBI, 2008). O rompimento provocou cinco vítimas fatais e deixou mais de três mil desabrigados entre os municípios de Alagoa Grande e Mulungu (VALENCIO, 2006).

Figura 3.5 - Orifício que provocou o esvaziamento do reservatório.



FONTE: BARBOSA et al. (2004) apud BALBI (2008).

Em Santa Catarina, durante a etapa de enchimento da UHE Campos Novos, localizada no rio Canoas, um acidente no túnel de desvio, que deveria estar lacrado, provocou o esvaziamento do reservatório em dois dias. Com o rebaixamento do lago, foi observado um conjunto de trincas, cuja forma e magnitude ainda não haviam sido detectadas (SOBRINHO et al. 2007). A Figura 3.6 apresenta a vista aérea da UHE após o acidente, é possível observar as trincas supracitadas.

A abertura súbita do túnel provocou a liberação de uma vazão inicial de cerca de 4000 m³/s, equivalente a cheia com tempo de retorno de 10 anos. Felizmente, não houve nenhum dano pessoal ou material a jusante. (XAVIER; CORREA, 2008).

Figura 3.6 - Imagem aérea da UHE Campos Novos após o acidente.



FONTE: FILHO (2011).

De acordo com Peck (1984) apud Menescal (2005), provavelmente 9 entre 10 rupturas ocorrem por negligências que poderiam ter sido evitadas, por falta de comunicação entre pessoal envolvido no projeto e na construção ou em função de interpretações excessivamente otimistas das condições geológicas. Desta forma, torna-se essencial a necessidade de fiscalização destas estruturas, estabelecendo leis que regulamentam sua construção e operação de acordo com boas práticas de engenharia (VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012).

3.2.2. Legislação de segurança de barragens: uma visão a nível mundial e a situação no Brasil

Em diversos países, os desastres causados por rupturas de barragens serviram de motivação para que se desenvolvessem leis, normas e regulamentações destinadas a garantir a segurança não apenas da estrutura, mas também do vale (BALBI, 2008). Além disso, fatores como o envelhecimento de algumas barragens e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas com seu projeto, construção e operação também serviram de estímulo para o estabelecimento de leis que contemplem sua

segurança (MENESCAL, 2009 apud VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012).

Segundo Balbi (2008), a legislação de segurança de barragens de qualquer país leva em conta as características estruturais das barragens e a sua capacidade de provocar danos, econômicos, ambientais ou à população a jusante. Estes critérios qualificam quanto a obrigatoriedade de elaboração dos Planos de Ação Emergencial.

A partir dos anos 70, o ICOLD passou a investir fortemente em um programa de segurança de barragens em nível mundial. Dentre os países que possuem legislações específicas sobre o assunto, os principais referenciais são Canadá, Estados Unidos e Austrália. Além destes países, existem outras referências, como a União Europeia (EU), Banco Mundial, a Comissão Mundial de Barragens (CMB) e o próprio ICOLD, que podem servir de exemplo para países que ainda não possuem algum tipo de regulamentação. (VERÓL, 2010).

No Brasil, em 2010, foi sancionada a Lei nº 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). De acordo com o Art. 1º, esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

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 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);

III – reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

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

A classificação quanto ao dano potencial associado foi feita a partir da publicação da Resolução nº 143, de Julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que em seu Art. 5º definiu os critérios gerias a serem utilizados para a classificação como sendo:

I – existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;

II – existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;

III – existência de infraestrutura ou serviços;

IV - existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;

V – existência de áreas protegidas definidas em legislação;

VI – natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e

VII – volume.

A Lei determina ainda a responsabilidade pela segurança de barragem, atribuindo-a ao empreendedor “cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la.”.

Com relação aos instrumentos previstos segundo o art. 6º, dois são de interesse para este trabalho: o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado e o Plano de Segurança de Barragem, contido neste último instrumento o Plano de Ação Emergencial, um dos focos deste trabalho.

3.2.3. Plano de Ação Emergencial: conceitos básicos e situação no cenário atual brasileiro

O Plano de Ação Emergencial (PAE) é o documento que consolida o plano de ação em caso de emergência, de forma a identificar os procedimentos e processos que serão seguidos pelos operadores de barragens e pelas autoridades públicas em situação de emergência (VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012). Além dos procedimentos a serem tomados em situações adversas, Uemura (2009) inclui entre os conteúdos mínimos de um PAE uma relação que contém as pessoas e/ou órgãos envolvidos (lista de notificações) e os mapas de inundação, com os tempos de chegada da onda de enchente.

Rodrigues et al. (2012) afirma que a realização de um plano de emergência requer três fases. A primeira é a mitigação do risco, considerada a aplicação de técnicas adequadas e princípios de gestão para reduzir a probabilidade de uma ocorrência adversa e/ou suas consequências. Esta fase apenas pode ser alcançada com a participação dos variados setores da sociedade. A segunda etapa consiste na resposta adequada aos procedimentos constantes no plano de emergência. Por fim a fase de recuperação do desastre, que implica em um conjunto de medidas que visam a avaliação e reparação dos danos.

Segundo o art. 12 da Lei nº 12.334, o PAE deve conter no mínimo quatro requisitos básicos, sendo eles:

I – identificação e análise das possíveis situações de emergência;

II – procedimentos 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.

Para devida orientação durante a construção do Plano de Ação Emergencial, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002) possui um modelo que engloba todas as obrigações constantes na Lei nº 12.334, de maneira a exemplificar as etapas de desenvolvimento do PAE, ações para diferentes tipos de acidente, medidas de ação preventiva e atribuição de responsabilidades. Ainda segundo o Plano, é necessária a realização de mapas de inundação, onde serão apresentadas as áreas que serão inundadas e o respectivo tempo de chegada da onda de cheia até essas áreas, de forma a facilitar a execução dos planos de evacuação.

No ano de 2012 a Agência Nacional de Águas publicou a Resolução nº 91, que estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento, tanto do Plano de Segurança de Barragem, quanto da Revisão Periódica (ANA, 2012). Além de regulamentar a Lei nº 12.334, a Resolução é mais restritiva, uma vez que exige a elaboração de Planos de Segurança de Barragem mesmo em empreendimentos de baixo risco e dano potencial associado.

3.3. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA: CONCEITOS BÁSICOS E APRESENTAÇÃO DO MODELO

A modelagem matemática é uma importante ferramenta de planejamento e apoio à segurança de barragens, uma vez que permite a simulação da ruptura hipotética de uma estrutura de barramento e a propagação da onda decorrente do acidente (VERÓL, 2010). Modelos hidrodinâmicos aplicam equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, que regem a onda de cheia resultante do colapso de uma barragem, descrevendo a variação do fluxo ao longo do canal (KATOPODES E SCHAMBER, 1983).

O objetivo de se utilizar modelos hidrodinâmicos de propagação de um hidrograma de ruptura é simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem (LAURIANO, 2009), no intuito de avaliar os impactos produzidos pela onda e o potencial risco associado a este evento.

Morris (2000) define as seguintes informações como resultados essenciais que o modelo deve fornecer para qualquer ponto de interesse dentro da área atingida pela onda de cheia:

- Tempo de chegada da onda de ruptura;

- Nível máximo de água;
- Tempo até que se atinja este nível máximo;
- Profundidade e velocidade da onda de cheia;
- Duração da inundação.

A precisão da resposta fornecida varia de acordo com a opção de modelo escolhido, sendo divididos em modelos simplificados, hidrológicos, hidrodinâmicos unidimensionais (1D), hidrodinâmicos quasi-bidimensionais (quasi-2D), hidrodinâmicos bidimensionais (2D) e, finalmente, os modelos hidrodinâmicos tridimensionais (3D) (VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012).

Mascarenhas (1990) afirma que, além da simplificação nos cálculos, a admissão da hipótese de ruptura total e instantânea favorece a segurança. Desta forma, ao tratar-se de um evento em que se pode atingir proporções catastróficas, como o rompimento de barragens, aconselha-se a adoção de posturas conservativas (VERÓL, 2010). Lança (2001) afirma ainda que em estudos comparativos entre modelos unidimensionais e bidimensionais, verifica-se que a onda de cheia propaga-se com maior velocidade e menor amortecimento em modelos 1D, conduzindo a cenários mais catastróficos do que realmente se verifica.

3.3.1. HEC-RAS

Para barragens em concreto, como a que será tema deste estudo, utiliza-se com frequência a ruptura instantânea (BRASIL, 2005). Desta forma, para que seja atingido o cenário mais catastrófico para análise de risco, escolheu-se o modelo numérico unidimensional HEC-RAS (*River Analysis System*), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrological Engineering Center*) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*USACE – United States Army Corp of Engineers*).

O programa possui uma série de aplicações, como a simulação de transporte de sedimentos, modelação de temperatura da água e, desde o ano de 2003, simulação de ruptura de barragens (HU; WALTON, 2008 apud VERÓL; MIGUEZ; MASCARENHAS, 2012). É possível realizar a evolução da ruptura a partir de erosão interna (*piping*) ou por galgamento (*overtopping*), principais causas de rupturas em estruturas desta natureza (SERAFIM, 1981 apud SANTOS; FRANCA; ALMEIDA, 2007).

As equações que governam o modelo hidrodinâmico HEC-RAS são as equações unidimensionais originais de fluxo não permanente em leitos fluviais, desenvolvidas por Adhémar Jean Claude Barre de Saint-

Venant e publicadas em 1870 (LAURIANO, 2009). De acordo com Chaudhry (1993) apud Lauriano et al. (2009), as equações de Saint-Venant, quando trabalhadas sob o aspecto unidimensional, como no modelo em questão, podem ser descritas pelas equações de Conservação da Massa (1) e Conservação da Quantidade de Movimento (2), apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

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

onde:

t = variável independente relativa ao tempo (s);

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

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

g = aceleração da gravidade (m/s²);

h = espessura da lâmina líquida (m);

S₀ = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

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

Além de tratar o escoamento de forma unidimensional, aplicar as equações (1) e (2) ainda traz outras hipóteses simplificadoras, como a distribuição hidrostática de pressões, que assume a inexistência de componentes de aceleração no sentido longitudinal. Neste caso, Mascarenhas (1990) afirma que em situações de escoamento em que haja um ressalto hidráulico negativo, cria-se uma região com fortes acelerações verticais, invalidando a hipótese em questão.

Lauriano et al. (2009) cita ainda a perda de carga estimada pela equação de Manning, a declividade do fundo do canal pequena, o fato do fluido se tratado como incompressível e homogêneo (massa específica constante) e a criação de um perfil uniforme de velocidade na seção transversal do canal, como hipóteses simplificadoras da aplicação das equações (1) e (2) no estudo da propagação de uma onda de cheia proveniente da ruptura de uma barragem.

3.4. AVALIAÇÃO DO RISCO: ASPECTOS GERAIS

A avaliação do risco pode ser definida como o processo de decidir se os riscos existentes são toleráveis e se as medidas de controle de risco apresentadas são adequadas (LAURIANO, 2009). Esta definição é complementada por aquela dada por Almeida (2002), que afirma que a

avaliação do risco associado à segurança de barragens é um processo destinado a identificar, simultaneamente, a extensão e a possibilidade das consequências associadas a acidentes de barragens ou de seus componentes.

