



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS



ProfÁgua

MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

**AValiação dos Impactos a Jusante da Barragem Lomba do
Sabão, em Porto Alegre/RS, em caso de rompimento**

BRUNO INOCÊNCIO HENRIQUE



Porto Alegre/RS
agosto de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS A JUSANTE DA BARRAGEM LOMBA DO
SABÃO, EM PORTO ALEGRE, EM CASO DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO**

BRUNO INOCÊNCIO HENRIQUE

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, sob a orientação da Professora Dr^a. Jussara Cabral Cruz.

Porto Alegre/RS
agosto de 2020

CIP – Catalogação na Publicação

Henrique, Bruno Inocencio
Avaliação dos impactos a jusante da barragem Lomba
do Sabão, em Porto Alegre/RS, em caso de rompimento /
Bruno Inocencio Henrique. -- 2020.
116 f.
Orientador: Jussara Cabral Cruz.

Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Gestão e
Regulação de Recursos Hídricos, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Barragem Lomba do Sabão. 2. Rompimento de
barragem. 3. Área de inundação. 4. Valoração de
prejuízos. I. Cruz, Jussara Cabral, orient. II.
Título.

BRUNO INOCÊNCIO HENRIQUE

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS A JUSANTE DA BARRAGEM LOMBA DO SABÃO, EM PORTO ALEGRE, EM CASO DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Jussara Cabral Cruz

Dissertação submetida em 12 de agosto de 2020, obtendo Aprovação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes – UFRGS

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques – UFRGS

Prof.^a Dr.^a Jussara Cabral Cruz – UFSM

A minha avó Enedina - *in memoriam*

Conta as bênçãos, dize quantas são,
Recebidas da divina mão!
Vem dizê-las, todas de uma vez,
E verás, surpreso, quanto Deus já fez!

Hino 63 – Hinário Presbiteriano

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por todas as bênçãos concedidas e pela oportunidade em realizar este trabalho. Agradeço a minha esposa Taís pelo incentivo, compreensão e motivação ao longo de todo mestrado, sobretudo na elaboração deste trabalho. Ao meu cãopanheiro Tom pela companhia durante a elaboração desta dissertação, mesmo que quase sempre estivesse dormindo. Agradeço aos colegas de turma e professores pelos conhecimentos compartilhados, tenho certeza que cresci muito como pessoa e profissional. Agradeço a minha orientadora, professora Jussara, pela paciência, direcionamento e transmissão de conhecimentos. Agradeço a banca examinadora pela disponibilidade. Por último, mas não menos importante, agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos - ProfÁgua, projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015.

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS A JUSANTE DA BARRAGEM LOMBA DO SABÃO, EM PORTO ALEGRE, EM CASO DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO

A barragem Lomba do Sabão localiza-se a montante de Porto Alegre/RS e uma eventual ruptura pode gerar sérios prejuízos à cidade. A elaboração de um Plano de Segurança de Barragens (PSB) e de um Plano de Ações Emergências (PAE) para este barramento é obrigatório por lei e de extrema importância em virtude de sua localização e categoria de risco. O principal objetivo de um PAE é salvar vidas e reduzir os prejuízos causados em caso de ruptura, assessorando o empreendedor nas tomadas de decisão. Para a elaboração do PAE é fundamental que se caracterize o vale a jusante da barragem e que seja elaborado um mapeamento de riscos hidrodinâmicos, bem como o levantamento e localização da população e infraestruturas em risco. Estas informações são fundamentais para que o ente público elabore um Plano de Contingência e Proteção de Defesa Civil (PlanCon) a fim de dar suporte à municipalidade no socorro às vítimas e nas tomadas de decisão. Um dos objetivos desta pesquisa é estabelecer um fluxo de trabalho com o intuito de espacializar a onda de cheia proveniente do rompimento de barragens, especificadamente para a barragem Lomba do Sabão, gerando como produto um mapeamento das zonas de risco hidrodinâmico, da localização das populações e das infraestruturas potencialmente atingidas, de modo que essas informações possam auxiliar na elaboração do PlanCon. Com a aplicação do fluxograma concebido a partir dos resultados do estudo de rompimento com o modelo HEC-RAS 5.03 elaborado por Tschiedel (2017), obteve-se a espacialização da mancha de inundação, bem como os indicadores de perigosidade estática na zona inundada que variou de 0 a 5,75m indicando riscos considerados importantes, e da perigosidade dinâmica que variou de 0,05 a 48,3m²/s, indicando possibilidade de severo grau de destruição em grande parte da área impactada. Ademais, foi possível estimar que cerca de 69 mil pessoas e 30 mil domicílios podem ser diretamente afetados, além da identificação de diversas infraestruturas vitais para o funcionamento da cidade. Outro objetivo é propor um arranjo metodológico para estimar os prejuízos decorrentes do rompimento, o que pode ser útil para balizar a tomada de decisões quanto as medidas que devem ser adotadas com relação a conservação do barramento. No âmbito deste trabalho, o prejuízo estimado em função do rompimento é de aproximadamente R\$ 40 milhões, considerando apenas os danos nas edificações residenciais. Esses resultados podem subsidiar decisões de empreendedores e/ou de entes públicos quanto a necessidade de investimentos, em especial relativos a manutenção, prevenção, ação em caso de acidente – ou até mesmo a consideração de descomissionamento da barragem.

Palavras-chave: Barragem Lomba do Sabão; Rompimento de barragem; Área de inundação; Valoração de prejuízos.

ABSTRACT

The Lomba do Sabão dam is located upstream of city the Porto Alegre/RS and an eventual rupture can cause serious damage to the city. The elaboration of the Dam Safety Plan and the Emergency Action Plan is mandatory by law and important due to its about location and risk category. The main objective of an Emergency Action Plan is to save lives and reduce the damage. To formulate the Emergency Action Plan, it is essential that it characterizes the value of the downstream dam and that a hydrodynamic risk mapping is carried out, survey and location of populations and infrastructure at risk. This information is important for anyone who is the leader in a Civil Defense Contingency and Protection Plan, in order to support problem. One of the objectives of this research is to define a workflow to a proven of dam rupture, specifically for a Lomba do Sabão dam, generating as a product a mapping of hydrodynamic risk zones, the location of dams and infrastructure at risk, in the way that this information can help in preparing the Civil Defense Contingency and Protection Plan. With the application of the flowchart conceived from the results of the study of rupture with the model HEC-RAS 5.03 made by Tschiedel (2017), the spatialization of the flood spot was obtained, as well as the indicators of the static hazard in the flooded area that varied from 0 to 5.75m indicating risks considered important, and the dynamic danger that varied from 0.05 to 48.3m²/s, indicating the possibility of severe degree of destruction in a large part of the impacted area. In addition, it was possible to estimate about 69 thousand people and 30 thousand households can be directly affected, in addition to the identification of several vital infrastructures for the functioning of the city. Another objective is to propose a methodological arrangement to estimate the losses resulting from the disruption, which can be useful to guide the decision making regarding the measures that must be adopted in relation to the conservation of the bus. Within the scope of this work, the estimated loss due to the breach is approximately R\$ 40 million, considering only the damage to residential buildings. These results can support the decisions of entrepreneurs and / or public entities regarding the need for investments, especially regarding maintenance, prevention, action in the event of an accident - or even the consideration of decommissioning the dam.

Key Words: Lomba do Sabão Dam; Dam Break; Flood Area; Valuation of Damages

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS E PRODUTO	17
2.1	<i>Objetivo geral</i>	17
2.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
2.3	<i>Produto</i>	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	<i>Barragem</i>	17
3.1.1	Tipos de barragem de acumulação de água.....	20
3.1.2	Causas e históricos de rompimento.....	22
3.1.2.1	Barragem da Pampulha – Minas Gerais, 1954.....	23
3.1.2.2	Barragem de Orós – Ceará, BRASIL – 1960.....	24
3.1.2.3	Barragem de E. da Cunha e A. Salles – São Paulo – 1977.....	24
3.1.2.4	Barragem de Camará – Paraíba – 2004.....	25
3.1.2.5	Barragem de Algodões I – Piauí – 2009.....	25
3.1.2.6	Barragem do Quati – Bahia – 2019.....	27
3.1.3	Riscos e Barragens	28
3.2	<i>Segurança de Barragens</i>	30
3.2.1	Marco Regulatório	30
3.2.2	A Política Nacional de Segurança de Barragens	33
3.2.3	Discussões atuais sobre a PNSB	40
3.2.4	Plano de Segurança de Barragens.....	43
3.2.5	Plano de Ações Emergências.....	46
3.2.5.1	Conteúdo dos Planos de Ações Emergenciais.....	46
3.2.5.2	Propagação da onda de cheia.....	48
3.2.5.3	Zoneamento de Riscos	51
3.2.5.3.1	Altura máxima.....	52
3.2.5.3.2	Velocidade de escoamento.....	53
3.2.5.3.3	Tempo de chegada.....	54
3.2.5.3.4	Perigosidade em função da profundidade e velocidade.....	55
3.2.6	Proteção e Defesa Civil	57
3.3	<i>Valoração dos prejuízos</i>	61
4	ÁREA DE ESTUDO	65
4.1	<i>Barragem Lomba do Sabão</i>	65

4.2	<i>Estudo de rompimento da barragem Lomba do Sabão</i>	66
5	METODOLOGIA.....	69
5.1	<i>Zoneamento de riscos</i>	69
5.1.1	Zona de Autossalvamento – ZAS	69
5.1.2	Perigosidade estática	69
5.1.3	Velocidade de escoamento.....	72
5.1.4	Perigosidade dinâmica	73
5.2	<i>Caracterização geral do vale</i>	73
5.2.1	Uso e ocupação do solo	74
5.2.2	Populações e domicílios	76
5.2.3	Infraestruturas	78
5.3	<i>Valoração dos prejuízos</i>	79
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
6.1	<i>Zoneamento de riscos</i>	81
6.1.1	Zona de Autossalvamento - ZAS	81
6.1.2	Perigosidade estática	82
6.1.3	Perigosidade dinâmica	83
6.2	<i>Caracterização do vale a jusante</i>	84
6.2.1	Uso e ocupação do solo	87
6.2.2	Demografia e domicílios	90
6.2.3	Infraestruturas	91
6.3	<i>Valoração dos prejuízos</i>	97
7	CONCLUSÃO.....	100
8	REFERÊNCIAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma barragem de terra convencional.....	18
Figura 2 - Distribuição geográfica de grandes barragens.....	19
Figura 3 - Barragem de Camará após o acidente	25
Figura 4 - Barragem de Algodões I	26
Figura 5 - Diagrama de análise da relação entre Perigo, Exposição e Vulnerabilidade	30
Figura 6 - Características de uma barragem que a insere no PNSB	35
Figura 7 - Diagrama com a responsabilidade dos órgãos fiscalizadores	39
Figura 8 - Zoneamento quanto a perigosidade estática	53
Figura 9 - Zoneamento quanto a perigosidade cinemática.....	54
Figura 10 – Questões relevantes para elaboração de uma Plano de Contingência	60
Figura 11 - Localização do Arroio Dilúvio e Barragem Lomba do Sabão.....	65
Figura 12 - Curva cota-volume do reservatório Lomba do Sabão.	66
Figura 13 - Localização das seções consideradas ao longo do Arroio Dilúvio.	67
Figura 14 - Mancha de inundação gerado pelo rompimento da Barragem Lomba do Sabão	68
Figura 15 - Curvas de nível disponibilizadas pelo LABGEO e MDT gerado.	70
Figura 16 - MDE gerado para a mancha de inundação.....	71
Figura 17 - Fluxo de trabalho para obter o MDE da manha de inundação	71
Figura 18 - Fluxograma do cálculo dos prejuízos.....	81
Figura 19 - Localização da Zona Autossalvamento.....	82
Figura 20 - Perigosidade Estática da onda de inundação	83
Figura 21 - Perigosidade Dinâmica para edificações	84
Figura 22 - MDT da bacia do Arroio Dilúvio.	86
Figura 23 - Arroio Dilúvio a montante da Av. Antônio de Carvalho.....	86
Figura 24 - Seção típica do Arroio Diluvio entre as Av. A. de Carvalho e C. Fischer...	87
Figura 25 – Percentual de áreas atingidas pela onda de inundação	88
Figura 26 – Principais tipo de uso das edificações urbanas atingidas.....	89
Figura 27 - Mapa de uso e ocupação do solo da região atingida.	89
Figura 28 - Faixa etaria dos habitantes atingidos.....	90
Figura 29 - Localização da população absoluta atingida por setor censitário.....	91
Figura 30 – Distribuição espacial do custo de reconstrução	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de barragens construídas no mundo até 1982.	22
Tabela 2 - Acidentes relacionados nos RSB's de 2017 e 2018.	27
Tabela 3 - Classificação de risco quanto ao dano potencial associado.	36
Tabela 4 - Somatório dos índices para classificação de risco.	36
Tabela 5 - Índice de Segurança de Barragens - ISR 45	45
Tabela 6 - Nível de Perigo Global da Barragem - NPGB..... 45	45
Tabela 7 - Modelos de simulação para ruptura de barragens.	50
Tabela 8 - Número esperado de vítimas em função do tempo de alerta.	54
Tabela 9 - Risco dinâmico e suas consequências..... 56	56
Tabela 10 - Graduação de perigo para pessoas e edificações..... 56	56
Tabela 11 - Nível de risco hidrodinâmico para edificações e pessoas.	57
Tabela 12 - Tipologia de danos decorrentes de inundações em áreas.	61
Tabela 13 - Seções consideradas no zoneamento de riscos.	67
Tabela 14 - Nível de perigosidade estática da água..... 72	72
Tabela 15 - Variáveis hidráulicas nas seções consideradas.	72
Tabela 16 - Nível de destruição pela velocidade da água.	73
Tabela 17 - Nível de risco hidrodinâmico para edificações e pessoas.	73
Tabela 18 – Domínios e tipos de vegetação e edificações utilizados para a classificação de uso e ocupação do solo da Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre..	75
Tabela 19 - CUB para o Rio Grande do Sul.	79
Tabela 20 - Percentual de dano à edificação dos imóveis padrão..... 80	80
Tabela 21 - Extrato socioeconômica em função da renda média familiar.	80
Tabela 22 - Uso e ocupação do solo da região atingida pela onda de inundação.	88
Tabela 23 - Infraestruturas atingidas pela inundaçã..... 92	92
Tabela 24 - Infraestruturas viárias atingidas.	96
Tabela 25 - Patrimônio Histórico atingido..... 97	97
Tabela 26 - Custos de reforma das edificações residencias por bairro.	98

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABRHidro - Associação Brasileira de Recursos Hídricos

ANA - Agência Naional de Águas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANM - Agência Nacional de Mineração

ART - Anotação de Responsabilidade Técnica

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens

CCR - Concreto Compactado a Rolo

CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica do RS

CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

CIGB - Comissão Internacional de Grandes Barragens

CMA - Comissão de Meio Ambiente

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONFEA – Conselho Federal de Engenharia e Agronomia

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CREA - Conselho Regional de Engenharia e Agronomia

CTAP - Câmara Técnica de Estudos e Projetos

CUB - Custo Unitário Básico da Construção Civil

DAEE/SP - Departamento de Água e Energia Elétrica de São Paulo

DMI - Declaração Municipal das Condições Urbanísticas de Ocupação do Solo

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

GT – Grupo de Trabalho

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICOLD - *International Commission on Large Dams*

ISR - Inspeção de Segurança Regular

LABGEO - Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital de Terreno

NPA - Nível de Perigo de Anomalia

NPGB - Nível de Perigo Global da Barragem

PAE – Plano de Ações Emergenciais

PD – Perigosidade Dinâmica

PE – Perigosidade Estática

PlanCon - Planos de Contingência e Defesa Civil

PNPDEC - Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC)

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PSB - Plano de Segurança de Barragens

PUC/RS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

RMPA - Região Metropolitana de Porto Alegre

RSB – Relatório de Segurança de Barragens

R\$ - Real (moeda)

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SINDUSCON - Sindicato das Indústrias de Construção Civil

SINPDEC - Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil

SNISB - Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USBR - Bureau of Reclamation

ZAS – Zona de Autossalvamento

1 INTRODUÇÃO

As barragens possuem importância indiscutível para a sociedade moderna, sendo fonte confiável de abastecimento de água ao longo dos últimos milênios fornecendo um recurso indispensável para o estabelecimento e progresso de aglomerados urbanos e para o próprio desenvolvimento da humanidade.

Os acidentes com barragens têm se agravado nos últimos anos, destacando-se o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG, da barragem da mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG e da barragem do Quati na Bahia, além de inúmeros outros de pequeno porte ao redor do país.

Considerada como a inserção legal do Brasil na temática de segurança de barragens, a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), determina quais barramentos se enquadram na legislação e devem se submeter aos requisitos da lei. Um destes requisitos é elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB) que pode conter um Plano de Ações Emergenciais (PAE) de acordo com a exigência do órgão fiscalizador em função da categoria de risco da barragem. A elaboração do PAE é obrigatório quando a estrutura for classificada com alto dano potencial associado. As barragens construídas em corpos d'água de responsabilidade estadual, no Rio Grande do Sul, tem como órgão fiscalizador a Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMA), que através da portaria SEMA nº 136/2017 estabelece que barragens cujo reservatório seja superior a 1.500.000 m³ e altura do maciço maior que 9 metros, a elaboração do PSB e do PAE são obrigatórios (SEMA/RS, 2017).

De acordo com Silveira et al. (2015), o PAE tem o propósito de assistir no gerenciamento e dar suporte ao pessoal responsável pela operação de barragem, em termos de salvaguardar vidas e propriedades sob risco no caso de inundação por rompimento. O plano é um documento técnico que deve ser providenciado pelo empreendedor e elaborado por profissionais com domínio e experiência em segurança de barragens, habilitados legalmente para tal, e deve ser objeto de fácil leitura e interpretação.

O PAE deve estabelecer as ações preventivas e corretivas a serem executadas em caso de situações de emergência, além dos meios de divulgação

e alerta às comunidades potencialmente atingidas. Uma etapa muito importante para a elaboração do PAE é o estudo da propagação da cheia de ruptura para se determinar a extensão dos danos no vale à jusante. Esse estudo se baseia essencialmente na simulação do rompimento hipotético do barramento e deve conter os elementos necessários para que seja integrado aos mapeamentos de áreas de risco e Planos de Contingência e Defesa Civil (PlanCon) que porventura existam ou venham a existir no município e/ou na bacia hidrográfica.

O PlanCon, por sua vez, é um documento técnico que visa assistir a municipalidade no socorro às vítimas e na tomada de decisões. Atualmente existem muitas discussões sobre a integração entre os dois planos, principalmente no que diz respeito as atribuições e responsabilidades do empreendedor e do ente público.

A barragem Lomba do Sabão, objeto de estudo deste trabalho, está localizada na região leste de Porto Alegre, a montante da bacia do Arroio Dilúvio, é do tipo enrocamento, possui 10 metros de altura, 290 metros de extensão longitudinal (TSCHIEDEL, 2017), e volume médio de 2.935.342 m³ (MAIZONAVE et al., 2005). Segundo Tschiedel (2017), a barragem Lomba do Sabão se enquadra numa categoria de Alto Risco com Alto Dano Potencial Associado.

Em virtude da categoria de riscos, altura do barramento e volume armazenado a elaboração do PAE para a barragem Lomba do Sabão é obrigatório, uma vez que se enquadra na lei 12.334/2010 e na portaria SEMA nº 136/2017. Este trabalho procura ajudar a preencher essa lacuna fornecendo informações importante para a elaboração do PAE e do PlanCon.

Os resultados deste trabalho poderão auxiliar à municipalidade e o empreendedor no planejamento de suas ações em caso de rompimento da barragem, traçando sua atuação em função das perigosidade estáticas e dinâmicas ao longo de toda mancha de inundação, de modo que sistemas de alerta e evacuação sejam concebidos, que as vidas dos moradores sejam preservadas e que infraestruturas importantes possam permanecer em funcionamento mesmo que sejam atingidas.

2 OBJETIVOS E PRODUTO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é contribuir com a elaboração do Plano de Ações Emergenciais (PAE) da Barragem Lomba do Sabão fornecendo subsídios para a elaboração de ações para o enfrentamento de crise, por parte da municipalidade, a partir da elaboração do Plano de Contingência e Defesa Civil (PlanCon).

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um fluxo de trabalho para espacializar a onda de cheia e definir o zoneamento de riscos decorrentes do rompimento de barragens, especialmente para a barragem Lomba do Sabão.
- Propor um arranjo metodológico para estimar os prejuízos decorrentes do rompimento de barragens.

2.3 Produto

O produto final deste trabalho consiste em produzir, a partir da espacialização da onda de cheia, mapas com as zonas de riscos hidrodinâmicos, localização dos moradores, e localização das infraestruturas potencialmente atingidas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Barragem

Definida como um obstáculo artificial com capacidade de reter água, rejeitos ou detritos para fins de armazenamento e/ou controle, uma barragem pode variar de pequenos maciços de terra a grandes estruturas de concreto.

A importância destas estruturas é indiscutível e o domínio das técnicas de construção foi fundamental para o desenvolvimento da humanidade. Segundo Jansen (1980), há evidências de barragens que foram construídas no berço da civilização, há cerca de 5000 anos. De acordo com Balbi (2008), a barragem espanhola de Proserpina, construída no século II pelo império Romano, permanece em operação até os dias de hoje.

Segundo ANA (2019), a barragem mais antiga que se tem notícia em território brasileiro, conhecida atualmente como açude Apipucos, foi construída no final do século XVI onde hoje é a área urbana do Recife (PE). As primeiras grandes barragens do país foram a do Cedro/CE que começou a ser construída em 1880 e a de Lajes/RJ que entrou em operação em 1906, na época uma das maiores do mundo.

Inicialmente as barragens eram destinadas apenas para abastecimento de água, no entanto, a medida que as civilizações se desenvolviam outras serventias como irrigação, controle de cheias, navegação e geração de energia surgiram, legitimando a importância dessas estruturas para a sociedade moderna. Evidentemente as técnicas construtivas se aprimoraram a partir da experiência dos construtores, resultando na variedade de métodos construtivos que se tem atualmente.

Os principais componentes de uma barragem de terra convencional são o barramento em si, as fundações, as ombreiras e as estruturas extraviadoras conforme ilustrado na Figura 1.

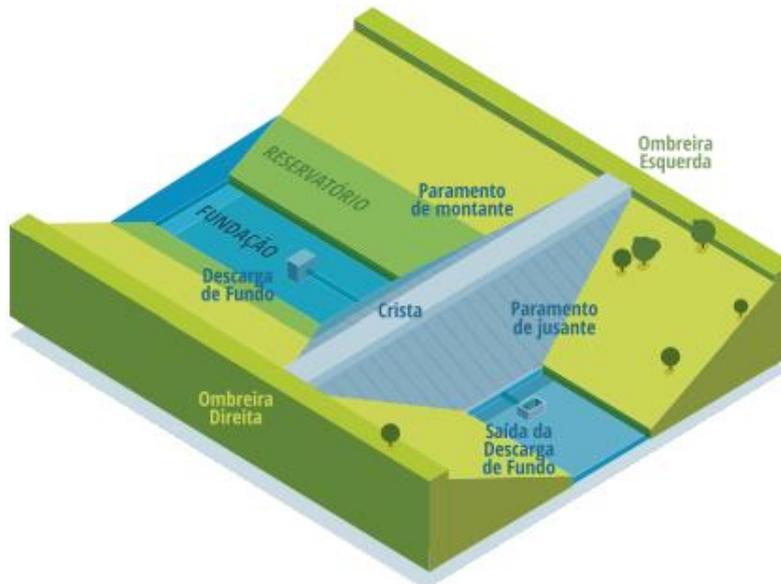


Figura 1 - Esquema de uma barragem de terra convencional.
FONTE: ANA (2019)

Uma barragem de terra, geralmente construída em formato trapezoidal, é constituída de talude, ou paramento, de montante (em contato com a água no reservatório), talude de jusante, e pela crista. O talude de montante deve ser protegido da ação das ondas que se formam no reservatório, para tanto utiliza-

se rochas com tamanho suficiente para não serem arrastadas pelas ondas, denominadas de “rip-rap”. O talude de jusante, por sua vez, deve ser protegido do efeito erosivo das chuvas, utilizando-se normalmente grama devido ao baixo custo e bom desempenho. O solo onde se apoia o maciço denomina-se fundação e deve ter resistência suficiente para suportar as cargas provenientes da estrutura. As ombreiras são as zonas das margens em contato direto com o barramento e, assim como as fundações, são fundamentais para garantir a estabilidade da barragem. As estruturas entravadoras são constituídas essencialmente pelos vertedouros que são responsáveis por verter a água quando o nível máximo normal da barragem é atingido.

Segundo Art Walz (2007), embora haja um número crescente de barragens de usos múltiplos, 71,7% das barragens cadastradas no registro da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB) são de uso único. A irrigação é a função mais comum das barragens no registro da CIGB, com 48,6% de participação, seguidas de hidroeletricidade (17,4%), abastecimento de água (12,7%), controle de cheia (10%), recreação, navegação e piscicultura (5,9%) e outros usos com 5,4%. Geograficamente, ainda segundo Art Walz (2007), as barragens estão distribuídas conforme Figura 2. Observa-se que grande parte delas estão localizadas na Ásia e América do Norte (71%), enquanto apenas 5% estão no continente africano.

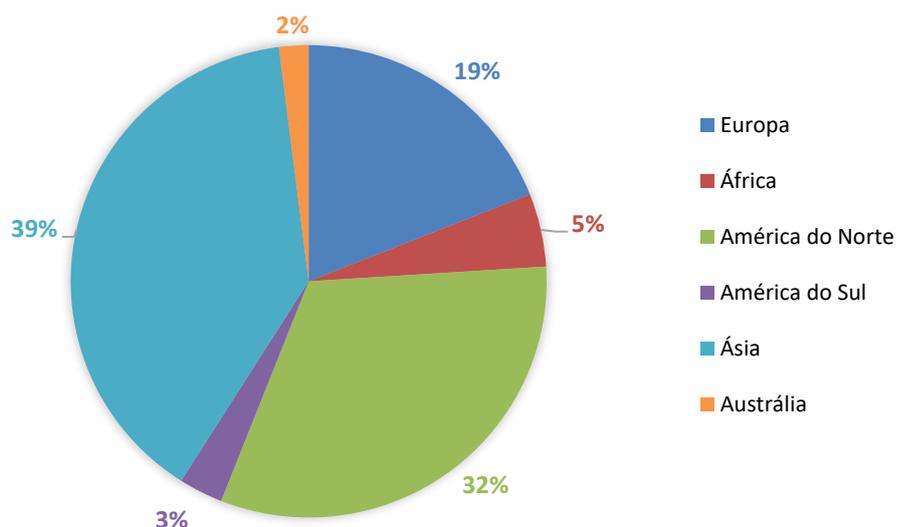


Figura 2 - Distribuição geográfica de grandes barragens.
Fonte: Adaptado de Art Walz, 2007

De acordo com Relatório de Segurança de Barragens (RSB) de 2018,

publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA) no final de 2019, a nível nacional existem 17.604 barragens cadastradas pelos órgãos fiscalizadores.

Do total de barragens cadastradas, 42% possuem algum tipo de ato de autorização estando, portanto, regularizadas. É possível afirmar que 28% do total de barragens cadastradas submetem-se à PNSB, sendo os maiores usos ligados à irrigação (36%), abastecimento humano (20%) e hidrelétrica (14%). A tendência é de que os números de barragens destinadas à irrigação e ao abastecimento humano cresçam à medida que os órgãos fiscalizadores de barragens de acumulação de água classifiquem suas barragens e descubram se elas se submetem ou não à PNSB, enquanto que os números de barragens com finalidade hidrelétrica e de mineração fiquem estáveis, já que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Mineração (ANM) já sabem se suas barragens se enquadram ou não à PNSB (ANA, 2019).

O estado do Rio Grande do Sul possui dezenas de milhares de reservatórios de água, majoritariamente particulares, os maiores volumes são destinados a irrigação enquanto os pequenos açudes são utilizados para dessedentação animal (ANA, 2018).

3.1.1 Tipos de barragem de acumulação de água

De acordo com Shaene et al. (2009) as barragens podem ser classificadas em diferentes tipos de acordo com a sua função e os materiais empregados na construção. Os principais tipos de barragens, segundo os materiais de construção empregados, são de aterro, podendo ser de terra e/ou enrocamento, e de concreto.

Para a escolha do tipo de barragem a ser adotada deve ser observada as características do solo de fundação, a morfologia da bacia hidrográfica, as características hidráulicas, os materiais de construção disponíveis no local, a cobertura do solo, os aspectos tectônicos e os impactos ao meio ambiente (MEIRELLES, 2014).

As barragens de terra podem ser construídas com materiais naturais disponíveis na região da obra, a depender da qualidade do material. Este tipo de barragem pode atingir até 100 metros de altura desde que as condições geológicas e geotécnicas do terreno de fundação assim o permitam, podendo ser separadas em três grandes grupos: as homogêneas, as zoneadas e as de

enrocamento.

As barragens de terra homogêneas são constituídas por um único material com permeabilidade suficientemente reduzida para permitir apenas níveis aceitáveis de percolação. Também existem as barragens homogêneas modificadas, onde utiliza-se uma pequena porcentagem de material permeável para construir drenos de controle de percolação, resultando em taludes mais inclinados, portanto com custo menor se comparados a barragens de perfil homogêneo puro.

Nas barragens de terra zoneadas os materiais mais permeáveis são utilizados nas partes externas da seção transversal e os menos permeáveis lançados na parte central e/ou na parte de montante. Esse tipo de barramento é construído em locais onde não há quantidade suficiente de solo argiloso, portanto com menor coeficiente de permeabilidade, disponível.

As barragens de enrocamento são construídas com fragmento de rocha compactados em camadas, devendo possuir um núcleo impermeável e filtros de material granular. As mais comuns possuem núcleo de argila compactada, porém também existem barragens com núcleo de asfalto e/ou outros materiais impermeáveis. A estabilidade é garantida pelo atrito interno das diferentes granulometrias dos materiais que a constituem.

Segundo Cruz (1996) nas regiões onde há solo em quantidade e qualidade adequadas, ombreiras suaves e condições climáticas favoráveis, a barragem de terra é a primeira opção a ser considerada. Em regiões áridas, com disponibilidade de rocha, presença de vales mais fechados e clima seco, a barragem de enrocamento é a alternativa inicial a ser avaliada. Nos climas temperados, com escassez de solo, temperaturas baixas e invernos longos, as barragens de enrocamento com face impermeável tornam-se atrativas. Ou seja, não há uma “receita” absoluta, a escolha do tipo de barragem depende das condições do local e da disponibilidade de material.

Um levantamento das barragens construídas no mundo até 1982 realizado pelo *International Commission on Large Dams (ICOLD)*, apresentado na Tabela 1, demonstra a grande aplicabilidade das barragens de aterro a nível mundial.