De maneira geral, o risco ao vale a jusante de barragens pode ser calculado como a probabilidade de ocorrência de um evento adverso (P_{EVENTO}), como uma cheia extraordinária, por exemplo, combinada com a probabilidade de ruptura dada a ocorrência deste evento ($P_{RUPTURA/EVENTO}$). Assim, no caso específico de barragens, a quantificação do risco é expressa pela equação (3) (VISEU; ALMEIDA, 2011).

$$R_{VALE} = P_{EVENTO} \times P_{\frac{RUPTURA}{EVENTO}} \times \text{Consequências da ruptura} \quad (3)$$

As consequências da ruptura dependem basicamente do grau de perigo associado à cheia, do grau de exposição e da susceptibilidade à destruição ao qual estão sujeitos os indivíduos e os bens a jusante. (VISEU; ALMEIDA, 2011).

No Brasil, a classificação de barragens quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado fica a cargo do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que, através da Resolução Nº 143 de 2012, apresenta os diferentes aspectos, parâmetros e as respectivas pontuações a serem contabilizadas para o cálculo do risco, com vistas a enquadrar a barragem entre as categorias alto, médio ou baixo risco e dano potencial associado de acordo com a condição atual da estrutura.

Para barragens de contenção de água, a Resolução Nº 143 do CNRH classifica o risco de acordo com as características técnicas (CT) da estrutura, sendo elas:

- Altura;
- Comprimento;
- Tipo de barragem quanto ao material de construção;
- Tipo de fundação;
- Idade da barragem;
- Vazão de projeto.

Além das características técnicas, ainda são levados em conta o Estado de Conservação da Barragem (EC) e o Plano de Segurança de Barragem (PS), porém, ambos não serão abordados neste trabalho, visto que a barragem em questão ainda não foi construída.

Já para a classificação de dano potencial associado, os parâmetros estabelecidos são:

- Volume total do reservatório;

- Potencial de perdas de vidas humanas;
- Impacto ambiental;
- Impacto socioeconômico.

O Quadro 3.1 apresenta a classificação utilizada pelos órgãos fiscalizadores, contendo a síntese dos parâmetros, conforme preconizado pela Resolução N° 143.

Quadro 3.1 - Classificação das barragens de acumulação de água

CATEGORIA DE RISCO		Pontos	
1	Características Técnicas (CT)	-	
2	Estado de Conservação (EC)	-	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	-	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		-	
	Faixas de Classificação	CATEGORIAS DE RISCO	
		ALTO	≥ 60 OU EC* ≥ 8 (*)
		MÉDIO	35 a 60
		BAIXO	≤ 35
(*) Pontuação maior ou igual a 8 em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem			
DANO POTENCIAL ASSOCIADO		Pontos	
Faixas de Classificação	ALTO	≥ 16	
	MÉDIO	10 < DPA < 16	
	BAIXO	≤ 10	
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO			
CATEGORIA DE RISCO	Alto / Médio / Baixo		
DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto / Médio / Baixo		

Fonte: Adaptado de CNRH (2012).

Independentemente da definição ou da metodologia que se adote para análise de risco, cada indivíduo ou comunidade possui uma noção subjetiva sobre o tema. Desta forma, a avaliação da percepção é uma questão mais relacionada a psicologia social e necessita de trabalhos de campo para que se tenha clara ideia de como os habitantes encaram o risco. Esta avaliação é crucial para a preparação de medidas de segurança, divulgação de planos de emergência e demais componentes que dependem da resposta direta da população em eventuais situações de crise (ALMEIDA, 2002).

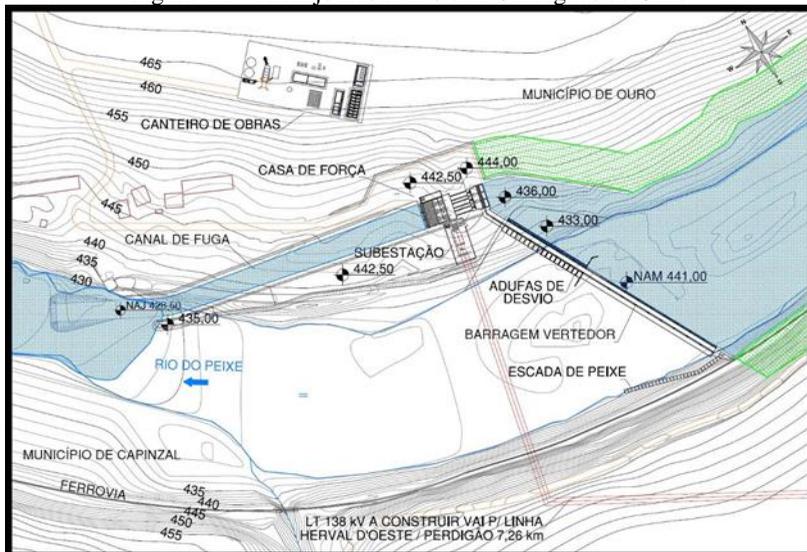
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A barragem tema deste estudo é parte estrutural da PCH Águas de Ouro, prevista para ser instalada na bacia do Rio do Peixe, mais precisamente na divisa entre os municípios de Ouro e Capinzal, região oeste do Estado de Santa Catarina (Figura 4.3). A barragem será construída com base em concreto armado e vertedor soleira livre, dimensionado para suportar uma cheia de projeto com tempo de retorno de 1000 anos.

A potência instalada é de 10,70 MW e a área alagada prevista é de 55,45 ha, sendo que destes, 43,26 ha referem-se à própria calha do rio, o que gera uma área alagada efetiva de 12,19 ha. Atualmente a PCH encontra-se com o Projeto Básico com aceite (ANEEL, 2015) e está em processo de licenciamento na FATMA.

Figura 4.1 - Arranjo ilustrativo da PCH Águas de Ouro



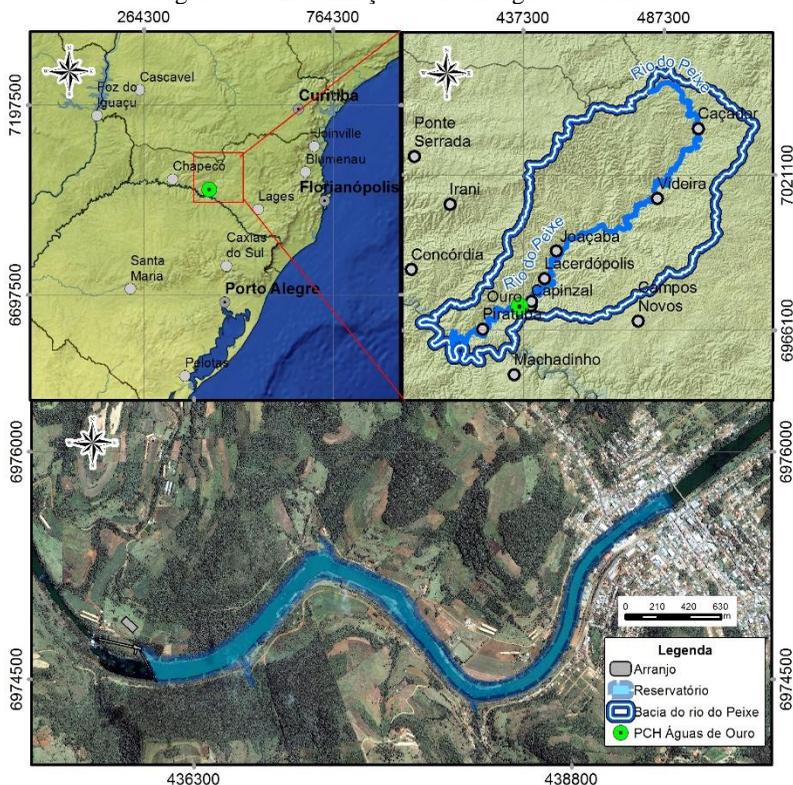
FONTE: Design Head Engenharia e Construtora LTDA. (2012).

Figura 4.2 – Perspectiva da barragem da PCH Águas de Ouro



FONTE: Design Head Engenharia e Construtora LTDA. (2012).

Figura 4.3 - Localização da PCH Águas de Ouro



A região da bacia hidrográfica do rio do Peixe é constituída em grande parte de atividades agropecuárias e de reflorestamento (SPINELLI; MENDONÇA; BONETTI, 2012). De acordo com Lindner (2007), as manchas urbanas na bacia apresentam um valor médio de cerca de apenas 1,6% da área total. Porém, devido a concentração da ocupação ser próxima às margens, a região é frequentemente atingida por eventos de inundação.

Segundo dados da Defesa Civil de Santa Catarina, nos últimos 10 anos os municípios de Ouro e Capinzal declararam situação de emergência em função de eventos de chuva intensa 8 vezes (SANTA CATARINA, 2014). Desta forma, fica evidenciada a fragilidade destes municípios frente as mais sensíveis elevações do nível natural do rio, seja em razão de eventos de chuva intensa ou mesmo em condições atípicas, como a eventual ruptura de uma barragem, o que torna essencial um

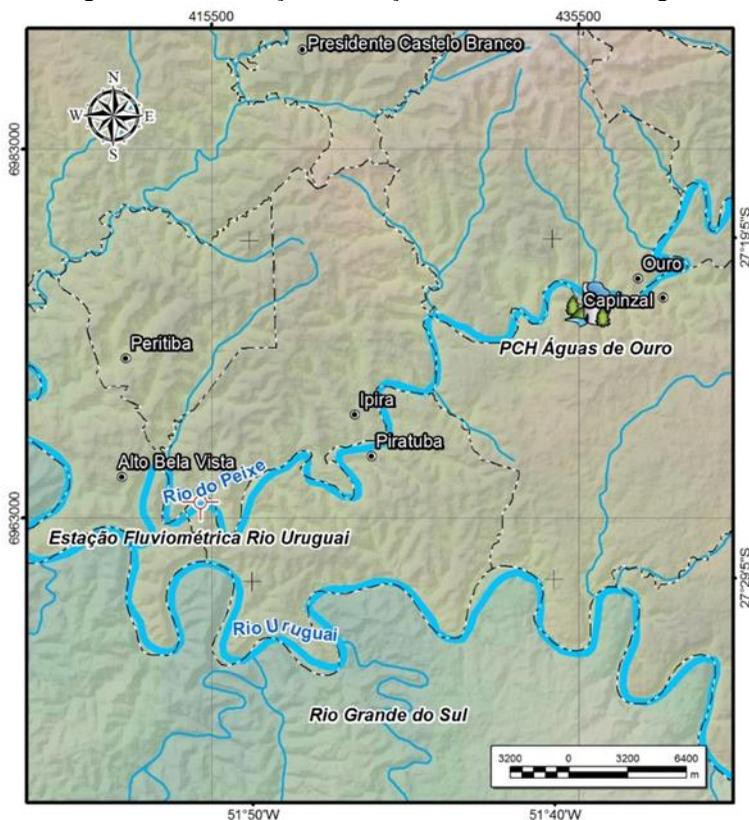
sistema de emergência eficiente, visando a mitigação dos impactos de ordem social e econômica.

4.2. DADOS HIDROLÓGICOS

A modelagem hidrológica objetiva a definição das vazões máximas em diferentes pontos da bacia para os tempos de retorno e cenários pré-determinados. De forma a possibilitar a obtenção destes dados, é necessário que se tenha o histórico das vazões. A fonte de obtenção da série histórica utilizada foi a Agência Nacional de Águas por meio da plataforma Hidroweb.