Tabela 1 - Tipos de barragens construídas no mundo até 1982.
FONTE: baseado em Meirelles, 2014

TIPO DE SEÇÃO	(%)
Solo, areia e cascalho	35,90
Terra com filtro	15,00
Barragem de terra homogênea	9,50
Solo e enrocamento	9,30
Terra com enrocamento de pé	6,10
Solo e núcleo de argila em camadas	4,70
Solo e face de concreto	4,10
Enrocamento e face de concreto	2,80
Solo com núcleo de parede diafragma	2,40
Enrocamento com núcleo de parede	0,90
Aterro hidráulico	0,90

3.1.2 Causas e históricos de rompimento

O rompimento de uma barragem é considerado uma situação crítica, causada por falhas humanas ou causas naturais, que resulta na liberação incontrolável do material do seu reservatório para a região a jusante.

As barragens, mesmo que construídas e operadas de maneira correta, assim como qualquer outra estrutura ou obra de engenharia, estão sujeitas a incidentes e acidentes. Um acidente se caracteriza como um evento correspondente à ruptura parcial ou total da obra e/ou sua completa disfuncionalidade, com graves consequências econômicas e sociais, enquanto um incidente pode ser definido como um evento físico indesejável que prejudica a funcionalidade e/ou a inteireza da obra, podendo gerar eventuais acidentes, se não for corrigido a tempo.

De acordo com Alves (2015) o rompimento de barragens é uma modalidade de acidente consideravelmente recente na história da humanidade. Os principais fatores apontados como causa primária do rompimento de barragens são os fenômenos naturais intensos, o mau planejamento, projeto, execução e comissionamento destas obras que, independente de fatores externos, podem ruir.

Determinar as causas de ruptura é complexo visto que a ocorrência de acidentes é resultado de uma série de falhas. Estatisticamente as principais causas de ruptura de barragens de aterro são galgamento (49%), erosão interna (entubamento) do corpo da barragem (28%) e erosão interna (entubamento) da

fundação (17%) (CIGB, 1995).

O galgamento ocorre quando o vertedouro da barragem é insuficiente e a água verte sobre a crista do barramento. Quando ocorre em barragem de terra ou enrocamento inicia-se o processo de erosão do talude de jusante, que pode resultar na formação de brecha de forma regressiva, podendo levar o maciço à ruína.

O processo de entubamento, ou *piping*, tanto no corpo da barragem quanto nas suas fundações, é um fenômeno que tem origem a partir da formação de uma infiltração intergranular. Segundo Ladeira (2007) a ruptura pelo entubamento (*piping*) ocorre por erosão regressiva de jusante para montante, formando um tubo (*piping*), com carreamento de partículas de solo pelo maciço. Nesse cenário, ocorre deslocamento de partículas do barramento que desestabiliza o equilíbrio de forças na matriz do solo e o respectivo estado de tensões no maciço por onde ocorre esse fluxo. O fenômeno é progressivo até a formação de brecha e colapso da estrutura

Nos parágrafos a seguir serão descritos de forma sucinta alguns dos principais acidentes com barragens de terra ocorridos no Brasil.

3.1.2.1 Barragem da Pampulha – Minas Gerais, 1954

De acordo com Balbi (2008), a construção da barragem da Pampulha foi finalizada em 1941, atingindo 16,5 metros de altura, 330 metros de comprimento e capacidade 18 milhões de m³ de reservação. Consistia em uma barragem de terra de seção uniforme com placas de concreto armado recobrimdo o talude de montante.

O rompimento teve início em 20 de maio de 1954, Vargas et al. (1955) concluiu que a ruptura se deu por erosão interna (entubamento) iniciada entre a fratura na laje de concreto e o talude de jusante.

A ruptura inundou toda a área do atual aeroporto da Pampulha e grande parte da cidade de Belo Horizonte ficou sem abastecimento de água, sendo necessário construir um sistema de abastecimento de emergência que captava água diretamente do córrego Ressaca, um dos afluentes do reservatório da Pampulha (VIANNA, 1997). Na ocasião, houve apenas danos materiais. A barragem foi reconstruída e encontra-se em operação atualmente.

3.1.2.2 Barragem de Orós – Ceará, BRASIL – 1960

A barragem de Orós entrou em colapso no dia 26 de março de 1960. Segundo Balbi (2008) a estrutura tinha o formato semicircular, tipo terra zoneada com altura de 54 metros e comprimento de 620 metros. O volume aproximado do reservatório era de 2,1 bilhões de metros cúbicos e o rompimento do maciço, ainda em construção, foi precedido de chuvas torrenciais. De acordo com Leite (2009) em apenas quatro dias choveu 400 milímetros e em 10 dias já havia chovido 700 milímetros, que corresponde à média anual de chuva na região.

Mesmo após tentativas de altear o barramento o galgamento era inevitável e o desastre iminente. Como consequência do galgamento uma brecha de 200 metros de comprimento por 35 de altura se formou, originando uma onda de cheia cujo pico foi de 9.600 m³/s. Apesar dos esforços de alerta e evacuação do vale a jusante muitos moradores não deixaram suas casas, estima-se que 1000 pessoas morreram.

A barragem foi reparada e o reservatório está em operação desde 1961. A açude de Orós, como é conhecido da região, figura como uma das maiores barragens de terra do mundo.

3.1.2.3 Barragem de Euclides da Cunha e Armando Salles – São Paulo – 1977

O rompimento das barragens de Euclides da Cunha e Armando Salles ocorreu no dia 20 de janeiro de 1977 a partir de uma ruptura tipo cascata. Segundo Lauriano (2009) os reservatórios de Euclides da Cunha e Armando Salles tinham volumes de 13,6 milhões de m³ e 25,9 milhões de m³, e alturas de 53 metros e 35 metros respectivamente.

A ruptura se deu após três semanas de chuvas intensas. Uma cheia próxima a de projeto atingiu a barragem de Euclides da Cunha e problemas nas comportas do vertedouro impediu a liberação da vazão, elevando o nível do reservatório até galgar o barramento. A erosão formou uma brecha com dimensões de aproximadamente 131 metros de largura e 53 de altura liberando uma onda de inundação que atingiu a barragem de Armando Salles, localizada 10 km a jusante, provocando o seu galgamento. A brecha formada foi de 168 metros de largura e 35 metros de altura, a vazão de pico foi estimada em 7.000 m³/s. Cerca de 4.000 casas foram atingidas, mas não houve mortes.

3.1.2.4 Barragem de Camará – Paraíba – 2004

O rompimento da barragem de Camará (Figura 3) foi iniciado no dia 17 de junho de 2004. O barramento era do tipo concreto compactado a rolo (CCR), com 50 metros de altura e 296 metros de comprimento, seu reservatório tinha capacidade para 26,5 milhões de m³ de água.

De acordo com Menescal et al. (2005) a barragem apresentou problemas na rocha de fundação da ombreira esquerda, abrindo um orifício que gerou o esvaziamento do reservatório. A ruptura liberou 17 milhões de m³ de água pra jusante, causando danos ao longo de 20 km. A onda de inundação causou 6 mortes e deixou 3.000 desabrigados, pontes foram destruídas e centros urbanos ficaram sem energia e comunicação.

Segundo Valencio (2009) a ausência de medidas preventivas foi tão prejudicial quanto a demora e insuficiência das ações públicas de reabilitação e reconstrução nos municípios afetados, prevalecendo as formas de ação altruístas e as solidariedades extrafamiliares. Não havia Defesa Civil instituída e as ações oficiais de evacuação falharam.



Figura 3 - Barragem de Camará após o acidente.
FONTE: Balbi, 2008

3.1.2.5 Barragem de Algodões I – Piauí – 2009

A ruptura da barragem de Algodões I (Figura 4), localizada em Cocal/PI, ocorreu no dia 27 de maio de 2009 liberando cerca de 50 milhões de m³ de água. De acordo com Sampaio (2014), tratava-se de uma barragem de terra homogênea com capacidade para 51 milhões de m³ cujo objetivo era promover o abastecimento da cidade de Cocal, a irrigação e a piscicultura. O barramento de formato trapezoidal possuía 378 metros de extensão, 8 metros de largura na crista e 243 metros na base, e 47 metros de altura, assentado sobre fundação

estável de arenito compactado. O sangradouro era constituído de um canal de aproximação escavado e de um vertedouro em perfil Creager que desaguava em um canal lateral revestido em concreto, seguido de um canal simplesmente escavado.

Segundo Veról (2010) a barragem foi projetada em 1994 e executada a partir de 1995 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) tendo sido inaugurada em 2001.



Figura 4 - Barragem de Algodões I.
FONTE: Sampaio, 2014

O colapso da barragem Algodões I ocorreu devido a uma série de fatores. O sangradouro da barragem sofreu grande obstrução devido aos constantes escorregamentos de materiais provenientes de uma encosta próxima. Com o aumento das precipitações esses escorregamentos tornaram-se ainda mais frequentes, levando ao rompimento das placas de concreto que davam proteção ao maciço de terra e, conseqüentemente, a erosão regressiva de parte do maciço. Com a obstrução do sangradouro, a lâmina de sangria estava passando por uma largura inferior a 1,00 m, gerando uma torrente turbulenta, com vazão específica equivalente à de projeto (SAMPAIO, 2014).

O desastre deixou 953 desalojados, 2.000 desabrigados, 80 feridos leves, 8 mortos e um total de 2.953 pessoas afetadas, além de 312 casas destruídas, 180 danificadas, mais de 30.000 animais mortos e 11 povoados dizimados.

A ruptura da barragem de Algodões I ajudou a desencadear a votação e aprovação do projeto de lei que se tornaria a Política Nacional de Segurança de

Barragens.

3.1.2.6 Barragem do Quati – Bahia – 2019

A Barragem do Quati, no nordeste da Bahia, rompeu em 11 de julho de 2019 deixando cerca de 500 pessoas desabrigadas. A barragem foi construída pela Companhia de Desenvolvimento e Ação Regional e entregue em 2000 à Associação de Moradores da Comunidade de Quati. A estrutura de 20 metros de altura e 200 metros de comprimento formava um açude que era utilizado para abastecimento e irrigação, e não constava no Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens (SNISB). Não há muitas informações oficiais sobre este acidente.

A Tabela 2 relaciona os rompimentos de barragem reportados a ANA e registrados nos RSB's de 2017 e 2018. Outros acidentes ocorreram, no entanto, devido a falta de notificação e informações oficiais não foram incluídas neste trabalho.

Tabela 2 - Acidentes relacionados nos RSB's de 2017 e 2018.
FONTE: ANA, 2018 e ANA, 2019

BARRAGEM	TIPO	ÓRGÃO FISCALIZADOR	LOCAL	DATA	CAUSAS
Barragem Rincão dos Kroeff	Terra	SEMA/RS	Rio Grande do Sul	Jan 2017	Galgamento/Cheia
Barragem Cacimba Nova	-	ANA	Pernambuco	Fev 2017	Percolação pela fundação
Barragem Barreiros	-	ANA	Pernambuco	Mar 2017	Percolação pela fundação
Barragem Lageado	-	IMASUL/MS	Mato Grosso do Sul	Dez 2017	Galgamento
Barragem CGH Agromar	Terra	SEMA/MT	Mato Grosso	Fev 2018	Chuvas fortes
Barragem Fazenda Boa Sorte	Terra	SEMAS/PA	Pará	Abril 2018	Rompimento em cascata devido a chuvas fortes

3.1.3 Riscos e Barragens

Como qualquer outra obra de engenharia a construção de uma barragem induz em aceitação de um risco. O conceito de risco (R) consiste na probabilidade de ocorrência de um evento (PO) e as perdas associadas (PA), sendo usualmente definido como o produto entre esses dois fatores ($R = PO \times PA$). Risco também pode ser definido como a relação entre a probabilidade de ocorrência de um evento e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor.

Em barragens o conceito de risco é bastante pertinente, pois ainda que se trate de um sistema tecnológico concebido, projetado e construído de forma substancialmente segura, sua segurança absoluta não pode ser garantida, portando, deve-se ser considerar a probabilidade de ruptura a fim de que sejam planejadas as ações para reduzir os danos provocados pela onda de cheia no vale a jusante.

De acordo com Menescal et.al (2005) o risco se refere a potencialidade de perda de vidas humanas e/ou danos a propriedades a jusante da barragem, sendo estas estruturas classificadas, de forma preliminar, como de risco baixo quando estão situadas em áreas rurais onde a onda de inundação proveniente da ruptura pode danificar construções rurais, áreas de plantio e estradas vicinais sem causar vítimas. As de risco significativo, ou médio, são aquelas localizadas em áreas predominantemente rurais cultivadas, onde a ruptura pode danificar residências isoladas, estradas e ferrovias secundárias e causar a interrupção de serviços de utilidade pública, vitimando poucas pessoas. As barragens de risco alto são aquelas situadas em locais onde a ruptura pode causar sérios danos a um grande número de residências, extensas áreas de plantio, instalações comerciais e industriais, serviços de utilidade pública importantes, rodovias e ferrovias tronco, podendo vitimar muitas vidas.

De acordo com Viseu (2006), o risco efetivo (R) deve considerar a probabilidade de ocorrência de um evento que coloque em risco a segurança estrutural do barramento (P_{sol}), a probabilidade de o acidente de fato ocorrer (P_{rup}) e as consequências da cheia resultante para o vale a jusante (C). O risco efetivo que o vale está sujeito pode ser escrito conforme a Equação 1.

$$R = P_{sol} \times P_{rup} \times C \quad (\text{Eq. 1})$$

O fator Psol está associado as solicitações excepcionais que a barragem está sujeita, tais como: as de origem hidrológica, sísmicas, eventos a montante, atos de sabotagem, terrorismo ou vandalismo. O fator Prup se refere ao comportamento da barragem em resposta àquela solicitação que, como o primeiro, é fruto de incertezas relativas ao conhecimento dos processos físicos e do comportamento futuro do meio e da barragem (BALBI, 2008). O terceiro fator, C, depende do grau da perigosidade, vulnerabilidade e exposição do vale a jusante. A Equação 2 representa a forma mais completa para o cálculo do risco no vale a jusante.

$$R_{\text{vale}} = P_{\text{sol}} \times P_{\text{rup}} \times P \times V \times E \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

Psol – Probabilidade de ocorrência da solicitação;

Prup – Probabilidade de ruptura em virtude da solicitação excepcional;

P – Perigosidade;

V – Vulnerabilidade;

E – Exposição.

A perigosidade da cheia está diretamente associada a vulnerabilidade do vale, que por sua vez pode ser caracterizada pela resistência das estruturas e edificações à onda de cheia, pela capacidade das pessoas sobreviverem e pela capacidade de recuperação econômica da região após o desastre.

A vulnerabilidade pode ser considerada em três vertentes: Físico – caracteriza a capacidade de os edifícios resistirem ou não à cheia e de serem úteis ou não para refúgio. Social – caracteriza a capacidade de sobrevivência dos indivíduos em risco. Econômica – caracteriza a capacidade de recuperação econômica após o desastre (VISEU, 2006).

Outro conceito bastante pertinente é o de desastre, que segundo Girão et al. (2018), pode ser caracterizado de forma sucinta como a consequência e/ou o efeito gerado num contexto de maior risco, resultante da consolidação prática da ameaça (perigo), caracterizada, necessariamente, como negativo.

A Figura 5 se propõe a apresentar a interseção entre os conceitos perigo, exposição e vulnerabilidade, demonstrando que o termo risco está posto em todo

o contexto da construção dos mesmos (GIRÃO et al, 2018). Assim, nota-se que o desastre é resultado da confluência entre a exposição de uma sociedade vulnerável ao perigo.