Dentre as estações fluviométricas localizadas nas proximidades do empreendimento, a que apresenta uma série de dados maior é a Estação Fluviométrica Rio Uruguai (72980000) de responsabilidade da Agência Nacional de Águas. A Estação, localizada no município de Piratuba, possui o registro de vazões entre os anos de 1940 e 2000. Além disso, a área de drenagem correspondente é de 5114 km², valor próximo ao da PCH Águas de Ouro, de 4842 km².

Figura 4.4 - Localização da Estação fluviométrica Rio Uruguai



Em posse dos dados do Hidroweb e da delimitação da área de drenagem correspondente à PCH Águas de Ouro, apresentada na Figura 4.5, foi realizado o estudo de regionalização de vazões, em que as vazões foram transferidas da estação Rio Uruguai para o eixo do barramento. Esta regionalização foi feita por meio da relação de áreas de drenagem, uma vez que estas não diferem em muito e ambas estão localizadas na bacia do Rio do Peixe.

As vazões máximas de interesse para este trabalho são:

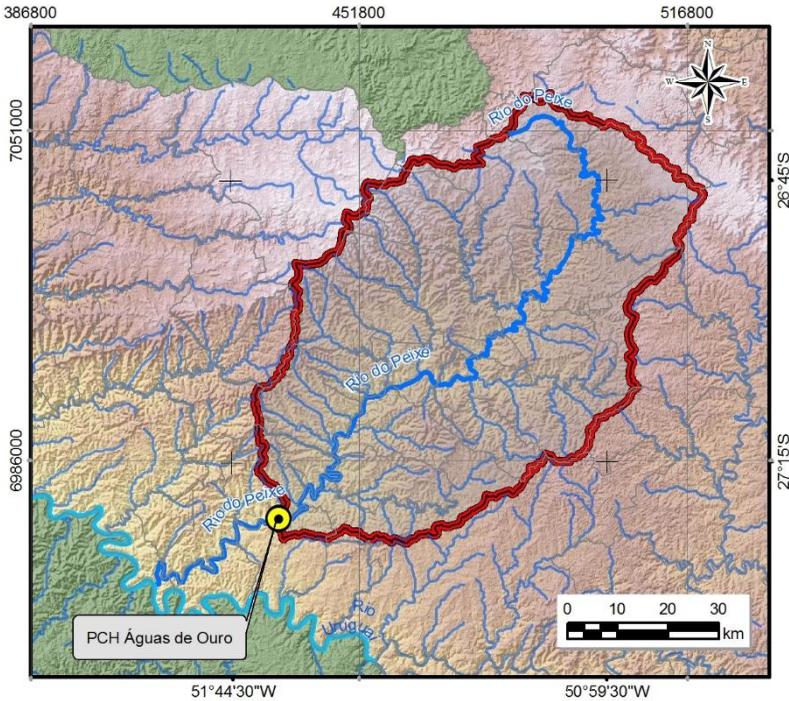
- Q_{TR2} : vazão que é igualada ou superada ao menos uma vez em um intervalo de 2 anos;
- Q_{TR1000} : constitui o cenário crítico, é a vazão utilizada para o dimensionamento das estruturas hidráulicas, como o vertedouro, e

corresponde à vazão igualada ou superada pelo menos uma vez em um intervalo de 1000 anos.

Para a obtenção das vazões máximas, foram utilizadas as máximas vazões anuais do registro histórico de dados. Esta opção tem como justificativa elevar a vazão obtida na distribuição de Gumbel e, conseqüentemente, aumentar o fator de segurança.

Além das vazões máximas, foi calculada a vazão média de longo termo (Q_{MLT}), ou seja, a média de todas as vazões registradas no rio no período em que há observações, de forma a representar estatisticamente a condição média do rio.

Figura 4.5 – Área de drenagem da PCH Águas de Ouro



As vazões de referência foram calculadas por meio da distribuição de Gumbel, e são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Vazões de referência

Vazão de referência	Valor calculado para a Estação Rio Uruguai (m ³ /s)	Vazão corrigida para a área drenagem da PCH Águas de Ouro (m ³ /s)
Q _{MLT}	119,14	112,80
Q _{TR2}	1403,15	1328,52
Q _{TR1000}	5347,35	5062,94

4.3. BASE CARTOGRÁFICA E GEOMETRIA DO MODELO

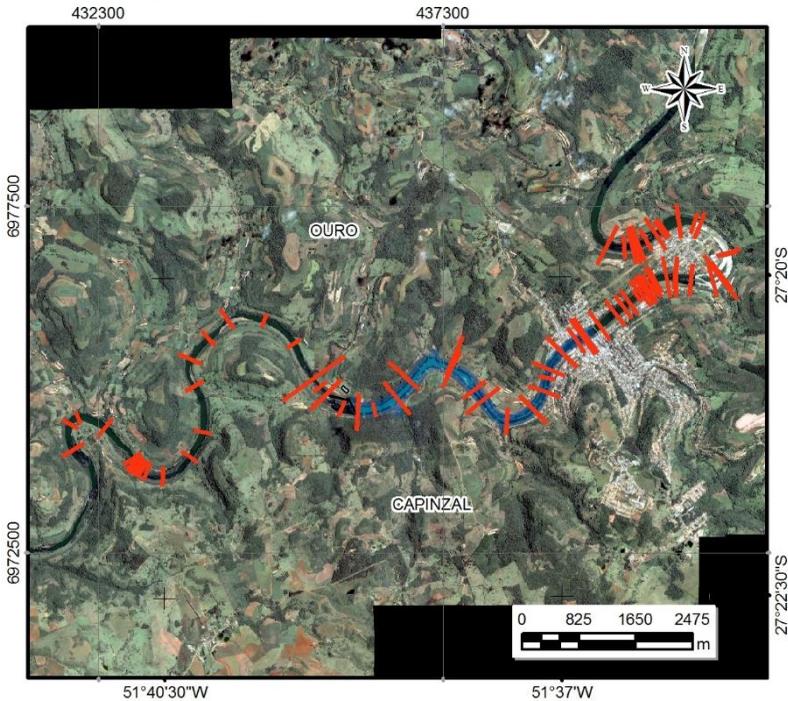
A base cartográfica que abrange a região adjacente à barragem foi fornecida pela empresa Engera – Engenharia e Gerenciamento de Recursos Ambientais. O levantamento foi realizado em escala 1:2.000 e possui curvas de nível mestras e secundárias com intervalos de um metro. A Figura 4.6 apresenta a condição topográfica no local a jusante do barramento.

Figura 4.6 - Condição topográfica a jusante do barramento.



O modelo hidráulico utilizado neste trabalho foi fornecido pela mesma empresa supracitada. São 74 seções topobatimétricas transversais que se estendem desde a região a montante do empreendimento, abrangendo a área urbana dos municípios de Ouro e Capinzal, até aproximadamente 7,5 km a jusante da estrutura de barramento da PCH Águas de Ouro (Figura 4.7).

Figura 4.7 - Distribuição das seções topobatimétricas



Na região da calha do rio, os dados da base cartográfica foram manipulados de acordo com o levantamento das seções topobatimétricas, por apresentarem maior precisão. Assim, foi possível representar de forma mais real a condição topográfica local.

Já para o restante da área, foram utilizadas cartas topográficas da Mapoteca Topográfica Digital de Santa Catarina (EPAGRI/IBGE, 2004) em escala 1:50.000.

A utilização de uma base cartográfica mais precisa na área diretamente afetada é justificada pelo nível de detalhamento esperado para esta região. O uso de bases com escalas muito menores, como é o caso daquela fornecida pela EPAGRI, tende a interferir diretamente no resultado do estudo, sendo assim, as curvas de nível em resolução 1:50.000 serão utilizadas apenas para a representação do restante da área de interesse.

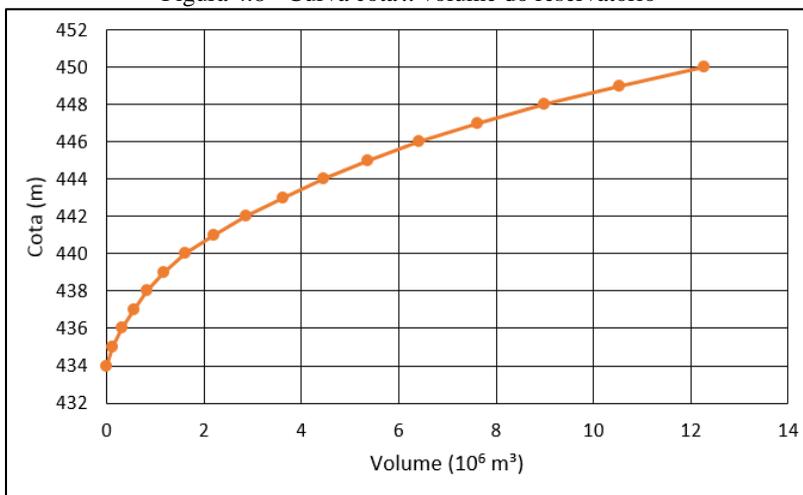
4.4. COTA x VOLUME

Os dados de cota x volume foram levantados a partir dos dados topográficos e, a curva resultante deste cruzamento exprime os dados geométricos do reservatório. Os dados são apresentados na Tabela 4.2, já a curva resultante é demonstrada na Figura 4.8.

Tabela 4.2 - Cota x Volume do reservatório

Cota	Volume total ($\times 10^6$ m ³)
434	0,000
435	0,115
436	0,320
437	0,557
438	0,831
439	1,177
440	1,626
441	2,210
442	2,857
443	3,628
444	4,462
445	5,367
446	6,409
447	7,621
448	9,001
449	10,539
450	12,272

Figura 4.8 - Curva cota x volume do reservatório



4.5. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, foi utilizada a ortofoto de alta resolução fornecida pela empresa Engera, somada à pesquisa em dados secundários acerca do padrão de uso da região em análise. A classificação foi feita de forma manual em escala 1:2.000.

O levantamento da cobertura e do uso do solo indica a distribuição geográfica de acordo com a tipologia de uso, identificada por meio de padrões homogêneos de uso e ocupação do solo, permitindo o agrupamento destes padrões em diferentes classes (IBGE, 2013).

As classes de uso e ocupação do solo foram agrupadas segundo as seguintes categorias temáticas:

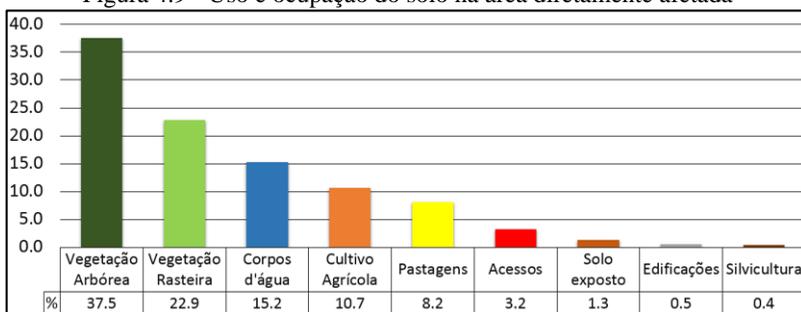
- Acessos: vias destinadas ao tráfego de veículos, pessoas ou animais;
- Áreas construídas: consiste em áreas urbanizadas ou edificações retiradas;
- Corpo d'água: corpos hídricos de natureza lótica, como rios, córregos e ribeirões e lântica, como lagos e lagoas.
- Cultivo agrícola: são áreas destinadas a culturas temporárias ou permanentes.
- Pastagem: área destinada ao apascentamento de rebanhos, podendo ser natural (pasto sujo), nativa ou cultivada.

- Silvicultura: locais destinados ao cultivo agroflorestal ou reflorestamento;
- Solo exposto: áreas desprovidas de cobertura vegetal.
- Vegetação arbórea: áreas cobertas por vegetação de porte arbóreo;
- Vegetação rasteira: locais naturalmente recobertos por vegetação rasteira e/ou arbustiva;

O mapeamento foi realizado na área a jusante do barramento, em um *buffer* de aproximadamente 200 metros a partir do corpo hídrico, com o intuito de analisar a influência da mancha de inundação na cobertura do solo.

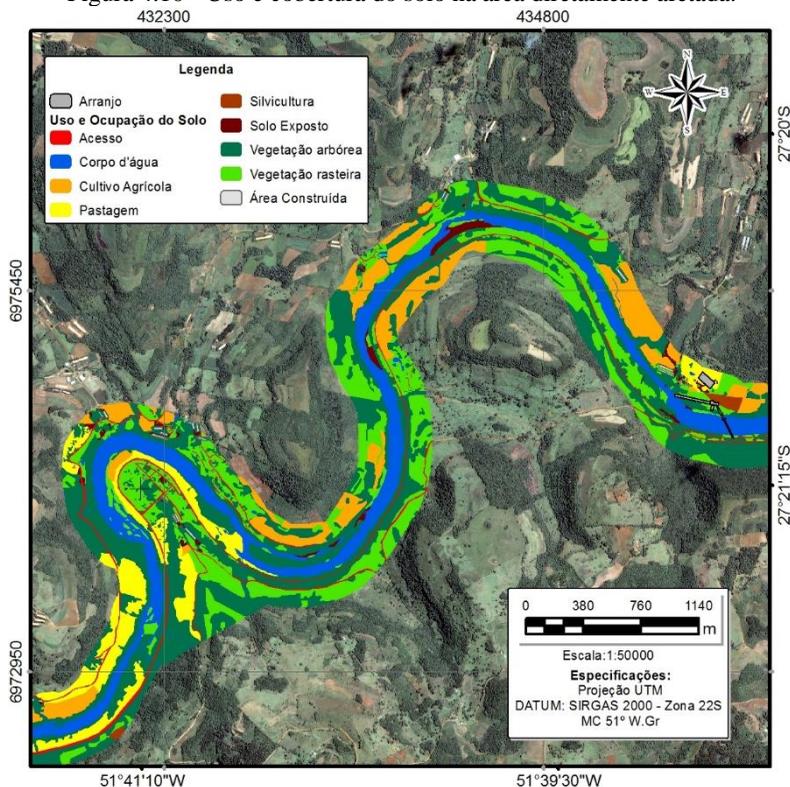
Como é possível observar nas Figura 4.9 e Figura 4.10, a região é predominantemente coberta por vegetação arbórea com 37,5% da área total, seguida da vegetação rasteira (22,9%), pastagens e cultivo agrícola somados totalizam 18,9%, os corpos d'água, representados pelo próprio rio do Peixe, afluentes e lagos naturais ou artificiais somam 15,2% e, o restante da área é composto por solo exposto (1,3%), acessos (3,2%), silvicultura (0,4%) e apenas 0,5% da área é ocupada por edificações.

Figura 4.9 - Uso e ocupação do solo na área diretamente afetada



Com base nos dados de uso e ocupação do solo, percebe-se que a região em questão é predominantemente rural, com poucas edificações no entorno do rio do Peixe.

Figura 4.10 - Uso e cobertura do solo na área diretamente afetada.



4.6. CLASSIFICAÇÃO DO RISCO E DANO POTENCIAL ASSOCIADO

O cruzamento dos dados de uso e ocupação do solo com a mancha de inundação resultante da simulação feita por meio do modelo HEC-RAS, somados ao volume total do reservatório, fornecido pela empresa Engera, possibilitou estimar a potencial perda de vidas humanas, o impacto ambiental e o impacto socioeconômico resultantes da ruptura da barragem, informações estas necessárias para que seja feita a classificação do dano potencial associado, conforme critérios gerais de classificação de barragens da Resolução nº 143, de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Classificação quanto ao dano potencial associado - DPA
(Acumulação de água)

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

Fonte: CNRH (2012).

Já a classificação quanto a categoria de risco foi baseada nas características técnicas do empreendimento, sendo elas:

- Altura da barragem;
- Comprimento;
- Material de construção da barragem;
- Tipo de fundação;
- Idade da barragem;
- Vazão de projeto.

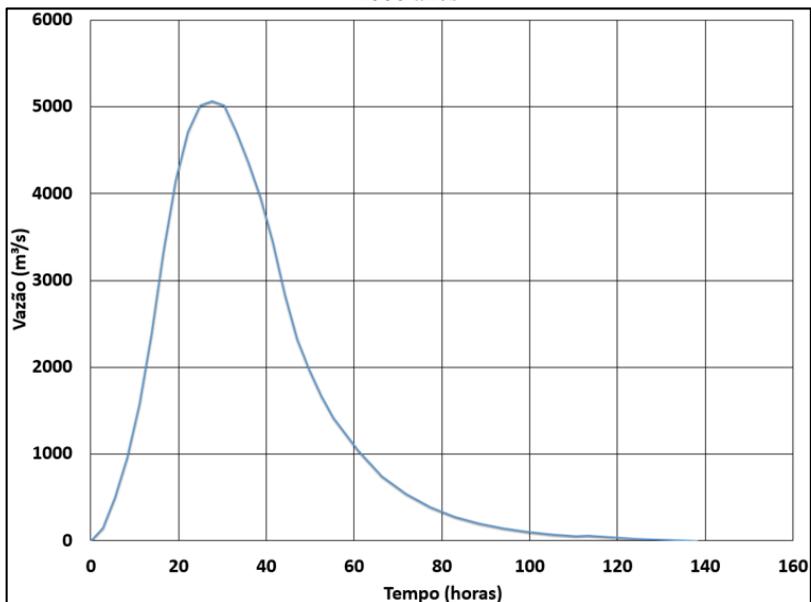
4.7. APLICAÇÃO DO MODELO HEC-RAS

4.7.1. Determinação dos cenários de ruptura

Para avaliar as diferentes respostas da área a jusante à ruptura da barragem, foram determinados dois cenários. Em ambos a ruptura é considerada total e instantânea, ocorrendo a formação completa da brecha em um minuto.

No cenário 1, foi considerado um evento de cheia extremo e, para tal, foi utilizada uma vazão com tempo de retorno de 1000 anos, vazão esta utilizada para o dimensionamento do trecho vertedor da barragem. O hidrograma apresentado na Figura 4.11 foi construído a partir do método do hidrograma unitário triangular. O colapso da estrutura ocorre no momento do pico de vazão, de 5062,94 m³/s.

Figura 4.11 - Hidrograma inserido no Cenário 1, com Tempo de Retorno de 1000 anos



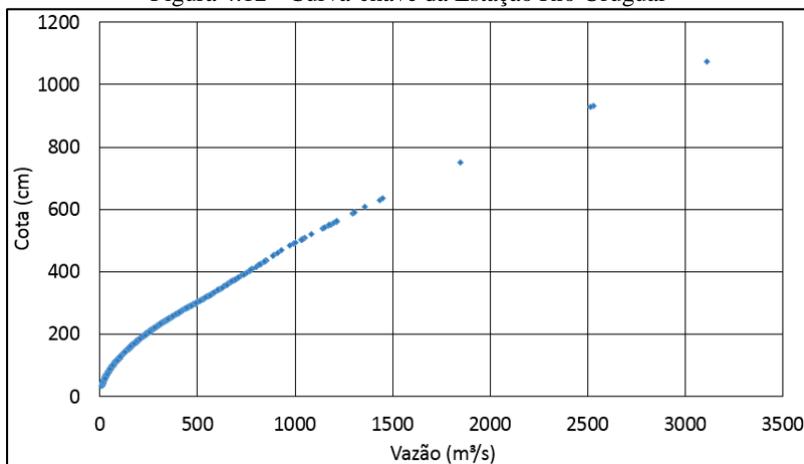
Já no cenário 2, foi considerada a ruptura em um dia seco (*sunny day dam failure*). Para este cenário, foi utilizada a vazão média de longo termo (Q_{mlt}) do rio do Peixe. Para fins de estabilidade do modelo, como condição de contorno de montante foi considerado um hidrograma de vazões com tempo de retorno de 2 anos, porém, a análise é restrita ao período de passagem da onda de cheia resultante da ruptura da barragem.

4.7.2. Calibração do modelo

A calibração foi feita por meio da comparação entre a curva-chave da Estação Rio Uruguai (72980000) e aquela gerada pelo modelo.

Para elaboração da relação cota x vazão, foram escolhidas as medições feitas entre os anos de 1995 e 2000, por se tratar do período mais recente da série histórica e por não haver falhas a serem preenchidas nos dados. A Figura 4.12 apresenta a curva-chave resultante da Estação Rio Uruguai.

Figura 4.12 - Curva-chave da Estação Rio Uruguai



4.7.3. Simulação hidrodinâmica

Após a calibração do modelo, foi realizada a modelagem hidrodinâmica. Os cálculos foram feitos em regime não permanente de escoamento, para que fosse possível realizar a simulação da ruptura da estrutura.

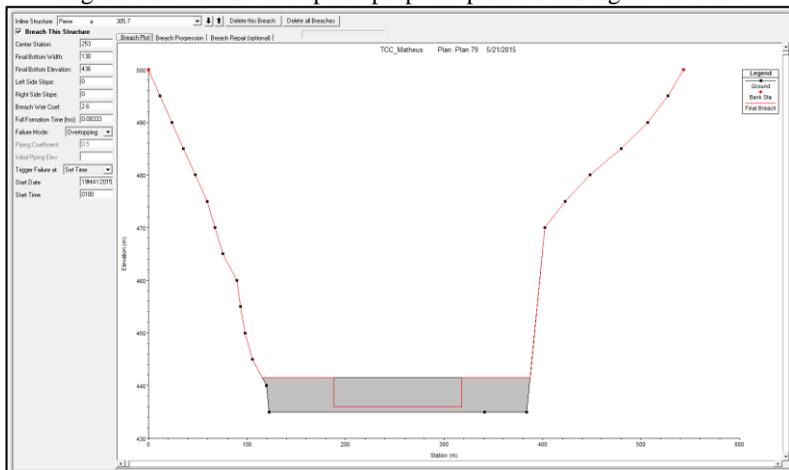
As condições de contorno do modelo foram: a montante os hidrogramas dos tempos de retorno 2 e 1000 anos, de acordo com cada cenário modelado e, a jusante, foi utilizada a declividade entre as seções de montante e jusante, cujo valor calculado foi de 0,001822 m/m.

Concluídas as etapas prévias, foi realizado o plano de ruptura da barragem. Segundo Lauriano (2009), em barragens de concreto não existe uma metodologia específica para prever o crescimento da brecha ao longo da estrutura da barragem. Optou-se pelos parâmetros definidos pela Eletrobrás (2003), que afirma que para barragens do tipo gravidade, em geral a brecha é menor do que a metade do comprimento da crista. Além disso, a declividade lateral da brecha normalmente é igual a zero e, ainda de acordo com a mesma metodologia, o tempo de ruptura varia entre 0,1h e 0,3h.