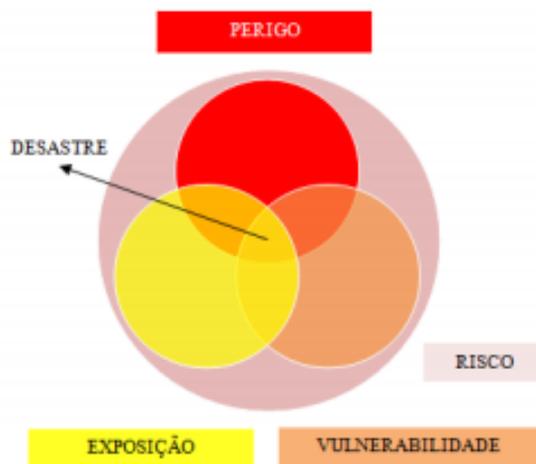


Figura 5 - Diagrama de análise da relação entre Perigo, Exposição e Vulnerabilidade.
 FONTE: Adaptado de Licco & Seo (2013).

3.2 Segurança de Barragens

A segurança de barragens é um tema fundamental para todas os agentes envolvidos, desde as autoridades competentes e empreendedores, até os órgãos e entidades que lhes dão apoio técnico em atividades relativas à concepção, projeto, construção, comissionamento, operação e, por fim, ao descomissionamento, as quais devem ser compatíveis ao tipo, dimensão e risco envolvido.

A seguir será discutido como chegamos ao atual estágio da segurança de barragens no Brasil, como este tema é aplicado e quais as discussões atuais.

3.2.1 Marco Regulatório

Para a compreensão da evolução do marco regulatório de segurança de barragens no Brasil é importante remontar a instituição da *International Commission on Large Dams* (ICOLD) em 1928. O ICOLD possui como foco principal a promoção e divulgação de tecnologias de planejamento, projeto, construção e operação de barragens, e em 1960 também passou a enfatizar a segurança e reabilitação de barragens. O ICOLD é representado no Brasil pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) desde 1957, e as considerações, parâmetros, critérios e recomendações do ICOLD foram responsáveis por balizar as ações de segurança de barragens em diversos países. Nos parágrafos a

seguir apresenta-se algumas ações sobre o tema em alguns deles.

Nos Estados Unidos o congresso aprovou em 1972 uma legislação relacionada à elaboração de um programa de inspeção de barragens. De acordo com Louzada (2018), a partir de então, se instituiu o *Bureau of Reclamation* (USBR) e realizou-se um importante programa de reavaliação da segurança de barragem já existentes, assegurado por uma legislação correlata. A legislação americana inclui atribuições e responsabilidade compartilhadas entre poder público, empreendedores e sociedade civil, e a articulação das instituições incluem regulamentos e legislações nos âmbitos federal, estadual e municipal. Essencialmente, as barragens americanas são avaliadas sob o ponto de vista estrutural, hidráulico-hidrológico e sísmico (MEDEIROS, 2014).

A Austrália editou o decreto *Dam Safety Act* (Decreto de Segurança de Barragens) em 1978 e em 2000 o complementou pelo *Dam Safety Code* (Código de Segurança de Barragens), cuja principal atribuição concentra-se em assegurar os mecanismos de segurança de barragens e o bem-estar da população. Todas as barragens são fiscalizadas e monitoradas pela *Australian Commission on Large Dams* (Comissão Australiana de Grandes Barragens), independente de classes de enquadramento, portanto todas as barragens devem possuir registros dos monitoramentos, informar a ocorrência de evento de emergência, manter um programa de autofiscalização e produzir anualmente um relatório de segurança (LOUZADA, 2018).

Em Portugal o primeiro regulamento sobre projeto e construção de barragens de terra, intitulado Regulamento de Pequenas Barragens de Terra, foi oficializado através do Decreto-Lei No. 48.373/68. Em 1990, o governo português instituiu um novo Regulamento para Segurança de Barragens, na forma de anexo ao Decreto-Lei No. 11/90. Em 1993 foi publicado um novo Regulamento de Pequenas Barragens, anexo ao Decreto Lei No. 409/93. De acordo com Louzada (2018), no território português, o Ministério de Obras Públicas, com a participação do Laboratório de Engenharia Civil de Lisboa, tem realizado desde a década de 1980 avaliações das condições de segurança de antigas barragens com auxílio de simulações computacionais e modelagem matemática do comportamento das estruturas, dos materiais e das interfaces solo-rocha-concreto.

No Canadá consolidou-se, em 1999, um manual de segurança de

barragens (*Dam Safety Guidelines*) publicado pelo *Canadian Dam Association* (Associação Canadense de Barragens). Como as províncias do Canadá tem prerrogativas para o estabelecimento de regulamentos específicos, este manual tem servido como parâmetro para regulação de segurança de barragens em âmbito local. O manual incorpora princípios, práticas e procedimentos aplicados a barragens com mais de 2,5 m de altura e capacidade de armazenamento a partir de 30.000 m³. Esta legislação balizou a elaboração de um guia básico de segurança de barragens, editado pelo CBDB que, por sua vez, associadas às regulamentações americanas, influenciaram a construção da política de segurança de barragens no Brasil (MEDEIROS, 2014).

No Brasil o CBDB publicou em 2001 um guia básico de segurança de barragens que teve como objetivo estabelecer parâmetros e um roteiro para adequar e manter estas estruturas seguras. Outros dois manuais foram editados posteriormente, um em 2002 pelo então Ministério da Integração Nacional e outro pela Eletrobrás em 2003. O guia da Eletrobrás contém orientações básicas para projetos de usinas hidrelétricas, em que são apresentadas as concepções relacionadas à auscultação e instrumentação das obras civis e o estudo da ruptura de barragens, que aponta metodologias de cálculo e os conteúdos para apresentação de planos de ação de emergência (ELETROBRÁS, 2003).

O PL 1181/2003, de autoria do Dep. Leonardo Monteiro (PT/MG), foi elaborado pelo Grupo de Trabalho (GT) de Segurança de Barragens, criado na Câmara Técnica de Estudos e Projetos (CTAP) do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). O Projeto de Lei tramitou por 7 anos na Câmara dos Deputados, sendo sancionado pela Presidência da República em setembro de 2010, resultando na Lei 12.334/2010.

Antes da promulgação da lei não havia no arcabouço jurídico-institucional de recursos hídricos indicação direta de responsabilidades, em âmbito nacional, pela fiscalização da segurança de barragens. Alguns órgãos ambientais lidavam isoladamente com acidentes, porém não havia articulação do poder público para lidar com a problemática. No estado de São Paulo, em 1977, após o acidente com as barragens de Euclides da Cunha e Armando Salles, foi emitido o decreto nº 10.752 dispondo sobre segurança de barragens no estado, porém por falta de regulamentação nunca foi implementado (NEVES, 2018). Nos setores de energia elétrica e mineração havia iniciativas isoladas dos

próprios empreendedores que buscavam implementar no Brasil os mesmos padrões operacionais e de segurança adotados internacionalmente.

A partir do histórico da regulação da segurança de barragens pode-se inferir que as ações de políticas públicas para a segurança de barragens no território nacional seguiram os modelos internacionais, e foram se consolidando aos poucos até a maturação do projeto de lei (PL). A tramitação do PL até a instituição da legislação demarca uma insipiente preocupação do poder público diante dos riscos associados às barragens (LOUZADA, 2018).

3.2.2 A Política Nacional de Segurança de Barragens

A Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída pela Lei nº 12.334/2010, marcou a inserção legal do Brasil no tema, sendo o instrumento nacional de regulação para o setor. Seus objetivos são garantir a observância dos padrões de segurança, regulamentar, promover, monitorar e acompanhar as ações pelos responsáveis por barragens, visando reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências à população potencialmente afetada (NEVES, 2018).

O novo marco legal inseriu os seguintes órgãos fiscalizadores no temática: Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pelas barragens para fins de acumulação de água; Agência Nacional e Energia Elétrica (ANEEL), responsável pelas barragens para fins de geração de energia elétrica; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA), responsável pelas barragens para fins de disposição de resíduos industriais; e a Agência Nacional de Mineração (ANM), responsável por barragens para fins de disposição final ou temporária de rejeitos de mineração.

Estes órgãos tiveram que se adequar às obrigações advindas com a nova lei e criaram resoluções e portarias para regulamentar alguns dos seus artigos. A Agência Nacional de Águas (ANA) foi o órgão que mais recebeu atribuições. Além de fiscalizar a segurança de barragens de usos múltiplos em corpos de água de domínio da união, cabe a agência promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores na implantação do Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB) e anualmente coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens (RSB).

A nível federal os principais aspectos legais ligados a segurança de barragem são os listados a seguir:

Lei Nº 12.334/2010: Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens;

Resolução CNRH Nº 143/2012: Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume;

Resolução CNRH Nº 144/2012: Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens;

Resolução Normativa ANEEL Nº 696/2015: Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL;

Resolução ANA Nº 236/2016: Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência;

Portaria ANM Nº 70.389/2017: Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.

A primeira ação da lei 12.334/2010 foi delimitar quais estruturas estariam sujeitas a PNSB, tanto que seu Art. 1º determina que barragens que apresentem pelo menos uma das seguintes características devem se adequar ao novo regramento:

I - Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

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

Estas características são ilustradas de forma bastante didática na Figura 6.

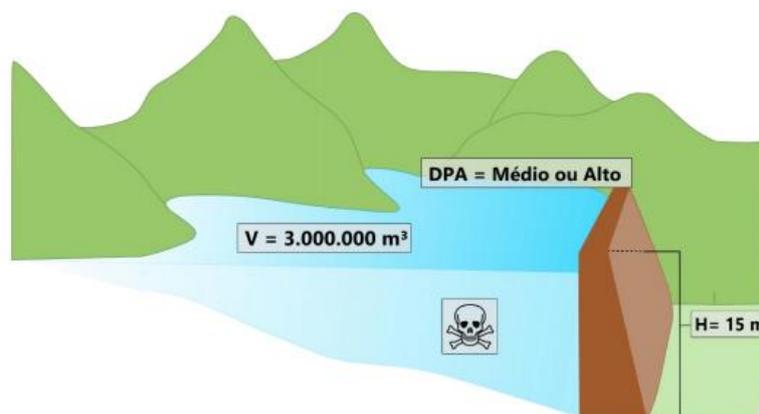


Figura 6 - Características de uma barragem que a insere no PNSB.
FONTE: Neves, 2018

Segundo Louzada (2018), estas características estão em concordância com as definições da ICOLD para enquadramento de grandes barragens (CBDB, 2001), portanto somente as barragens consideradas de grande porte, ou as que são destinadas a atividades potencialmente degradadoras do meio ambiente estão sujeitas a fiscalização do poder público. Neves (2018) alerta que são excluídas das ações fiscalizatórias as barragens de médio e pequeno porte que em seu somatório podem apresentar riscos socioambientais significativos em virtude de um potencial rompimento em efeito cascata.

A categoria de risco é definida pela Resolução CNRH Nº 143/2012 ou por regulamentação específica dos órgãos reguladores. A classificação por dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será em função do potencial de perdas de vidas humanas, dos impactos econômicos, sociais e ambientais que podem ser causados em caso de rompimento e pelo volume do reservatório. A resolução em questão estabelece para as barragens de armazenamento de água, independente da sua utilização, que o somatório dos índices apresentados na Tabela 3 indicará o dano potencial em que a barragem será enquadrada. Este enquadramento é apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 - Classificação de risco quanto ao dano potencial associado.
 Fonte: (CNRH, 2012).

VOLUME DO RESERVATÓRIO (A)	POTENCIAL DE PERDAS DE VIDAS HUMANAS (B)	IMPACTO AMBIENTAL (C)	IMPACTO SOCIOECONÔMICO (D)
PEQUENO ≤ 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE Não há residentes permanentes e/ou temporários e/ou pessoas transitando a jusante. (0)	SIGNIFICATIVO A área a jusante representa interesse ambiental ou é protegida por legislação específica (3)	INEXISTENTE Não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área a jusante (0)
MÉDIO de 5 a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE Não há residentes a jusante da barragem, porém existe estrada vicinal de uso local (4)	MUITO SIGNIFICATIVO A área a jusante representa interesse ambiental ou é protegida por legislação específica (5)	BAIXO Há pequena concentração de instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura a jusante ou instalações portuárias ou serviços de navegação (4)
GRANDE De 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE Não há residentes permanentes, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas (8)	-	ALTO Há grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, infraestrutura e serviços de lazer e turismo a jusante ou instalações portuárias ou serviços de navegação (8)
MUITO GRANDE > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE Há residentes permanentes a jusante, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas (12)	-	-

Tabela 4 - Somatório dos índices para classificação de risco.
 Fonte: (CNRH, 2012).

DANO POTENCIAL ASSOCIADO	SOMATÓRIO DOS ÍNDICES DO QUADRO 3 Σ(A TÉ D)
BAIXO	≤ 10
MÉDIO	Maior que 10 e menor que 16
ALTO	≤ 16

A lei também nomeou responsabilidades aos agentes envolvidos para que obrigações e/ou delegações fossem imputadas. No item III do Art. 4º a lei expressa que o responsável pela segurança da barragem é o empreendedor e cabe a ele o desenvolvimento de ações para garanti-la. De acordo com a Resolução nº 143/2012 no CNRH o empreendedor é o agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localiza a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade, sendo também o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la.

De acordo com Louzada (2018), as competências do empreendedor relacionam-se ainda as ações que visam prover os recursos necessários à garantia da segurança da barragem; a providenciar a elaboração do projeto final como construído (*As Built*); a organizar e manter em bom estado de conservação as informações e a documentação referentes ao projeto, à construção, à operação, à manutenção e a informar ao respectivo órgão fiscalizador qualquer alteração que possa comprometer a sua segurança; a manter serviço especializado em segurança de barragem; a permitir o acesso irrestrito do órgão fiscalizador e dos órgãos integrantes do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) ao local da barragem e à sua documentação de segurança; a providenciar a elaboração e a atualização do PSB; a realizar as inspeções; a elaborar as revisões periódicas de segurança; a elaborar o PAE, quando exigido; a manter registros dos níveis dos reservatórios, com a respectiva correspondência em volume armazenado, bem como das características químicas e físicas do fluido armazenado; a manter registros dos níveis de contaminação do solo e do lençol freático na área de influência do reservatório; e a cadastrar e manter atualizadas as informações relativas à barragem no SNISB

Dentre as obrigações do empreendedor, conforme dito acima, encontra-se a elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB). Os empreendedores devem adotar ações para a implantação efetiva de um sistema de gestão de segurança, obedecendo às regulamentações estabelecidas pelos respectivos órgãos fiscalizadores.

Os artigos que versam sobre Inspeções de Segurança Regular e Especial (art. 9º), Revisão Periódica de Segurança de Barragens (art. 10º) e o

Plano de Ações Emergenciais (art. 11º e 12º) careciam de regulamentação específica por parte dos órgãos fiscalizadores e cada um estabeleceu suas resoluções. De modo sucinto os objetivos de cada um dos itens citados acima são descritos abaixo.

As Inspeções de Segurança Regular e Especial fornecem informações importantes sobre o estado de conservação da barragem e devem ser realizadas em intervalos periódicos, buscando identificar problemas por meio de inspeção visual, propondo sua correção ou o acionamento de inspeções mais minuciosas, chamadas de especiais, focadas no problema identificado. A ANM exige inspeções a cada seis meses, para a ANA e ANEEL as inspeções podem ser semestrais, anuais ou bianuais dependendo da classe de risco da barragem.