Para este projeto foi suposta uma ruptura causada por *overtopping*, com progressão linear e sem a realização de reparos na estrutura durante o período simulado. A largura da brecha foi de 136 metros, com

declividade zero, conforme o recomendado pela literatura supracitada. Entretanto, para o tempo de ruptura optou-se por uma situação catastrófica, onde a completa formação da brecha leva apenas 1 minuto. A Figura 4.13 apresenta o plano de rompimento inserido no modelo HEC-RAS.

Figura 4.13 - Plano de ruptura proposto para a PCH Águas de Ouro

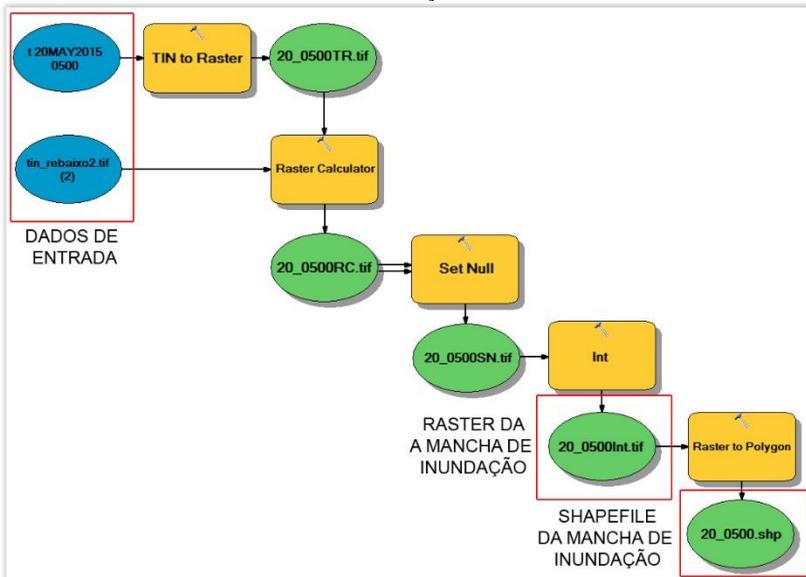


4.7.4. Geração da mancha de inundação

Concluídas as simulações, foram exportados os níveis de água resultantes em diferentes horários para o ArcGIS, um sistema de informações geográficas (SIG), através da extensão HEC-GEORas, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

Para cada perfil importado, foi realizada a comparação entre os níveis obtidos na simulação hidrodinâmica e a superfície do terreno. Para isso, aplicou-se uma sequência de ferramentas, conforme apresentado na Figura 4.14, onde as elipses azuis correspondem aos dados de entrada, os retângulos amarelos são as ferramentas utilizadas e as elipses verdes, os dados de saída de cada etapa.

Figura 4.14 - Sequência de ferramentas aplicada para obtenção da mancha de inundação



5. RESULTADOS

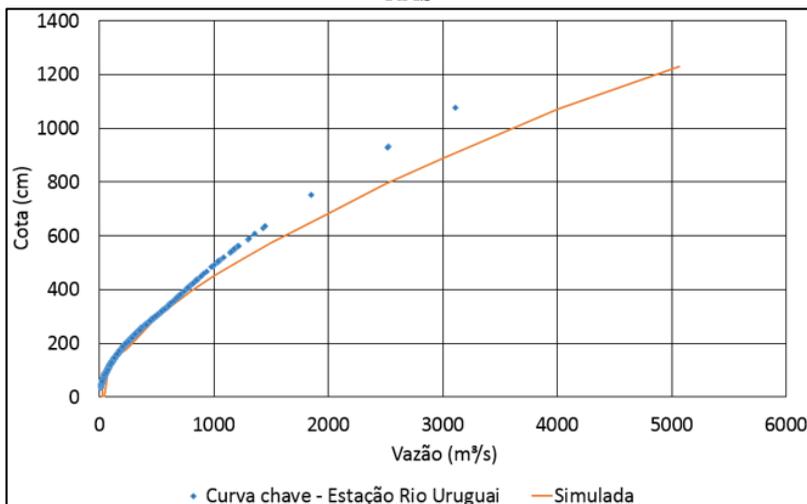
5.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO

A simulação para calibração do modelo foi realizada em regime permanente de escoamento, com vazões que variaram entre 1 e 5062,94 m³/s. A curva-chave foi baseada nos dados de profundidade registrados na seção 327,5, por apresentar um perfil geométrico mais próximo à seção transversal da Estação Rio Uruguai.

Conforme apresentado na Figura 5.1, houve boa resposta nas vazões iniciais, porém, a partir de 500 m³/s foi necessário ajustar o coeficiente de rugosidade do canal. Ainda assim, em eventos de vazão mais elevada, o modelo tende a subestimar os valores de cota.

Além de a diferença geométrica e a distância entre as seções conhecidas interferirem no resultado da calibração, Souza, Collischonn e Tucci (2007) citam ainda que a não inclusão de contribuições lineares ao longo do rio, bem como a não consideração de tributários de menor porte (principalmente pela ausência de dados), podem explicar o valor inferior calculado pelo modelo.

Figura 5.1 - Comparação entre as curvas-chave da estação e do modelo HEC-RAS



5.2. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Após a definição dos cenários a serem simulados e da calibração do modelo ter sido concluída, foi dado início à simulação da ruptura da PCH Águas de Ouro.

Para aprimorar a estabilidade e a precisão numérica do modelo, USACE (2014) recomenda que o intervalo de tempo computacional seja definido de maneira a satisfazer a Condição de Courant, conforme apresentado na equação [4].

$$C = \frac{V_w \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 1 \quad (4)$$

onde:

C = número de courant;

V_w = velocidade da onda;

ΔT = passo tempo;

Δx = distância média entre as seções.

Desta forma, foi calculada a condição de Courant utilizando-se a distância média entre as seções, de 208,25 metros, e a velocidade da onda, calculada como sendo a média das velocidades máximas multiplicado por 1,5 (USACE, 2014), o que resultou em 5,53 m/s para o cenário 1 e 3,54 m/s para o cenário 2. O intervalo computacional utilizado em ambos os cenários foi de 20 segundos, fornecendo um número de Courant de 0,53 no cenário 1 e 0,34 no cenário 2, o que satisfaz a condição exigida.

Em ambos os cenários, o período simulado foi de 139 horas, ou seja, pouco mais de 5 dias. Este tempo foi suficiente para a passagem da onda de cheia e reestabelecimento das condições normais de vazão do corpo hídrico.

5.2.1. Cenário 1 – $Q_{TR}=1000$ anos

No cenário 1, a ruptura ocorreu 28 horas após o início da simulação, coincidindo com a vazão máxima do hidrograma inserido no modelo, de 5062,94 m³/s.

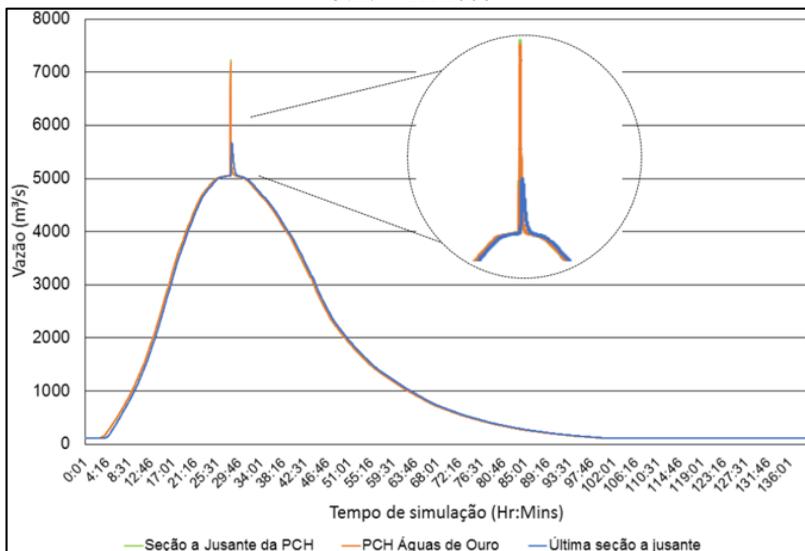
Com esta configuração, o pico de vazão do hidrograma resultante foi de 7238,56 m³/s e ocorreu 5 minutos depois do rompimento da estrutura na seção localizada imediatamente após a barragem. Na seção mais a jusante do modelo, localizada a 7 km da PCH Águas de Ouro, a

vazão máxima foi de 5622,96 m³/s e ocorreu 17 minutos após o momento da ruptura.

A Figura 5.2 apresenta os hidrogramas de cheia em diferentes seções do modelo. No gráfico é possível observar a vazão de pico, caracterizada por uma linha verde no topo do gráfico, pouco acima da vazão máxima registrada na seção da PCH Águas de Ouro. Além disso, é possível verificar a amenização da onda de cheia entre as seções próximas ao ponto de ruptura e àquela localizada a extrema jusante.

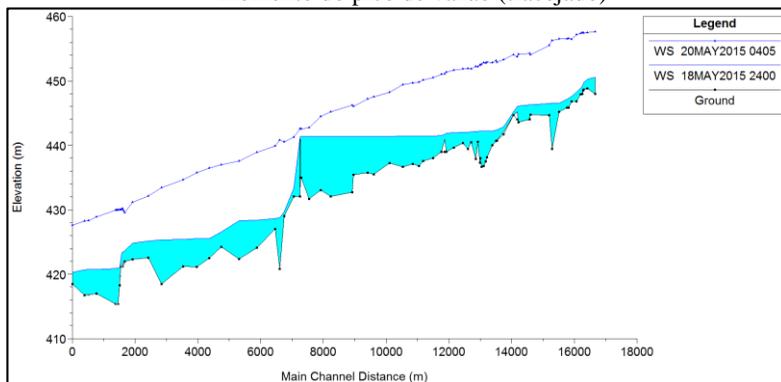
O corpo d'água retorna às condições normais de vazão 73 horas após a ruptura da estrutura.

Figura 5.2 - Hidrograma gerado na simulação de ruptura da PCH Águas de Ouro – TR 1000



Com relação aos níveis de água, comparou-se a altura da coluna d'água no início da simulação e no momento do pico de vazão. A variação média foi de 8,45 metros, sendo a diferença mínima de 1,21 metro, na seção imediatamente a montante e a máxima de 12,1 metros, na seção localizada 450 metros a jusante da PCH Águas de Ouro. A Figura 5.3 apresenta a variação do nível da lâmina d'água no momento da simulação (região preenchida) e cinco minutos após a ruptura (linha superior).

Figura 5.3 - Níveis de água no início da simulação (área preenchida) e no momento do pico de vazão (tracejado)



5.2.2. Cenário 2 – *Sunny Day*

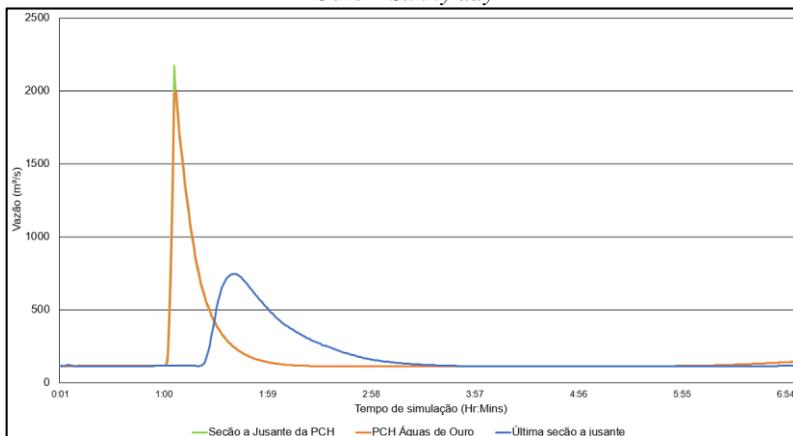
Conforme descrito no item 4.7.1, no cenário 2 foi proposta uma ruptura *sunny day*. Nesta condição, a vazão do rio no momento do rompimento corresponde à vazão média de longo termo do corpo hídrico, de 112,8 m³/s.