A Revisão Periódica de Segurança de Barragens tem como propósito o reexame dos aspectos de segurança e operação da barragem, análise das características hidráulicas, hidrológicas e de estabilidade estrutural. Obviamente o objetivo não é somente verificar o estado geral do barramento, mas propor medidas e ações de correção e melhoria visando reduzir riscos apresentados pela estrutura principal ou associadas. O intervalo das revisões periódicas pode variar entre 5 e 10 anos dependendo a regulamentação de cada órgão fiscalizador.

A subdivisão de responsabilidades dos órgãos fiscalizadores também é muito importante para a implementação da PNSB, abaixo é descrito onde cada um se encaixa e suas respectivas responsabilidades. Segundo a Lei 12.334/2010, em seu art. 5º, a fiscalização caberá da segurança de barragens caberá: I - à entidade que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, observado o domínio do corpo hídrico, quando o objeto for de acumulação de água, exceto para fins de aproveitamento hidrelétrico; II - à entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico, quando se tratar de uso preponderante para fins de geração hidrelétrica; III - à entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos; IV - à entidade que forneceu a licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais.

A ANA, segundo a resolução 236/2017, é responsável pela fiscalização das barragens de usos múltiplos que ela tenha outorgado ou aquelas que sejam outorgáveis por ela, exceto para aproveitamento energético. Também tem a

obrigação de organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB); promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens; e coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens e encaminhá-lo, anualmente, ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de forma consolidada.

A ANEL, de acordo com resolução normativa nº 696/2015, é responsável pela fiscalização das barragens com fins de geração hidrelétrica, sendo ela a entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico nesta situação.

A ANM, segundo a portaria 70.389/2017, é responsável pela fiscalização das barragens de mineração sendo ele a entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária destes rejeitos.

O IBAMA atua em qualquer barragem sujeita a seu licenciamento ambiental, e conforme legislação ambiental. Os órgãos ambientais de alguns estados assumiram esta atribuição por subdelegação.

Em cursos d'água de domínio dos estados cabe ao órgão estadual de gestão de recursos hídricos a fiscalização. No estado do Rio Grande do Sul o órgão fiscalizador é a Secretária Estadual de Meio Ambiente (SEMA), que através da Portaria SEMA Nº 136/2017 resolveu que o PNSB será aplicado a todos os reservatórios artificiais de acumulação de água que estejam sujeitos ao processo de outorga junto à Secretaria, exceto aqueles destinados a geração de energia elétrica.

A Figura 7 apresenta um diagrama simplificado da responsabilidade de cada órgão fiscalizador.

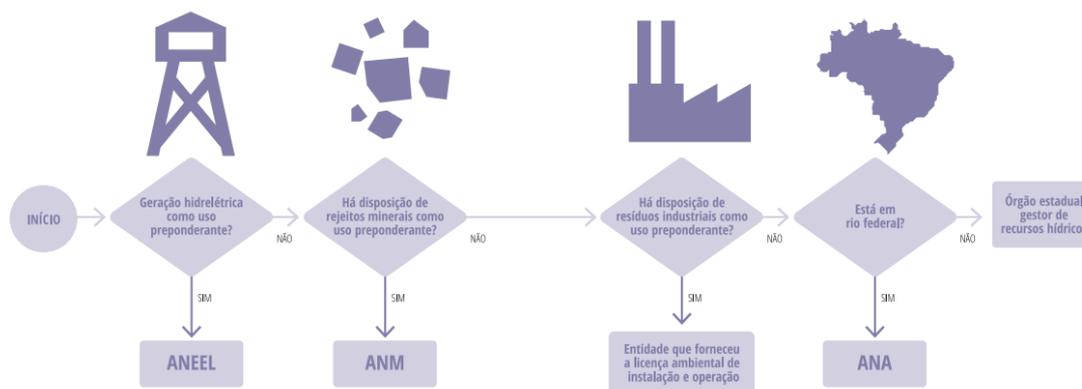


Figura 7 - Diagrama com a responsabilidade dos órgãos fiscalizadores.
FONTE: ANA, 2019.

As barragens fiscalizadas pela SEMA/RS, segundo Art. 4º da Portaria SEMA 136/2017, estão obrigadas apresentar o PSB caso apresentem ao menos uma característica das listadas a seguir:

I - Altura do maciço maior ou igual a 15 metros em qualquer volume de água armazenado;

II - Capacidade total de reservação maior ou igual a 3.000.000 m² em qualquer altura de maciço;

III - Capacidade total de reservação superior a 1.500.000 m³ e altura do maciço superior a 9 metros;

IV - Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

A lei 12.334/2010 também institui o Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB) que tem como objetivo criar um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas. Trata-se de um sistema onde os empreendedores e os órgãos fiscalizadores enviarão informações das barragens sob sua jurisdição para que a ANA possa condensar em um único relatório de modo a permitir uma gestão unificada das barragens em território nacional. Esse sistema foi regulamentado pela Resolução CNRH Nº 144/2012.

A lei também versa sobre o Plano de Segurança de Barragens e sobre o Plano de Ações Emergencias que serão melhor detalhados adiante.

3.2.3 Discussões atuais sobre a PNSB

Na 38º Reunião Extraordinária do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), ocorrida em dezembro de 2015, o plenário encaminhou pela criação de um grupo de trabalho (GT) sobre segurança de barragens no âmbito do Câmara Técnica de Análise de Projeto (CTAP). A missão do GT – Segurança de Barragens, era revisar as normas vigentes relativas à PNSB, com o objetivo de melhorar a segurança das obras e da própria implementação da política, com foco nas normas infralegais, em especial as Resoluções CNRH nº143/2012 e nº 144/2012, mas sem deixar de analisar e observar a Lei nº 12.334/2010. Os Projetos de Lei (PL) que tramitavam no Congresso Nacional sobre o tema e sobre alterações na Lei nº 12.334/2010 também foram alvo de análises.

Paralelamente aos trabalhos do GT, a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro) realizou uma rodada de oficinas em 11 estados da federação com a finalidade de promover o debate entre a sociedade e especialistas a fim de fortalecer a PNSB. Os principais objetivos das oficinas foram conhecer a situação e as lições aprendidas até o momento, destacar as principais dificuldades encontradas no cumprimento das resoluções dos órgãos fiscalizadores, coletar sugestões para o aprimoramento da lei e analisar os projetos de lei em andamento no Congresso Nacional relativos ao PNSB (ABRHIDRO, 2016).

Uma das propostas que foram apresentadas e estavam em discussão no Congresso foi o Projeto de Lei nº 224/2016, de autoria do então Senador Ricardo Ferraço (PSDB/ES), cujo teor poderia modificar tanto a PNSB como a Lei 9.433/97 que Estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos. A Comissão de Meio Ambiente (CMA) do Senado decidiu pela prejudicialidade da matéria e o projeto foi arquivado ainda que tenha sido amplamente discutido por especialistas.

A Senadora Leila Barros (PSB/DF) a partir das propostas construídas pelo Senador Ricardo Ferraço (PSDB/ES) e Jorge Viana (PT/AC) propôs o Projeto de Lei nº 550/2019. O PL aprovado pela Câmara dos Deputados em maio de 2020 voltou para o Senado Federal para nova apreciação uma vez sofreu alterações na Câmara. O projeto de lei prevê regras mais rígidas para o controle de barragens e endurece as penas para quem comete crimes ambientais que resultem em mortes.

De acordo com a Câmara dos Deputados (2019), a proposta inicial tornaria mais rígidas as regras de responsabilização civil, penal e administrativa dos causadores de tragédias; obrigaria cada barragem ter o seu Plano de Ação de Emergência, atualmente a exigência fica a critério do órgão fiscalizador, que determina sua elaboração em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem; restringiria ou proibiria a ocupação e a realização de atividades em áreas situadas na zona de autossalvamento, cabendo ao empreendedor arcar com as indenizações devidas; definia que o valor da indenização devida no caso de falhas da barragem será calculado em função da extensão do dano e do potencial econômico do infrator, estabelecendo multas que partem de R\$ 10 mil e podem chegar a R\$ 10 bilhões; determinaria que, em

situação de acidente, a multa por infração ambiental seja revertida obrigatoriamente à região afetada; alteraria a legislação que cria o Fundo Nacional de Meio Ambiente para incluir, entre as aplicações financeiras prioritárias, a recuperação de áreas degradadas por acidentes ou desastres ambientais; protegeria as finanças dos municípios mineradores, obrigando a empresa a continuar pagando a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) em caso de redução ou cessação da produção mineral devido a acidente ou a falha em barragens; classificaria como hediondo o crime de poluição ambiental quando resultar em morte e altera a Lei de Crimes Ambientais, prevendo o aumento de pena, até o quádruplo, se o crime de poluição ambiental resultar em morte; criminalizaria a conduta daquele que presta falsas informações no relatório de Revisão Periódica de Segurança de Barragem ou de Inspeção Regular ou Especial; criminalizaria conduta daquele que deixa de cadastrar e manter atualizadas as informações relativas à barragem no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens; determinaria prazo de um ano ao empreendedor para contratar seguro ou apresentar garantia financeira para a cobertura de danos a terceiros e ao meio ambiente, em caso de acidente ou desastre, nas barragens de categoria de risco alto e dano potencial associado alto.

As propostas apresentam, de modo geral, alguns pontos comuns em cada uma das iniciativas parlamentares, cabendo destaque para a obrigatoriedade de contratação de seguro ou garantia financeira pelos empreendedores para cobrir danos em caso de acidente em barragem; a obrigatoriedade de elaboração do PAE para todas as barragens ou apenas para as classificadas como de risco alto e dano potencial associado alto, retirando a discricionariedade atribuída pela Lei Nº 12.334 ao órgão fiscalizador; a ampliação da participação da população afetada e dos órgãos do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil na elaboração e implementação do PAE; a melhor especificação das infrações e das sanções a serem aplicadas; as especificações de medidas para assegurar a qualidade dos projetos de engenharia das barragens de alto risco e dano potencial associado alto.

Algumas das propostas não aparentam grandes dificuldades para a sua aceitação, outras possuem dificuldade significativa ou até mesmo são inviáveis. Cabe destaque para a obrigatoriedade de contratação de seguro pelos

empreendedores, assunto que tem sido ventilado na comunidade técnica barrageira e que necessita de maior aprofundamento das discussões visando à formação de opinião melhor fundamentada sobre a questão. A obrigatoriedade de elaboração de PAE para todas as barragens, ou mesmo apenas para aquelas que apresentarem risco alto e dano potencial associado alto, implica em avaliação da real capacidade dos empreendedores e dos órgãos fiscalizadores em face das limitações ainda existentes no mercado de profissionais especializados, bem como dos elevados custos de produção da informação que se faz necessária para a elaboração de PAEs consistentes.

3.2.4 Plano de Segurança de Barragens

O principal objetivo do Plano de Segurança de Barragens (PSB) é auxiliar o empreendedor na gestão da segurança do seu barramento. O desenvolvimento e aplicação do PSB são de responsabilidade do próprio empreendedor e dos responsáveis técnicos com as devidas habilitações legais por ele escolhido, devendo ser elaborado de acordo com as metodologias e procedimentos adequados para garantir as condições de segurança necessárias.

De acordo com o art. 8º da Lei nº 12.334/2010, o Plano de Segurança de Barragens deve conter no mínimo as seguintes informações:

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

VII - Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;

VIII - relatórios das inspeções de segurança;

IX - revisões periódicas de segurança.

A periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento dos planos de segurança deverão ser estabelecidos pelo órgão fiscalizador segundo o § 1º do art. 8 da PNSB.

Com vistas a atender a legislação, a ANA, responsável pela fiscalização das barragens de usos múltiplos a qual outorgou o direito de uso, publicou a Resolução nº 236/2017 que estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem.

O PSB, segundo a resolução, deve ser composto por até seis volumes, cada um com os seguintes tópicos: Informações gerais; Documentação técnica do empreendimento; Planos e procedimentos; Registros e controles; Revisão periódica de segurança de barragens e o plano de ações emergenciais, quando exigido.

O plano deve ser elaborado antes do início do primeiro enchimento e deve estar disponível para utilização pela equipe de segurança e para consulta pela Defesa Civil, além disso deve estar sempre disponível no local da barragem, no escritório regional do empreendedor e na sua sede durante toda vida útil do barramento.

As condições de segurança devem ser garantidas ao longo de toda sua vida útil da barragem, devendo ser adotadas medidas de prevenção e controle para estabelecer essa garantia. A resolução nº 236/2017 dispõe sobre a Inspeção de Segurança Regular (ISR), cujo produto final é um relatório que deve conter a classificação do Nível de Perigo de Anomalia (NPA) e o Nível de Perigo Global da Barragem (NPGGB) conforme Tabela 5 e Tabela 6.

O relatório de ISR deve informar o prazo máximo para que as anomalias sejam sanadas caso as mesmas sejam classificadas como alerta ou emergência. Se o NPGGB for classificado como emergência, ou seja, nível vermelho, a defesa civil deve ser alertada imediatamente.

Tabela 5 - Índice de Segurança de Barragens - ISR.
 Fonte: ANA, 2017

NÍVEL	SITUAÇÃO
NORMAL	Determinada anomalia não compromete a segurança da barragem.
ATENÇÃO	Determinada anomalia não compromete de imediato a segurança da barragem, mas, caso venha a progredir, pode comprometê-la, devendo ser controlada, monitorada ou reparada.
ALERTA	Determinada anomalia compromete a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências imediatas para a sua eliminação;
EMERGÊNCIA	Determinada anomalia representa alta probabilidade de ruptura da barragem.

Tabela 6 - Nível de Perigo Global da Barragem - NPGB.
 Fonte: ANA, 2017

NÍVEL	SITUAÇÃO
NORMAL	O efeito conjugado das anomalias não compromete a segurança da barragem
ATENÇÃO	O efeito conjugado das anomalias não compromete de imediato a segurança da barragem, mas caso venha a progredir, pode comprometê-la, devendo ser controlada, monitorada ou reparada
ALERTA	O efeito conjugado das anomalias compromete a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências imediatas para eliminá-las.
EMERGÊNCIA	O efeito conjugado das anomalias representa alta probabilidade de ruptura da barragem.

Em algumas situações, conforme descrito abaixo, o empreendedor deverá ainda realizar a Inspeção de Segurança Especial (ISE), que consiste num relatório com parecer conclusivo sobre as condições de segurança da barragem, contendo recomendações e medidas detalhadas para mitigação e solução dos problemas encontrados e/ou prevenção de novas ocorrências.

- I – Quando o NPGB for classificado como alerta ou emergência;
- II – Antes do início do primeiro enchimento do reservatório;
- III – Quando da realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragem;
- IV – Quando houver deplecionamento rápido do reservatório;
- V – Após eventos extremos, tais como: cheias extraordinárias, sismos e secas prolongadas;
- VI – Em situações de descomissionamento ou abandono da barragem;
- VII – Em situações de sabotagem;

Os relatórios de inspeção devem ser realizados por profissionais habilitados pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA), sendo obrigatória a emissão e apresentação da respectiva Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) pelo profissional aos órgãos competentes.

É importante destacar que o profissional responsável pela elaboração PSB, segundo a resolução do CONFEA nº 1.002/2002, pode responder além de processos nas esferas civil e criminal, um processo ético no Conselho Profissional caso fique comprovado que, em caso de rompimento, houve violação de conduta ante ao ser humano, a seus valores e a profissão.

3.2.5 Plano de Ações Emergências

O Plano de Ações Emergenciais (PAE) é um documento que deve ser elaborado pelo empreendedor, no qual deverão ser estabelecidas as ações a serem executadas em caso de emergência, incluindo a identificação dos agentes que devem ser notificados dessa ocorrência.

De acordo com Viseu e Almeida (2000), o PAE corresponde ao conjunto de ações a serem tomadas pela operação da barragem a fim de detectar o problema, tomar as decisões necessárias e notificar os demais envolvidos (populações e autoridades), devendo conter os mapas de inundação para cada condição de emergência.

A obrigatoriedade da elaboração do PAE é determinada pela entidade fiscalizadora em função da categoria de risco e do dano potencial associado a barragem, fazendo parte do PSB conforme discutido anteriormente.

Segundo Balbi (2008), o plano deve ser implementado antes do primeiro enchimento e deve estar disponível no empreendimento e nas prefeituras envolvidas, devendo ser encaminhado às autoridades competentes e aos organismos de Defesa Civil. Além disso, o órgão fiscalizador deverá informar imediatamente à ANA e ao SINPDEC sobre qualquer não conformidade que implique risco imediato à segurança ou sobre qualquer incidente/acidente ocorrido nas barragens sob sua jurisdição.

3.2.5.1 Conteúdo dos Planos de Ações Emergenciais

Legalmente, de acordo com o art. 12 da lei 12.334/2010, o PAE deve contemplar no mínimo os seguintes itens:

- 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.

De acordo com Balbi (2008), o PAE deve apresentar o seguinte conteúdo mínimo:

- Detecção, avaliação e classificação da emergência;
- Preparação – Procedimentos de resposta, sistemas de comunicação e recursos necessários;
- Responsabilidades;
- Procedimentos de notificação;
- Mapas de inundação, inclusive os de risco hidrodinâmico;
- Documentos para desenvolvimento e manutenção do plano.

Na prática o PAE deve abordar, segundo Balbi (2008), a identificação dos potenciais eventos ou deteriorações que podem oferecer perigo para a barragem e as formas de os mitigar ou de os responder caso ocorram; os mapas de inundação para diferentes cenários de acidentes, que possibilitarão avaliar seus efeitos caso se concretize, permitindo o adequado planejamento por parte das autoridades de defesa civil; e a definição das responsabilidades para cada ação ou tomada de decisão associada ao fluxo de notificações.

É fundamental que ações de comunicação e de alerta internos e externos sejam executados com segurança pelas pessoas indicadas, sem que aja dúvidas sobre as atitudes que devem ser tomadas; para tanto os planos devem ser organizados de modo a facilitar o acesso às informações e a agilizar as tomadas de decisão.

No que diz respeito aos danos provocados a jusante, de acordo com Belladonna (2018), um PAE deve possibilitar o planejamento da municipalidade, das polícias locais, da defesa civil, corpo de bombeiros, das agências estaduais e de outras entidades afetadas na eventualidade de uma falha capaz de provocar a ruptura de uma barragem e a coordenação de esforços entre os diferentes

níveis de governo.

Segundo a ANA (2017), o PAE deve conter uma síntese do estudo de inundação com os respectivos mapas, indicação de Zona de Autossalvamento (ZAS) e os pontos vulneráveis que são potencialmente afetados pela onda gerada pela ruptura da barragem

Para avaliar os danos no vale a jusante é necessário determinar as zonas que ficarão inundadas pela ruptura da barragem, afetando a população, instalações, infraestruturas e ambiente. Para esta avaliação são utilizados modelos hidrodinâmicos que simulam diferentes cheias induzidas. Nestes modelos hidrodinâmicos, além do processo de propagação da onda de inundação, são analisadas diferentes origens do hidrograma de cheia através do desenvolvimento hipotético de distintas brechas de ruptura (BELLADONA, 2018).

A caracterização geral do vale a jusante da barragem deve descrever e localizar a população e as infraestruturas em risco, devendo ser inseridas no PAE. Essas informações devem ser fornecidas a defesa civil que as considerará na elaboração do Plano de Contingência e Proteção de Defesa Civil local. ANA (2016b) orienta que a caracterização do vale a jusante deve considerar o tipo de povoamento existente, se ele é urbano, rural, misto ou disperso; o número de habitantes residentes; o tipo de ocupação social, se ela é primária, secundária ou terciária; as infraestruturas importantes, como rodovias, ferrovias, instalações de armazenamento de produtos perigosos; áreas naturais com estatuto de proteção especial; e patrimônio com interesse histórico.

3.2.5.2 Propagação da onda de cheia

A avaliação dos danos nos vales a jusante de barragens deve ser precedida de estudos prévios, como a estimativa dos parâmetros de ruptura, a simulação da propagação da onda de cheia e a elaboração do mapa de inundação. O estudo de rompimento de barragens é complexo e envolve tanto conhecimentos de mecânica dos solos quanto conhecimento de hidráulica e recursos hídricos, portanto a utilização de ferramentas tecnológicas computacionais é primordial.

O escoamento resultante da ruptura de uma barragem envolve fenômenos de difícil caracterização matemática e com grande variação das

grandezas hidráulicas no tempo e nos espaços (CESTARI, 2014). O estudo da propagação da onda de cheia pode ser realizado através de modelos físicos, empíricos e matemáticos.

Os modelos físicos são utilizados em situações muito específicas de pesquisa visto que são realizados com base no ensaio de ruptura da barragem em escala reduzida em um canal de laboratório. Devido às dificuldades de realização e o alto custo são pouco utilizados (VISEU, 2006).

Os modelos empíricos são baseados em equações obtidas a partir de observações de eventos ocorridos, geralmente esses modelos são particulares e de aplicação restrita ao conjunto de condicionantes que geraram o evento observado.

Os modelos matemáticos são desenvolvidos a partir de equações diferenciais que realizam o balanço de massa e da quantidade de movimento em escoamentos unidimensionais e podem ser divididas em soluções analíticas ou matemáticas.

As soluções analíticas geram resultados contínuos no espaço e tempo permitindo se conhecer os resultados em qualquer ponto de domínio, sua utilização, porém, é restrita a casos muito simplificados em virtude da quantidade de dados gerados, o que demanda alta capacidade de processamento.

As soluções numéricas empregam técnicas de elementos finitos e são aplicáveis a casos reais, porém os resultados são obtidos em apenas alguns pontos e em determinado tempo. Baseados nas equações de Saint-Venant, os modelos numéricos podem ser classificados em quatro tipos, por ordem crescente de precisão:

- Modelos simplificados;
- Modelos hidrológicos;
- Modelos hidrodinâmicos unidimensionais (1D);
- Modelos hidrodinâmicos bidimensionais (2D);

Os dois primeiros modelos, simplificado e hidrológico, não se baseiam nas equações completas de *Saint-Venant* e seu deve ser restrito devido a precisão limitada dos resultados.

Os modelos hidrodinâmicos consideram todos os termos da equação de Saint-Venant. O modelo 1D, de acordo com Morris e Galland (2000) são os mais indicados para os casos práticos pois possuem uma interface mais simples e

apresenta boa precisão nos resultados. De acordo com Curge et al. (1980) o principal critério que orienta a decisão por uma representação unidimensional (1D) ou bidimensional (2D) é a natureza da planície de inundação.

De acordo com Viseu et al. (1999) vales que possuem características topográficas e de ocupação pouco complexas, nos quais o escoamento na planície de inundação segue a mesma direção imposta pelo curso d'água a simulação 1D resulta em uma aproximação adequada. Já em locais com ampla planície de inundação e áreas urbanizadas a simulação 1D deixa de ser válida pois se torna impossível a definição de um eixo de escoamento.

As simulações com modelos hidrodinâmicos 2D apresentam melhores resultados em áreas com extensas planícies de inundação, cursos d'água com transições bruscas e com presença de pontes ou outras estruturas hidráulicas. Todavia, devido à complexidade dos cálculos e a necessidade de maior memória computacional, esses modelos são geralmente aplicados para pequenas áreas de interesse.

A Tabela 7 apresenta alguns dos diversos modelos de simulação de rompimento de barragens disponíveis atualmente a nível mundial de acordo com Lauriano (2009).

Tabela 7 - Modelos de simulação para ruptura de barragens disponíveis mundialmente.
FONTE: Adaptado de Lauriano (2009)

	MODELO	ORGANIZAÇÃO
1D	HEC-RAS	USACE
	MIKE 11	DHI
	Hydro 1D	Mott MacDonald
	InfoWorks RS	Wallingford Software
	Cliv PLUS	EPUSP
	TVDDAM	Royal Institute of Technology
	DYNET - ANUFLOOD	ANU - Reiter Ltd
	DAMBRK-UK	Binnie & Partners
	RUBAR 3	Cemagref
2D	MIKE 21	DHI
	JFLOW	Jeremy Benn Associates
	Hydro 2D	Mott MacDonald
	FLOOD 2D	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
	RUBAR 20	Cemagref
	DYX. 10	Consulting Engineers Reiter Ltd
	TELEMAC-2D	EDF - Ladoratoire National Hydraulique
	DIVAST	Cardiff University
	DelftFLS	Delft Hydraulics

3D	MIKE 3	DHI
	Hydro 3D	Mott MacDonald
	Delft 3D	Delft Hydraulics
	FLUENT	FLUENT
	TRIVAST	Cardiff University
	TELEMAC-3D	EDF - Ladoratoire National Hydraulique

Segundo Rubís (2006), o modelo mais utilizado para simulação de ruptura de barragem é o NWS DAMBRK e o HEC-RAS, que tem um grande emprego em casos práticos visto que a versão mais atualizada que possui um módulo que permite a simulação de ruptura e a modelagem de escoamento não-permanente. Os dois modelos resolvem as equações completas de Saint-Venant e estão disponíveis gratuitamente.

A análise e os efeitos dos acidentes em barragens são complexos e as rupturas ainda não são bem compreendidas. A maior incerteza recai sobre a causa, modo, grau e duração da ruptura, outra incerteza envolve a propagação da onda de cheia e os limites da inundação a jusante. Embora vários casos de ruptura tenham sido documentados, muito poucos, ou nenhum, forneceram uma descrição exata da hidráulica da cheia de ruptura. Fato é que precisão em uma das variáveis não torna as demais precisas e não há duas barragens com modos de ruptura iguais, cada rompimento é único em algum aspecto.

3.2.5.3 Zoneamento de Riscos

Segundo Cestari (2013), o zoneamento do risco consiste na divisão do território potencialmente atingido em áreas classificadas segundo o risco envolvido, a magnitude do dano, a vulnerabilidade e os tempos de alerta envolvidos. É uma ferramenta fundamental para que a defesa civil municipal elabore seu Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil (PlanCon), estabelecendo suas ações de prevenção, mitigação, resposta e recuperação frente ao desastre.

O zoneamento de riscos deve embasar o planejamento de uso e ocupação do solo em regiões a jusante de barragens que ainda estão em fase de planejamento e projeto. Em locais habitados a jusante de barragens este zoneamento é fundamental para se definir o risco nestes locais e municiar as autoridades locais quanto a tomada de decisão em caso de ruptura ou risco iminente. Em alguns países da Europa o zoneamento de riscos é uma ferramenta

fundamental para programas de seguro contra inundações, sobretudo em regiões sujeitas a inundações.

De acordo com Viera (2018), diversos são os critérios de zoneamento de risco. Uma grande maioria se baseia na distância da população em risco à barragem, nos limites de produtos críticos, na distribuição da população no espaço e a eficácia dos processos de alerta e evacuação. Segundo Almeida (2001), as principais características hidrodinâmicas envolvidas no zoneamento de riscos são:

- Áreas atingidas: indica o que será atingido (população, edificações, infraestruturas);
- As cotas máximas dos níveis de água: o fator com maior influência nos danos;
- O instante de chegada da onda e da onda máxima: importante para os tempos de alerta e evacuação, além de definição da zona de autossalvamento;
- Perigo que a água oferece as pessoas: esse fator consiste no produto da velocidade pela altura da lâmina de água ($P=V.H$);
- Velocidade máxima de escoamento: caracteriza o poder destrutivo;
- Duração da submersão: para avaliar os custos materiais e o tempo de recuperação.

Segundo Viseu (2006), as principais variáveis envolvidas no zoneamento são: altura máxima da água, velocidade máxima de escoamento e o tempo de chegada em uma determinada seção.

3.2.5.3.1 Altura máxima

A altura máxima é o primeiro indicador de perigosidade e pode ser chamado de perigosidade estática da água. De acordo com Viseu (2006) pode-se considerar as seguintes condições de perigo:

- Um ser humano “médio”, sem qualquer hipótese de se abrigar numa edificação, fica sob ameaça de vida quando a água atinge valores superiores a 1 metro, sendo esse valor a linha entre perigo reduzido e perigo médio;
- Uma edificação térrea, com altura típica de 3 metros, pode proporcionar uma forma de abrigo suplementar a um indivíduo que esteja na área de

inundação, sendo este valor a linha entre perigo médio e perigo importante;

- Um edifício de 2 ou mais pavimentos, pode, de acordo com raciocínio anterior, proporcionar maior segurança pois permite a implementação da evacuação vertical. Sendo assim o valor de 6 metros é a linha entre perigo importante e perigo total.

A Figura 8 representa graficamente o zoneamento quanto a perigosidade estática da água proposto por Viseu (2006).



Figura 8 - Zoneamento quanto a perigosidade estática.

FONTE: Viseu, 2006

Segundo Almeida (1999), casos reais de inundação quase estática, indicam que, em geral, para profundidades maiores que 3,5 metros, as pessoas atingidas não sobrevivem; para profundidades maiores que 2 metros, 5% da população atingida não sobrevive; para profundidades menores que 2 metros, existe forte probabilidade de sobrevivência.

3.2.5.3.2 Velocidade de escoamento

A velocidade máxima de escoamento caracteriza o poder destrutivo da onda e é um parâmetro importante para se definir o número de vítimas. Segundo Graham (1999) as rupturas que causaram mais vítimas foram aquelas que os edifícios ficaram destruídos em função de altas velocidades de escoamento.

O grau destrutivo dos edifícios pode ser calculado em função peso volumétrico da água e a velocidade de escoamento. Segundo constatado por Viseu (2006) a velocidade de 5,5 m/s é o limite a partir do qual um edifício pode ser destruído pelo escoamento. A mesma autora propôs que a Equação 3 pode ser utilizada para se determinar a destruição de um edifício, considerando que o mesmo suporte uma pressão de 30 kN/m².

$$D = 0,33xU^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

D=1 – destruição total;

D=0 – destruição nula;

U – velocidade de escoamento em m/s.

A Figura 9 ilustra a escala de grau destrutivo em função da velocidade de escoamento proposto por Viseu (2006).



Figura 9 - Zoneamento quanto a perigosidade cinemática.
FONTE: Viseu, 2006

3.2.5.3.3 Tempo de chegada

O instante de chegada da onda de inundação é um fator importante para a definição das zonas de risco pois o tempo eficaz de aviso permite que o poder público e a população se preparem para uma evacuação, reduzindo os danos ao longo do vale. A *Bureau Reclamation* dos Estados Unidos (USBR) adotou uma estimativa da quantidade de vidas perdidas em função do tempo de alerta (Tabela 8), esta estimativa se baseia nas vidas perdidas em acidentes históricos.