Neste cenário, a vazão de pico no momento da ruptura foi de 2169,93 m³/s e, assim como no Cenário 1, ocorreu 5 minutos após o momento da formação da brecha na mesma seção, localizada imediatamente a jusante da estrutura. Na seção final do modelo, a vazão máxima foi de 745,95 m³/s e ocorreu 39 minutos após o rompimento.

A Figura 5.4 apresenta os hidrogramas de cheia em diferentes seções do modelo. Como neste cenário o período analisado é menor, é possível observar de forma mais precisa o tempo que a onda de cheia leva para atingir o final do modelo e a dissipação que ela sofre durante este percurso.

O corpo d'água retorna às condições normais de vazão cerca de 1 hora e meia após a ruptura.

Figura 5.4 - Hidrograma gerado na simulação de ruptura da PCH Águas de Ouro – *Sunny day*



Assim como no Cenário 1, comparou-se a altura da coluna d'água no início da simulação e no momento do pico de vazão. Como neste cenário não ocorre um aumento no nível de água antes da ruptura, a variação a montante da barragem é negativa, pois ocorre uma transferência de massa no sentido de jusante. A máxima variação de nível após a PCH Águas de Ouro ocorreu na mesma seção do cenário anterior, localizada a 450 metros depois da estrutura de barramento, porém, na condição atual a elevação foi de 3,41 metros.

A Figura 5.5 apresenta a variação do nível da lâmina d'água no momento da simulação (região preenchida) e cinco minutos após a ruptura (linha pontilhada). Já na Figura 5.6 é possível acompanhar a variação da onda de cheia resultante nos primeiros trinta minutos após a ruptura.

Figura 5.5 - Níveis de água no início da simulação e no momento do pico de vazão

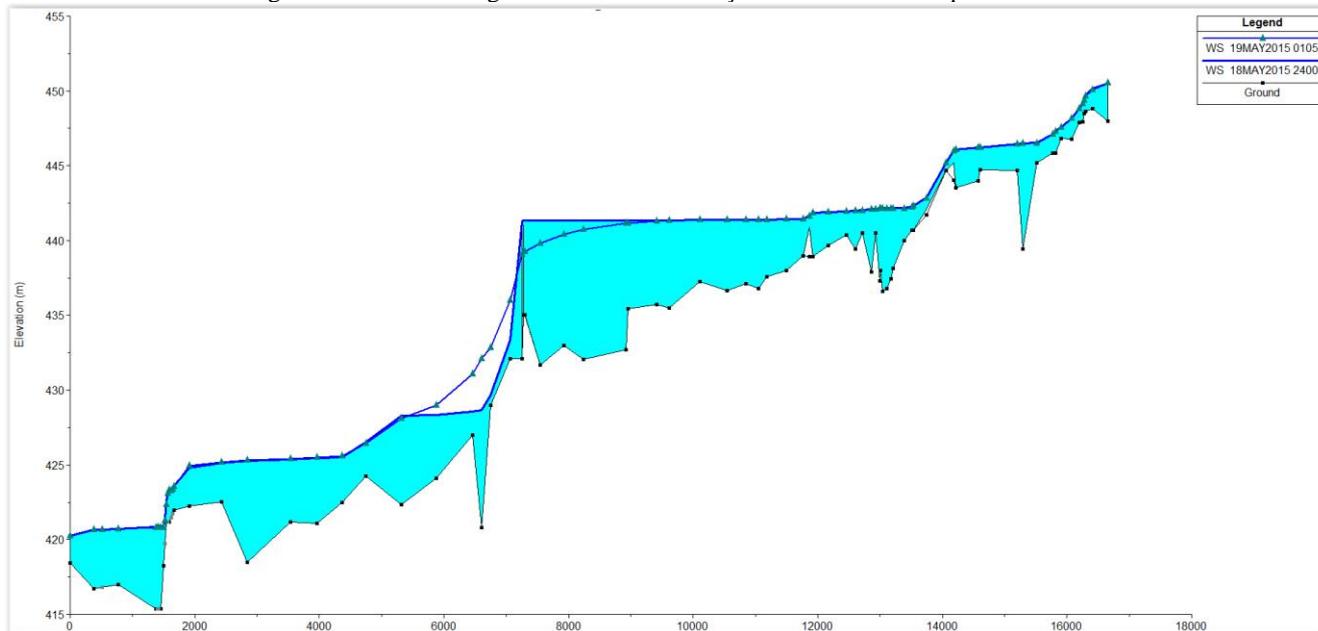
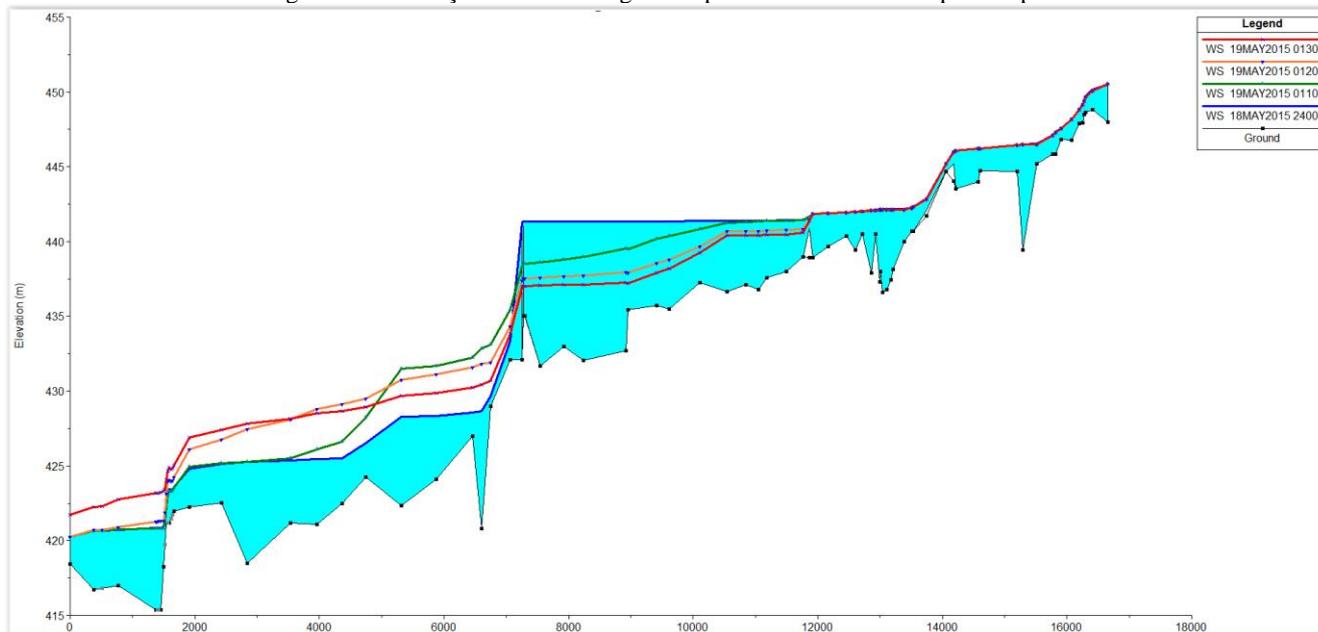


Figura 5.6 - Variação do nível de água nos primeiros 30 minutos após a ruptura

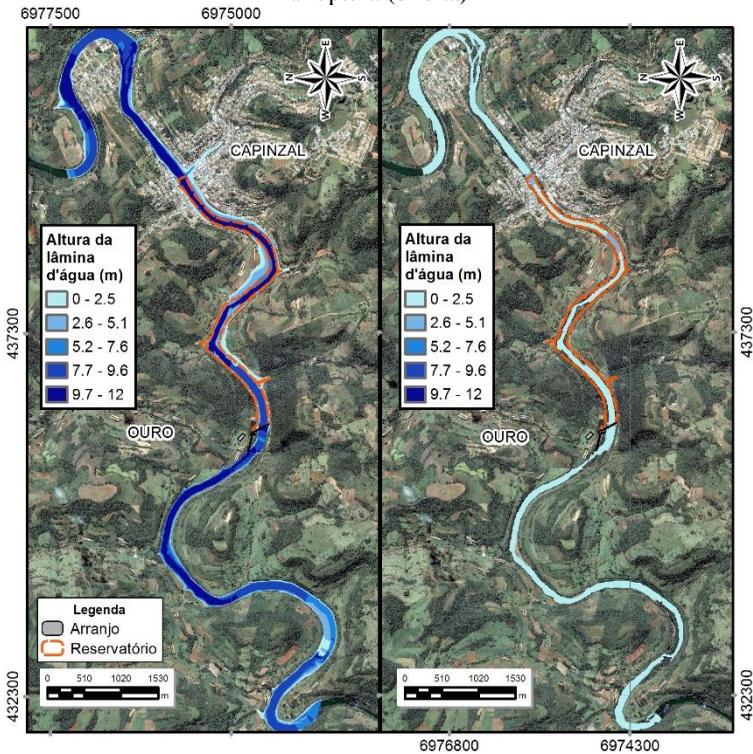


5.3. MANCHAS DE INUNDAÇÃO

5.3.1. Cenário 1 – $Q_{TR} = 1000$ anos

Para o cenário 1, foram analisadas as condições do rio em 4 diferentes horários. A Figura 5.7 apresenta dois momentos opostos: no primeiro, o corpo hídrico no instante da ruptura (esquerda), com a vazão do rio sendo aquela calculada para tempo de retorno de 1000 anos e, ao lado, o corpo hídrico 73 horas após a ruptura, já com a vazão média de longo termo reestabelecida e a influência da onda de cheia totalmente dissipada.

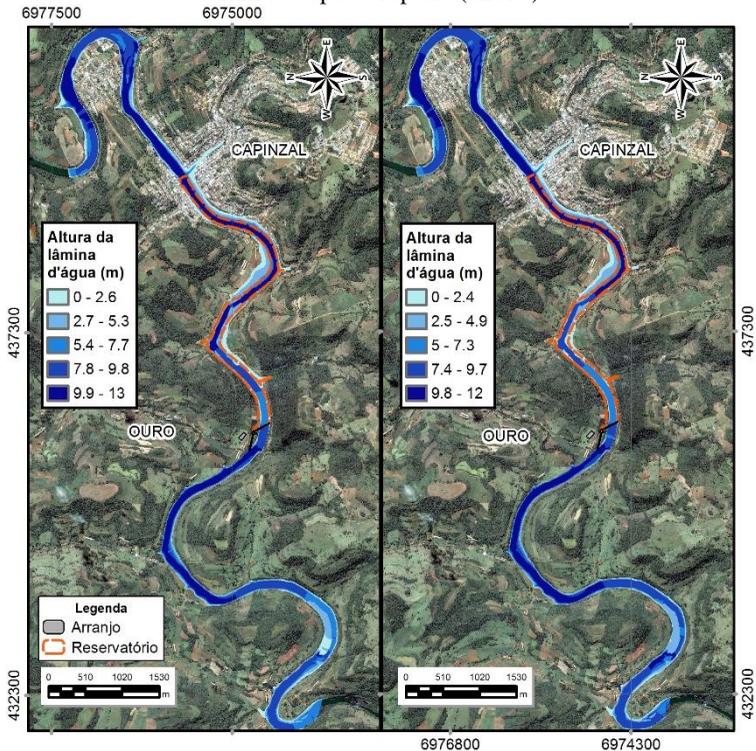
Figura 5.7 - Condição do rio no momento da ruptura (esquerda) e 73 horas após a ruptura (direita)



Já na Figura 5.8, é possível observar o avanço da onda de cheia. A imagem da esquerda apresenta o pico de vazão, registrado 5 minutos após o rompimento da PCH Águas de Ouro. O quadro da direita, por sua vez,

demonstra a onda de cheia 20 minutos após a ruptura, logo após o pico de vazão registrado na última sessão do modelo.