Tabela 8 - Número esperado de vítimas em função do tempo de alerta.
FONTE: Adaptado de USBR, 1988

TEMPO DE CHEGADA (MIN)	PERDAS DE VIDAS	NEV – NUM ESPERADO DE VÍTIMAS
0 a 15 min	Significante	NEV = 50% do número pessoas em risco
15 a 90 min	Potencialmente significativa	NEV = (número de pessoas em risco) ^{0,66}
Mais que 90 min	Virtualmente eliminada	NEV = 0,0002 x número de pessoas em risco

O fator tempo de chegada é utilizado na definição de duas zonas de perigo: A zona próxima da barragem, chamada de zona de autossalvamento

(ZAS), em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência. Nas zonas mais distantes a evacuação pode ser orientada pelo poder público uma vez que há tempo para isso.

Cada país possui uma classificação de zoneamento que adota critérios específicos e nomenclaturas distintas: Na Suíça, a chamada “zona de segurança imediata” é delimitada pela distância percorrida pela onda em duas horas. Na França, a zona do “quarto de hora” corresponde a 15 minutos. Na Espanha e Portugal é denominada como “Zona de Autossalvamento” (ZAS) e o tempo considerado é de 30 minutos. Na Itália, essa área corresponde a 10 quilômetros (BALBI, 2008). No Brasil a ZAS corresponde a 30 minutos ou 10 quilômetros, o que ocorrer primeiro (ANA, 2016b).

Nas zonas mais afastadas considera-se que há tempo hábil para atuação da defesa civil no auxílio a evacuação. Essas áreas podem se estender por vários quilômetros e devem ser classificadas de forma a otimizar a atuação das equipes de resposta.

3.2.5.3.4 Perigosidade em função da profundidade e velocidade

De acordo com Viseu (2006), muitos estudos técnicos-científicos adotam a variável composta pelo produto da altura da água (h) pela velocidade de escoamento (V) como uma das mais ilustrativas para representar o grau de perigo, ou perigosidade, associado a uma cheia. A ameaça provocada pelo produto desses fatores corresponde ao Risco Hidrodinâmico (RH) ou Perigosidade Dinâmica (PD), dado em m^2/s :

$$PD = h \times V \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

PD – Risco Hidrodinâmico (m^2/s);

h – altura da lâmina de água (m);

V – velocidade de escoamento (m/s).

Estudos realizados pela USBR em 1989 comprovaram que para uma pessoa com peso de 41 kg o valor do PD que separa o perigo e não perigo

corresponde a $0,7 \text{ m}^2/\text{s}$. Para pessoas com peso de 91 kg esse valor sobe para $2 \text{ m}^2/\text{s}$. Clausen e Clarck (1990) obtiveram com base na análise de informações históricas as seguintes correlações para a perigosidade dinâmica:

- $PD=3\text{m}^2/\text{s}$: Limite para estragos de submersão e destruição parcial;
- $PD=7\text{m}^2/\text{s}$: Limite entre destruição parcial e total.

Resultados de simulação realizadas por Synalven et. al (2000) com pessoas e modelos físicos de edificações com o objetivo de se obter o risco hidrodinâmico, ou perigosidade dinâmica, de uma inundação são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Risco dinâmico e suas consequências.
FONTE: Adaptado de Synaven et al., 2000

PERIGOSIDADE DINÂMICA (M^2/S)	CONSEQUÊNCIAS
< 0,5	Crianças e deficientes são arrastados
0,5 a 1	Adultos são arrastados
1 - 3	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas
3 - 7	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
> 7	Colapso de alguns edifícios

Segundo o projeto RESCDAM (1999), coordenado pelo Instituto Finlandês de Ambiente, o grau de perigo para pessoas e edificações pode ser definido conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Graduação de perigo para pessoas e edificações.
FONTE: Adaptado de RESCDAM, 1999

Classe de Danos Risco de Vida	PERIGOSIDADE DINÂMICA (M^2/S)		
	Pequenos danos Reduzido	Danos parciais Médio	Danos totais Importante
Crianças	< 0,1	0,1 a 0,24	<0,25
Adultos	<0,3	0,3 a 0,7	>0,7
Automóveis	<0,9	0,9 a 1,5	>1,5
Casas fracas	<1,3	1,3 a 2,5	>2,5
Casas bem construída	<2	2 a 5	>5
Casas de tijolo	<3	3 a 7	>7

Viseu (2006) também propõe critérios para graduação de risco para pessoas e edificações, em função da perigosidade dinâmica, conforme Tabela 11. Observa-se que a classificação é realizada em quatro níveis e classes e é bastante semelhante ao que foi proposto por Synalven et. al (2000).

Tabela 11 - Nível de risco hidrodinâmico para edificações e pessoas.
FONTE: Viseu, 2006

NÍVEL	CLASSE	INUNDAÇÃO DINÂMICA PARA EDIFICAÇÕES (hxV)	INUNDAÇÃO DINÂMICA PARA PESSOAS (hxV)
Reduzido	Verde	$hxV < 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$hxV < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Médio	Amarela	$3 < hxV < 5 \text{ m}^2/\text{s}$	$0,5 < hxV < 0,75 \text{ m}^2/\text{s}$
Importante	Laranja	$5 < hxV < 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$0,75 < hxV < 1 \text{ m}^2/\text{s}$
Muito importante	Vermelha	$HxV > 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$hxV > 1 \text{ m}^2/\text{s}$

3.2.6 Proteção e Defesa Civil

Proteção e defesa civil consiste no conjunto de ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação destinadas a evitar desastres e minimizar seus impactos sobre a população e a promover o retorno à normalidade social, econômica ou ambiental (BRASIL, 2017).

O início das atividades de proteção e defesa civil no Brasil e no mundo está relacionado a questões de segurança em tempos de guerra, especificadamente durante da Segunda Guerra Mundial, onde os danos materiais e humanos ultrapassaram o meio militar atingindo gravemente a população em geral. Findada a guerra, as instituições responsáveis pelo atendimento da população se adaptaram à realidade das demandas de segurança e proteção da população e no final da década de 1960 o governo brasileiro criou o então Ministério do Interior que tinha competência de, entre outras coisas, atuar no beneficiamento de áreas e obras de proteção contra secas e inundações e de assistência às populações atingidas por calamidades públicas (BRASIL, 2017).

A proposta de pensar a Defesa Civil como um processo sistêmico, sem limitar-se a ações de resposta e com o objetivo de prevenir ocorrência, foi sistematizada pela Secretaria de Defesa Civil que, a partir de 1990 produziu inúmeros materiais de orientação e de estabelecimento de diretrizes nacionais sobre o tema.

A segurança de barragens deve considerar combinações de medidas estruturais e não estruturas para a minimização dos riscos, visto ser impossível garantir absoluta segurança e nulidade de riscos. Neste sentido, ações de precaução precisam ser planejadas pelo poder público, em consonância com o proprietário da barragem, para atuação em cenários de desastres decorrentes

de rompimentos dessas estruturas. Nesse contexto a proteção da sociedade remete a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) que instituiu um conjunto de ações preventivas, de socorro, assistenciais e recuperativas destinadas a evitar desastres e minimizar seus danos para a população (LOUZADA, 2018).

A PNPDEC, instituída pela lei nº 12.608/2012, representa o marco doutrinário da proteção de defesa civil no Brasil e norteia os programas, planos e projetos que tratam da temática, definindo as competências de cada ente federado. A PNPDEC deve se integrar às políticas de ordenamento territorial, desenvolvimento urbano, saúde, meio ambiente, mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos, geologia, infraestrutura, educação, ciência e tecnologia e às demais políticas setoriais, tendo em vista a promoção do desenvolvimento sustentável, dando indicações fundamentais das principais políticas que se relacionam com a Gestão de Riscos (BRASIL, 2017).

Dentre as competências dos municípios, determinado pelo art. 8º da Lei nº 12.608/2012, pode-se destacar os seguintes (BRASIL, 2012):

- I - executar a PNPDEC em âmbito local;
- III - incorporar as ações de proteção e defesa civil no planejamento municipal;
- IV - identificar e mapear as áreas de risco de desastres;
- V - promover a fiscalização das áreas de risco de desastre e vedar novas ocupações nessas áreas;
- VII - vistoriar edificações e áreas de risco e promover, quando for o caso, a intervenção preventiva e a evacuação da população das áreas de alto risco ou das edificações vulneráveis;
- IX - manter a população informada sobre áreas de risco e ocorrência de eventos extremos, bem como sobre protocolos de prevenção e alerta e sobre as ações emergenciais em circunstâncias de desastres;
- X - mobilizar e capacitar os radioamadores para atuação na ocorrência de desastre;
- XI - realizar regularmente exercícios simulados, conforme Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil;
- XIII - proceder à avaliação de danos e prejuízos das áreas atingidas por desastres;

Conforme pode-se observar na legislação, a atribuição da gestão de riscos recai sob o município, uma vez que os efeitos adversos de um evento são sentidos no âmbito local. Entretanto, segundo Louzada (2018), a União e os Estados também têm competências que estão relacionadas ao apoio técnico e normativo e de orientação aos municípios, visando à redução dos riscos de desastre.

A preparação para a gestão de riscos e desastres deve se efetivar através da elaboração, por parte da coordenadoria municipal de defesa civil, de um Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil (PlanCon) que assistirá o órgão municipal no enfrentamento a crise. A elaboração do PlanCon deve se dar em articulação com as instituições que atuam na gestão de riscos e desastres e com a comunidade. No documento devem ser inseridos os levantamentos das fontes de riscos do município, inclusive àquelas provenientes de barragens, e a previsão das ações que os órgãos envolvidos precisam adotar em um cenário de emergência.

Os elementos básicos a serem considerados para a elaboração do PlanCon, segundo o art. 3º da Lei nº 12.340/2010, são:

- I - indicação das responsabilidades de cada órgão na gestão de desastres, especialmente quanto às ações de preparação, resposta e recuperação;
- II - definição dos sistemas de alerta a desastres, em articulação com o sistema de monitoramento, com especial atenção dos radioamadores;
- III - organização dos exercícios simulados, a serem realizados com a participação da população;
- IV - organização do sistema de atendimento emergencial à população, incluindo-se a localização das rotas de deslocamento e dos pontos seguros no momento do desastre, bem como dos pontos de abrigo após a ocorrência de desastre;
- V - definição das ações de atendimento médico-hospitalar e psicológico aos atingidos por desastre;
- VI - cadastramento das equipes técnicas e de voluntários para atuarem em circunstâncias de desastres;
- VII - localização dos centros de recebimento e organização da estratégia de distribuição de doações e suprimentos.

A principal função do PlanCon é minimizar os danos materiais e humanos que podem ser provocados por um evento extremo. O plano deve prever os mecanismos de divulgação dos protocolos de prevenção, alarme e alerta, as ações emergenciais, as rotas de fuga, os locais para abrigo provisório, e precisa ser testado através de exercícios simulados para comprovar e efetividade do plano. A Figura 10 ilustra as questões relevantes para a estruturação de um Plano de Contingência.

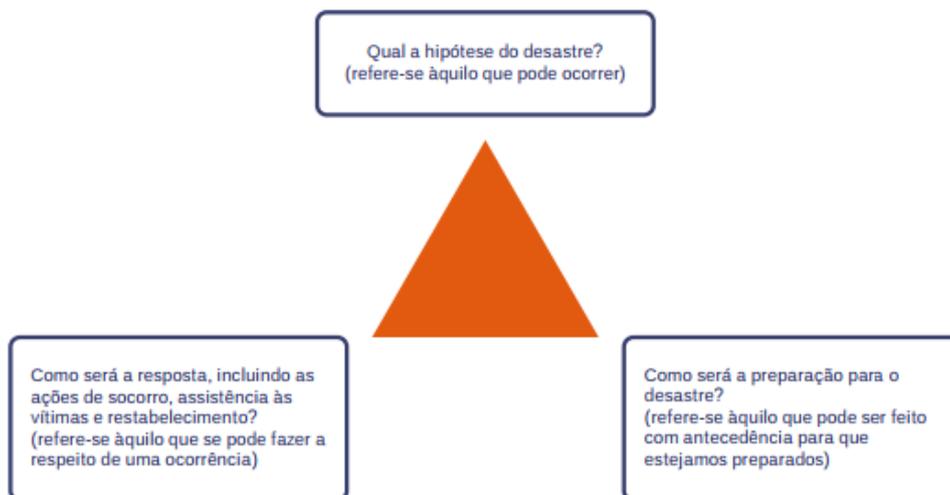


Figura 10 – Questões relevantes para elaboração de uma Plano de Contingência.
FONTE: BRASIL, 2017

Para atender as previsões elencadas acima é fundamental que os seguintes elementos estejam previstos no PlanCon:

- I - Cenários de risco;
- II - Mapeamento com as áreas potencialmente atingidas;
- III - Estimativa da população vulnerável;
- IV - Plano de comunicação para acionamento de autoridades e serviços de emergência.

No que compete ao rompimento de barragens é dever do empreendedor fornecer ao sistema de defesa civil os cenários de risco, o mapeamento das áreas atingidas, mapeamento de riscos hidrodinâmicos, localização a estimativa da população vulnerável e infraestruturas em risco. Estes dados são obtidos através do Plano de Ações Emergenciais (PAE) que identifica potenciais condições de emergência da barragem e estabelece ações a serem seguidas, com a finalidade de mitigar o efeito provocado pelas ondas de cheia no vale a

jusante.

Atualmente existem muitas discussões sobre até onde vai a responsabilidade do empreendedor e da municipalidade, de qualquer forma é necessário integrar as ações destes para que as tomadas de decisão e as ações de socorro estejam alinhadas, resultado em maior segurança e preservação de vidas

3.3 Valoração dos prejuízos

De acordo com Rocha (1995) a avaliação econômica dos prejuízos gerados pelo rompimento de uma barragem devem ser o principal elemento a se considerar na gestão de riscos, visto que o custo de reconstrução pode ser superior ao custo de implantação de sistemas e/ou obras preventivas e corretivas.

A definição de dano pode ser compreendida como a medida que define a intensidade ou a severidade, perda humana, material ou ambiental, física ou funcional imposta/infligida às pessoas, comunidades, instituições, instalações e aos ecossistemas, como consequência de um evento adverso (ALCÂNTARA et al. 2009). Prejuízo pode ser definido como a medida de perda relacionada ao valor econômico, social e patrimonial, de um determinado bem, em circunstâncias de desastres (BRASIL, 2012).

Tachini (2009) descreve que se os danos puderem ser quantificados e, se forem atribuídos valores monetários, os mesmos podem ser caracterizados em “prejuízos”, contudo deve-se ter a clareza de que o termo prejuízo está expressando monetariamente os danos.

Os danos causados por inundação podem ser classificados com tangíveis e intangíveis e subclassificados como diretos ou indiretos. A Tabela 12 detalha a tipologia de danos em função dos setores atingidos.

Tabela 12 - Tipologia de danos decorrentes de inundações em áreas.
FONTE: Machado et al. (2005)

SETOR	DANOS TANGÍVEIS		DANOS INTANGÍVEIS	
	DIRETOS	INDIRETOS	DIRETOS	INDIRETOS
Habitacional	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo.	Custos de limpeza, Alojamento, Medicamentos.	Perdas de vidas humanas.	Estados psicológicos de estresse e ansiedade.

Comércio e serviços	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo. Perdas ou danos a estoques.	Custos de limpeza Lucros cessantes Desemprego.	Perdas de vidas humanas.	Estados psicológicos de estresse, ansiedade e falta de motivação; Danos de longo prazo à saúde.
Industrial	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo. Perdas ou danos a estoques de matéria-prima e produtos acabados.	Custos de limpeza Lucros cessantes Desemprego	Perdas de vidas humanas.	Estados psicológicos de estresse, ansiedade e falta de motivação; Danos de longo prazo à saúde.
Equipamentos públicos e serviços	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo.	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo. Custos de limpeza e de interrupção de serviços. Custos dos serviços de emergência.	Perdas de vidas humanas.	Estados psicológicos de estresse, ansiedade e falta de motivação; Danos de longo prazo à saúde. Inconvenientes de interrupção de serviços.
Infraestrutura	Danos físicos ao patrimônio.	Custos de limpeza e de interrupção de serviços.	Perdas de vidas humanas.	Inconvenientes de interrupção de serviços.
Patrimônio histórico e cultural	Danos físicos ao patrimônio.	Custos de limpeza e de interrupção de serviços.	Perdas de vidas humanas.	Inconvenientes de interrupção de serviços.