Figura 5.8 - Condição do rio no momento do pico de vazão (esquerda) e 20 minutos após a ruptura (direita)



A onda resultante da ruptura da barragem não altera de forma significativa a condição de jusante, pois a altura da lâmina de água é elevada em apenas 1,2 metro no momento do pico de vazão. Desta forma, o impacto mais significativo acaba sendo em razão da própria condição de cheia em que o corpo hídrico se encontra. A Figura 5.9 apresenta a condição do rio 5 minutos após a ruptura, juntamente com a topografia do vale.

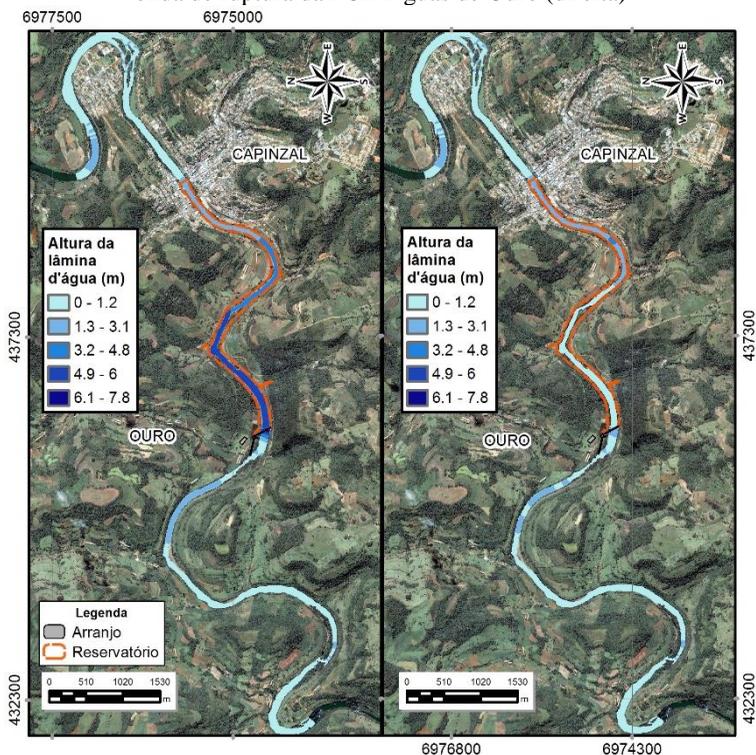
Figura 5.9 - Condição do rio do Peixe 5 minutos após a ruptura, juntamente com a condição topográfica do vale a jusante.



5.3.2. Cenário 2 – Sunny Day

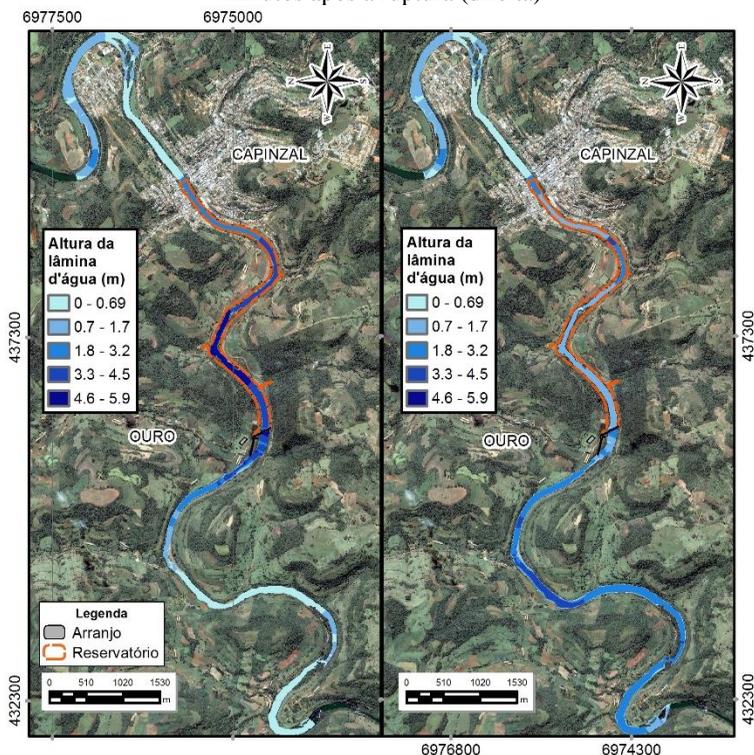
Assim como no cenário 1, na ruptura em dia seco foram analisadas as condições do rio em 4 diferentes horários. A Figura 5.10 apresenta, no quadro esquerdo, o modelo na condição inicial, antes do rompimento da PCH Águas de Ouro. Já o quadro ao lado mostra a condição do corpo hídrico após a completa passagem da onda e, é possível observar a diminuição considerável no nível do rio na região do reservatório.

Figura 5.10 - Condição inicial do rio (esquerda) e após a completa dissipação da onda de ruptura da PCH Águas de Ouro (direita)



Já na Figura 5.11, pode-se avaliar o avanço da onda de cheia. A imagem da esquerda apresenta o pico de vazão, registrado 5 minutos após o rompimento da PCH Águas de Ouro. O quadro da direita, por sua vez, demonstra a onda de cheia 30 minutos após a ruptura. Como neste cenário ocorre uma variação de nível de água de até 3,4 metros, graficamente a alteração ao longo do tempo é mais perceptível.

Figura 5.11 - Condição do rio no momento do pico de vazão (esquerda) e 30 minutos após a ruptura (direita)



Mesmo com a alteração mais abrupta da linha d'água em comparação com o cenário 1, a condição topográfica do vale a jusante ameniza consideravelmente os efeitos da onda resultante do rompimento. Na Figura 5.12, é possível perceber que o nível d'água não transcende a calha do rio e, desta forma, não atinge as vias e estruturas localizadas próximas à margem do rio do Peixe. A elevação da onda aumenta em 3,4 metros o nível de água no momento do pico de vazão.

Figura 5.12 - Condição do rio do Peixe 5 minutos após a ruptura, juntamente com a condição topográfica do vale a jusante.



5.4. CLASSIFICAÇÃO DO RISCO E DANO POTENCIAL ASSOCIADO

Os dados de uso e ocupação do solo foram cruzados com as manchas de inundação do cenário 2. Optou-se por avaliar o cenário em questão para que desta forma seja analisada a influência apenas da onda de ruptura da PCH Águas de Ouro. Assim, não serão considerados os impactos provenientes dos efeitos naturais da cheia.

A classificação quanto ao risco é apresentada na Tabela 5.1. A pontuação total foi de 13 pontos, o que implica em categoria de risco **BAIXO**. Cabe destacar que, como o empreendimento segue em fase de licenciamento, não foram considerados pontos para “Estado de Conservação” e para o “Plano de Segurança de Barragens”. O plano está previsto nos Programas Ambientais, de acordo com o estudo de impacto ambiental apresentado ao órgão ambiental competente, e será executado de acordo com o estabelecido na Resolução nº 91, de 02 de Abril de 2012, da Agência Nacional de Águas.

Tabela 5.1 - Classificação quanto a categoria de risco da PCH Águas de Ouro.

Características Técnicas	PCH Águas de Ouro	Pontuação
Altura da barragem (a)	10,0 metros	0,0
Comprimento (b)	192,0 metros	2,0
Material de construção da barragem (c)	Concreto	1,0
Tipo de fundação (d)	Rocha sã	1,0
Idade da barragem (e)	< 5 anos	4,0
Vazão de projeto (f)	Milenar	5,0
Σ (a até f)		13,0

A classificação quanto ao dano potencial associado é apresentada na Tabela 5.2. A pontuação total foi de 8 pontos, o que implica em categoria de risco **BAIXO**. O resultado do cruzamento com as informações de uso e ocupação do solo demonstrou que não são atingidas áreas residenciais ou acessos, sendo assim foi considerado que o trânsito de pessoas na área afetada é pouco frequente.

Com relação ao impacto ambiental, algumas áreas de vegetação arbórea e rasteira são atingidas, o que classifica o impacto como significativo. Por fim, o impacto socioeconômico é considerado inexistente, uma vez que não são atingidas áreas significativas de pastagem, cultivo agrícola ou áreas edificadas.

Tabela 5.2 - Classificação quanto ao dano potencial associado

Características	PCH Águas de Ouro	Pontuação
Volume total do reservatório (a)	2,15 x10 ⁶ m ³	1
Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Pouco Frequente	4
Impacto ambiental (c)	Significativo	3
Impacto socioeconômico (d)	Inexistente	0
Σ (a até f)		8,0

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com a Resolução nº 143, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a PCH Águas de Ouro é classificada como sendo de risco e dano potencial associado baixos, portanto, não se aplica o estabelecido na Lei nº 12.334, uma vez que esta é utilizada apenas para empreendimentos de risco e dano potencial associado médio ou alto. No entanto, segundo a classificação da Resolução nº 91, de 02 de Abril de 2012 da Agência Nacional de Águas, mais restritiva do que a Lei nº 12.334, a PCH é classificada na categoria E, portanto, deve apresentar um plano de segurança de barragem que contenha as informações gerais, planos e procedimentos, registros e controles e plano de ação de emergência, com periodicidade mínima de revisão da segurança da barragem de 10 anos.

A simulação de rompimento realizada neste trabalho considerou uma ruptura total e instantânea, com o objetivo de analisar a condição mais catastrófica possível. Foram considerados dois cenários, um no qual a ruptura ocorre no momento de um pico de vazão, referente a um hidrograma com tempo de retorno de 1000 anos, e um segundo cenário no qual o rompimento ocorre em uma condição de dia seco, de forma a observar apenas a influência da onda proveniente do reservatório da PCH Águas de Ouro.

No cenário 1 (Q_{TR1000}), concluiu-se que a eventual ruptura da estrutura não provoca uma elevação considerável no nível d'água, desta forma, os impactos são mais sentidos em função da própria condição de cheia, como efeitos naturais de remanso, por exemplo, do que propriamente pela onda resultante do rompimento. Já no cenário 2 (*Sunny day*), a onda de cheia não extravasa a calha do rio do Peixe, atingindo apenas algumas planícies descampadas à beira do rio do Peixe. Isto se dá principalmente em função de a maior porção do vale a jusante ser bem encaixado, com taludes íngremes.

Outro fator que limita o impacto causado pela ruptura é o uso e ocupação do solo da área afetada, caracterizado pela baixa densidade populacional e por não apresentar área de importância socioeconômica significativa. Assim, o impacto seria considerado de baixa magnitude mesmo se a onda ultrapassasse a calha e os prejuízos de maior ordem estariam relacionados apenas aos danos estruturais da própria PCH Águas de Ouro.

Com o intuito de complementar a análise feita neste trabalho, são recomendadas algumas alterações para estudos futuros:

- Estão previstos diversos aproveitamentos hidrelétricos para o trecho do rio do Peixe analisado neste estudo, assim, recomenda-se a avaliação de uma possível ruptura em cadeia e a influência da onda de cheia resultante de tal evento.
- O trecho analisado ficou limitado em função da disponibilidade de dados como ortofotos, topografia e topobatimetria. Para se ter a dimensão exata do impacto causado pela ruptura, o ideal seria estender a área de abrangência do modelo até a divisa entre os núcleos urbanos dos municípios de Ipira e Piratuba a 25 km do eixo do barramento.
- A calibração do modelo foi feita de forma aproximada, uma vez que não existem medições de cota x vazão próximas à PCH Águas de Ouro. Para uma calibração mais efetiva, o ideal seria realizar o levantamento das informações na área de abrangência do modelo, para então proceder com a análise de sensibilidade, ajustando os parâmetros necessários para a simulação.
- A forma como se deu a ruptura, de forma total e instantânea, representa uma situação catastrófica. Para que a simulação represente uma condição mais próxima da realidade, o ideal seria realizar uma avaliação estrutural, que aponte as áreas mais prováveis de ocorrência da ruptura e a forma de progressão da brecha ou do ponto de falência da estrutura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, António Betâmio de. Emergências e Gestão do Risco. In: ALMEIDA, António Betâmio de. **Curso sobre Operação e Segurança de Barragens**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006. Cap. 7.
- ALMEIDA, António Betâmio de. **Risco Associado à Segurança de Barragens**. Lisboa: IST, 2002. 23 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2011**. Brasília: ANA, 2012. 92 p.
- ANA - Agência Nacional De Águas (Brasil). Resolução nº 91, de 02 de abril de 2012. **Estabelece A Periodicidade de Atualização, A Qualificação do Responsável Técnico, O Conteúdo Mínimo e O Nível de Detalhamento do Plano de Segurança da Barragem e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem, Conforme Art. 8º, 10 e 19 da Lei Nº 12.334 de 20 de Setembro de 2010 - A Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB**. Brasília, DF, 11 abr. 2012.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**. 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 29 set. 2014.
- BALBI, Diego Antonio Fonseca. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens**: estudo de caso: Barragem de Peti - MG. 2008. 336 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 55 p.
- BARBOSA, N. P.; MENDONÇA, A. V.; SANTOS, C. A. G.; LIRA, B. B. Barragem de Camará. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia. 2004. (**Relatório**).
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece A Política Nacional de Segurança de Barragens Destinadas à Acumulação de água Para Quaisquer Usos, à Disposição Final Ou Temporária de Rejeitos e à Acumulação de Resíduos Industriais, Cria O Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens e Altera A Redação do Art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, e do Art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de Julho de 2000..** Brasília, DF, 20 set. 2010.

BRASIL, Lucas Samuel Santos 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.. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** . Belo Horizonte: UFMG, 2005. p. 1 - 20.

BRASIL. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Cartaz, 2002. 148 p.

BRUEL, Frank. La catastrophe de malpasset en 1959. Disponível em: <http://ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm>. Acesso em: 28 set. 2014.

CARMO, José Simão Antunes do. **Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente**. 2. ed. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2009. 358 p.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Main brazilian dams: design, construction and performance. ICOLD Publications, Brasil, 1982, 653 p.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. **Estabelece Critérios Gerais de Classificação de Barragens Por Categoria de Risco, Dano Potencial Associado e Pelo Volume do Reservatório, em Atendimento Ao Art. 7º da Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010..** Brasília, DF, 04 set. 2012.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M.. Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p.191-206, jul./dez. 1997. Semestral.

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

DARU, Rubem Luiz et al. Propagação de ondas de ruptura e Plano de Ações Emergenciais – UHE Barra do Braúna. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** . Curitiba: Centro Politécnico Ufpr, 2013. p. 1 - 8.

DESIGN HEAD ENGENHARIA & CONSTRUTORA LTDA.. **Projeto Básico PCH Águas de Ouro**, Rio do Peixe – Bacia do rio Uruguai. Curitiba, outubro de 2012.

DINÇERGÖK, Tuncer. The Role Of Dam Safety In Dam-Break Induced Flood Management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RIVER BASIN MANAGEMENT, 1., 2007, Kos. **Anais...** . Ankara: General Directorate Of State Hydraulic Works, 2007. p. 682 - 697.

DUFFAUT, Pierre. The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**. Wuhan, p. 335-341. out. 2013.

ELETRORÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Brasília: Eletrobrás, 2003. 278 p.

GRAHAM, Wayne J.. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure**: DSO-99-06. Denver: U. S. Bureau Of Reclamation Department of Interior, 1999.

GOUTAL, N. **The Malpasset dam failure** - An overview and test case definition. 4nd CADAM meeting. Zaragoza, Espanha, novembro de 1999, 8 p.

HENDRON, A. J. e PATTON, F. D. **The Vajont slide**, a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. U.S. Army Corps of Engineers Technical Report GL-85-5. Estados Unidos, 1985, 197 p.

Hydrologic Engineering Center. **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual**. 4.1 Davis, CA: U.S. Army Corps Of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2010. 411 p.

Hydrologic Engineering Center. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Davis, CA: U.S. Army Corps Of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2014. 74 p.

HULSING, Harry. **Measurement of peak discharge at dams by indirect methods**: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. 2. ed. Washington, D.C: U.S. Government Printing Office, 1968. 29 p. (Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 2013. 171 p. (Manuais Técnicos em Geociências).

INTERNATIONAL COMISSION ON LARGE DAMS. **Register of Dams: General Synthesis**. 2014. Disponível em: <http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp>. Acesso em: 28 set. 2014.

JANSEN, R. B. **Dams and public safety**. [Washington, D.C.?] : Denver, Colo.: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation ; For sale by the Supt. of Docs., U.S. G.P.O., 1983. xii, 332 p. Disponível em: <<http://catalog.hathitrust.org/Record/006184299>
<<http://hdl.handle.net/2027/uc1.b4199868>> .

KATOPODES, N.; SCHAMBER, D. Applicability of Dam-Break Flood Wave Models. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 109, n. 5, p. 702-721, 1983.

LANÇA, Rui. **Análise do risco associado à rotura da barragem de Fernandilho**: Modelação hidrodinâmica da onda de cheia. Faro: Universidade do Algarve, 2001. 5 p.

LAURIANO, André William. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação Entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LINDNER, E. A. **Estudos de eventos hidrológicos extremos na bacia do rio do Peixe-SC com aplicação de índice de umidade desenvolvida a partir do tank model**. 2007. 215 f. Tese (doutorado) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens**. 1990. 291 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MENESCAL, R. A. **Gestão da Segurança de Barragens no Brasil – Proposta de um Sistema Integrado, Descentralizado, Transparente e Participativo**. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, UFC, Fortaleza, 2009.

MENESCAL, R. A.; VIEIRA, V. P. P. B.; OLIVEIRA, S. K. F. Terminologia para análise de risco e segurança de barragens. In: MENESCAL, R. A. (coord.) **A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005. p. 31-49.

MCCULLY, P., 2001. **When Things Fall Apart**: The Technical Failures of Large Dams – In: *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Cartaz, 2002. 148 p.

PECK, R.B.; 1984. **Judgment in Geotechnical Engineering** – The professional legacy of Ralph B. Peck. John Willey & Sons. 332 p.

RODRIGUES, A. et al. Dam-Break Flood Emergency Management System. **Water Resources Management**, v. 16, n. 6, p. 489-503, 2002/12/01 2002. ISSN 0920-4741.

SANTA CATARINA. DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA. . Decretações de Situações de Emergência e Estado de Calamidade Pública dos Municípios. 2014. Disponível em:

<<http://www.defesacivil.sc.gov.br/index.php/municipios/decretacoes.html?start=5>>. Acesso em: 30 out. 2014.

SANTOS, J. Brito dos; FRANCA, M. J.; ALMEIDA, A. Betâmio de. Risco Associado À Ruptura por Galgamento de Barragens em Aterro. **Ingeniería del Agua**, Barcelona, v. 14, n. 4, p.269-278, dez. 2007.

SCUSSEL, Alexandre. **Santa Catarina conta com novo levantamento aerofotogramétrico**. 2013. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2013/08/16/santa-catarina-Conta-com-novo-levantamento-aerofotogrametrico/>>. Acesso em: 31 out. 2014.

SEVÁ FILHO, Arsênio Oswaldo. **Riscos de Acidentes, De Alterações Hidrológicas e De Sismos Provocados Ou Induzidos Por Represas De Hidrelétricas**: Formulação Teórica, Compilação de Casos no Exterior e no Brasil, e um Alerta Sobre os Projetos no Rio Ribeira de Iguape, PR-SP. Campinas, 2011. 47 p.

SILVA, Laércio Rafael Colucci Marques da. **Estudo sobre o rompimento do barramento de contenção de cheias de Itajubá**: Eixo 3A. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

SNEAD, D. B. **Development and Application of Unsteady Flood Models Using Geographic Information Systems**. Departmental Report (Master of Science in Engineering) - Faculty of the Civil Engineering Department. University of Texas. Austin, 2000, 195 p.

SPINELLI, Kátia; MENDONÇA, Magaly; BONETTI, Carla van Der Hagen Custodio. Eventos extremos mensais e a ocorrência de inundações e estiagens na bacia Rio do Peixe - Santa Catarina. **Geonorte**, Manaus, v. 1, n. 5, p.1011-1023, 2012. Edição Especial 2.

SÓRIA, M. A. Z. (Org.), 2008. **As Barragens e a Água do Mundo**: Um livro Educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. CIGB-ICOLD.

SOUZA, Christopher Freire; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Simulação hidrodinâmica via aquisição remota de dados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** . Bento Gonçalves: IPH-UFRGS, 2007. p. 1 - 12.

SUN, Y. et al. **Theory and application of loss of life risk analysis for dam break**. Transactions of Tianjin University, v. 16, n. 5, p. 383-387, 2010/10/01 2010. ISSN 1006-4982.

VALENCIO, Norma Felicidade Lopes da Silva. **O controle das águas como fator de progresso e de risco**: as representações institucionais dos Grandes Projetos Hídricos no Nordeste. In: III ENCONTRO DA ANPPAS, 2006, Brasília, DF.

VERÓL, Aline Pires; MIGUEZ, Marcelo Gomes; MASCARENHAS, Flávio Cesar Borba. Propagação da Onda de Ruptura de Barragem Através de um Modelo Quasi-2D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p.165-176, 22 nov. 2012.

VERÓL, Aline Pires. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. 2010. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

WISEU, Teresa; ALMEIDA, António Betâmio de. Gestão do Risco nos Vales a Jusante de Barragens. **Territorium**, Coimbra, n. 18, p.33-42, 2011.

XAVIER, Lailton Vieira; CORREA, Carlos. **Acidentes em Barragens Brasileiras: Barragem de Campos Novos**. 2008. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/documentos/CCorreia-Acidente Campos Novos.pdf](http://www.cbdb.org.br/documentos/CCorreia-Acidente_Campos_Novos.pdf)>. Acesso em: 29 set. 2014.

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