Em suma, os danos intangíveis são aqueles provocados por danos morais, sendo praticamente impossível a sua mensuração visto que estão ligados a perda de vidas humanas, lembranças do desastre, angústia e isolamento. Os danos tangíveis podem ser classificados como direto, resultado do contato físico da água com uma edificação, o que pode resultar em danos superficiais ou danos estruturais. Os indiretos são aqueles causados de forma secundária pela inundação, sendo de mensuração bastante complexa uma vez que o prejuízo num local pode ser compensado pelo benefício em outro

Atualmente existem diversos métodos de valoração de danos para se estimar as perdas econômicas nos setores sociais (moradias, educação e cultura e saúde), infraestrutura de serviços como os setores de transporte, comunicação, energia, água e saneamento. Além disso, há também métodos para estimar danos ao meio ambiente, efeitos macroeconômicos e efeitos transversais aos distintos setores (SOUSA, 2018).

Segundo Rocha (1995), cada um dos impactos decorrentes da inundação pode ser ligado a um ou mais parâmetros hidráulicos característicos do fenômeno de inundação ou da submersão na área consideradas. Na prática os parâmetros mais utilizados são altura da lâmina d'água, tempo de submersão e velocidade.

Grande parte da literatura disponível trata de valoração de danos decorrentes de inundações provocadas por cheia naturais, considerando preponderantemente a fator altura da lâmina d'água. Porém, para onda de cheia provocadas por rompimento de barragens o fator perigosidade dinâmica é de suma importância para definição das consequências da cheia induzida, carecendo ser melhor estudada devido a escassa literatura sobre formas de quantificar esses danos e transforma-los em prejuízos de maneira menos melindrosa. Este estudo, porém, não é objeto deste trabalho.

Segundo Nagem (2008) a altura é o fator de maior relevância na mensuração dos danos das cheias urbanas, e por ser a característica mais simples de se trabalhar e, por isso, é o parâmetro mais utilizado nas avaliações dos danos. É este fator que determina a dimensão dos estragos, como por exemplo, delimita se as inundações ficarão restritas às ruas e calçadas, ou se atingirão às edificações.

Um dos métodos para estimar os danos é através da curva nível x prejuízo, no entanto a obtenção de uma curva confiável é deveras complexa. Para sua obtenção são necessários, de acordo com Vaz (2015), o levantamento planialtimétrico cadastral de toda área sujeita a inundação; a avaliação dos bens imóveis; a avaliação dos bens móveis e equipamentos atingidos; a estimativa de perdas oriundas da interrupção dos acessos e de tráfego; e a estimativa das despesas de limpeza e desinfecção das áreas atingidas. Também é importante que se realize uma avaliação das perdas dos setores industrial e comercial submetidos a inundação.

De acordo com Canholi (2005), na ausência de valores reais é possível utilizar índices estimados para a quantificação dos prejuízos, como o valor por m² das áreas residências, comerciais e industriais, custos estimados para veículos particulares e comerciais e tempo perdido pelos passageiros.

Segundo com Fadel (2015), os prejuízos às edificações podem ser estimados através dos custos de reforma de um imóvel de acordo com quatro padrões construtivos - alto, normal, baixo e popular.

Lima (2003) e Machado et al. (2005) definiram como primeiro passo para avaliação dos danos no setor habitacional, o critério de enquadramento em classes socioeconômicas dos atingidos, a partir do poder aquisitivo dos respectivos moradores, da qualidade da construção, área construída, conservação e seu conteúdo (qualidade, quantidade e idade dos imóveis), ao grau de estudo do chefe familiar e à disponibilidade de empregada doméstica. Para isso, utilizaram a metodologia do “Critério Brasil ou Critério Padrão de Classificação Econômica Brasil” que propõem cinco classes socioeconômicas (A, B, C, D e E), em ordem decrescente de poder aquisitivo.

Tachini (2010), por sua vez, considera que os prejuízos decorrentes de inundações são proporcionais a profundidade de submersão e as características dos domicílios, propondo um imóvel padrão para a análise dos danos. Devido à enorme variabilidade das características construtivas das edificações residenciais, sobretudo quanto à localização, idade, área do imóvel e do estado de conservação, procurou-se diminuir essas incertezas, utilizando-se do critério de Enquadramento das Edificações proposto pela NBR 12.721/2006 – “Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios de edifícios”. (TACHINI, 2010).

Para a determinação dos danos, obtêm-se o prejuízo unitário extrapolando-o para quaisquer áreas inundadas, de qualquer padrão construtivo. Este método consiste basicamente em obter o custo unitário de reconstrução através do Custo Unitário Básico da Construção Civil (CUB) em função da classe socioeconômica da região atingida e extrapolá-lo a fim de obter o custo total, aplicando um fator de depreciação.

Segundo Rosa (2015), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divide a população brasileira em cinco classes sociais de acordo com o rendimento familiar bruto mensal, mensurado em salários mínimos: a primeira

Figura 12 que ilustra sua curva cota-volume.

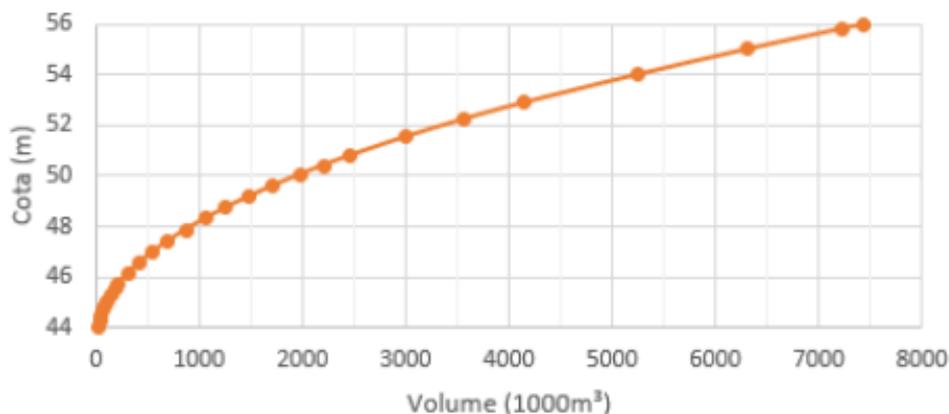


Figura 12 - Curva cota-volume do reservatório Lomba do Sabão.
FONTE: Tschiedel, 2017

4.2 Estudo de rompimento da barragem Lomba do Sabão

O estudo de rompimento da barragem Lomba do Sabão foi realizado por Tschiedel (2017), utilizando o HEC-RAS 5.03, lançado oficialmente pela USACE (U.S Army Corps of Engineers) em setembro de 2016. Este *software* permite que sejam realizadas simulações de escoamento permanente ou não permanente de forma unidimensional ou bidimensional a partir da solução numérica das equações de Sant Venant.

O estudo de rompimento de barragens é resolvido, basicamente, com cinco dados de entrada principais: Topografia do vale a jusante, configuração da brecha, volume do reservatório, coeficiente de Manning e o tipo de equacionamento considerado (1D ou 2D).

Os dados de entrada referente à topografia de jusante partiram de um levantamento aerofotogramétrico com perfilhamento Laser (LiDAR) realizado na região em 2010, que teve como produto um Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução de 1 metro de pixel. O autor do estudo optou por, através de técnicas de geoprocessamento, excluir prédios e casas de modo a se obter um Modelo Digital de Terreno mais fidedigno ao terreno real. Adotou-se uma brecha de formato trapezoidal, com largura de base de 100 metros, altura de 10 metros, inclinação de 19° , com o rompimento se completando em 18 min. O volume do reservatório foi estimado em $7.700.000 \text{ m}^3$, o que corresponde ao volume máximo na cota de 56 metros obtido através da curva cota-volume do

reservatório (Figura 12). O coeficiente de Manning utilizado no estudo foi de 0,020 para o canal principal e 0,030 para as margens (Tschiedel, 2017). Para a previsão do deslocamento da onda de cheia foi adotado o modelo difuso 2D.

No estudo de rompimento realizado por Tschiedel (2017), as variáveis hidráulicas de interesse, como vazão de pico (Q_p), tempo de pico (t_p), altura máxima (h) e velocidade máxima (V_{max}), foram realizadas para 7 seções (S1 a S7) localizadas ao longo do arroio Dilúvio conforme ilustrado na Figura 13.

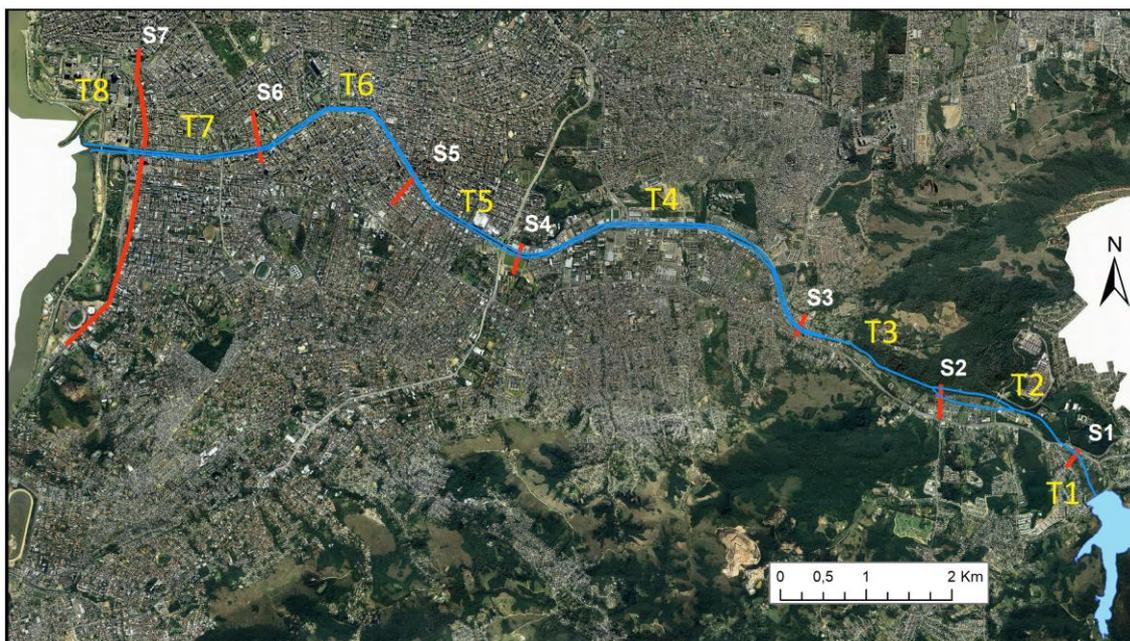


Figura 13 - Localização das seções consideradas ao longo do Arroio Dilúvio.
FONTE: Adaptado de Tschiedel, 2017

Os resultados para cada seção estão dispostos na Tabela 13. Nota-se que a altura máxima da inundação ocorre nas seções imediatamente a jusante da barragem, e a velocidade máxima a pouco mais de 4 km do barramento, na seção S3, em virtude do estreitamento do vale.

Tabela 13 - Seções consideradas no zoneamento de riscos.
FONTE: Adaptado de Tschiedel (2017)

SEÇÃO	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Distância do barramento (m)	650	2450	4268	8223	9842	12412	13610
Q_p (m^3/s)	4222	3849	3614	3217	2999	2430	1803
T_p (min)	19	23	29	43	51	67	75
Altura (m)	4,20	4,20	3,00	2,60	2,60	1,70	0,10
Vel. (m/s)	6,90	7,10	10,50	9,10	8,30	8,30	5,00

A mancha de inundação gerada pelo rompimento hipotético é ilustrada

na Figura 14. Cabe salientar que a mancha fornecida pelo autor do estudo de rompimento consistia em um arquivo *shapefile* do tipo polígono sem nenhuma informação a não os limites de inundação. Com essa informação preliminar é possível observar que a mancha divide a cidade duas regiões, tendo a Av. Ipiranga como eixo de inundação. Também se observa que a partir da Av. João Pessoa a mancha se espalha atingindo grande parte dos bairros Cidade Baixa, Menino Deus e Praia de Belas.

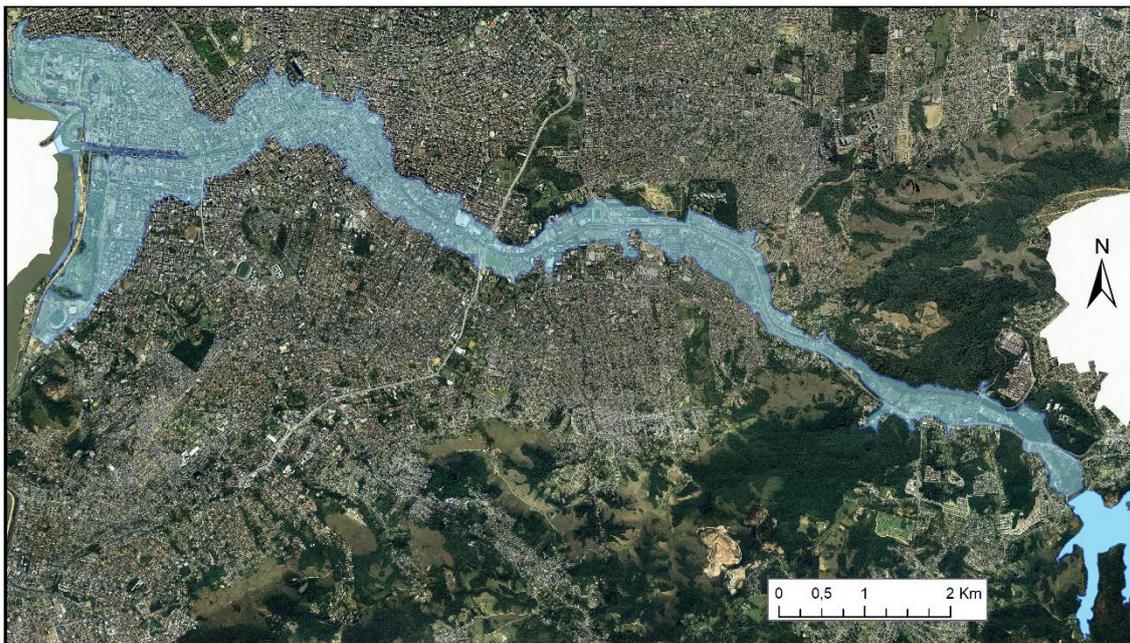


Figura 14 - Mancha de inundação gerado pelo rompimento hipotético da Barragem Lomba do Sabão. FONTE: Autor com dados de Techiedel (2017).

Estudo publicado por Rossato et. al (2002) aponta que existiam depósitos de assoreamento de aproximadamente 70 cm de espessura nos pontos extremos dos "braços" da represa, onde desaguam seus afluentes. Esse depósito ocorre em função do uso e ocupação do solo nas imediações da represa e também ocorre no fundo do reservatório. O estudo também indica que, ainda no início da década de 2000, cerca de 31,6% da lâmina d'água já estava comprometida em função do assoreamento.

É importante ressaltar que em função do assoreamento constatado volume real do reservatório pode ser muito menor que os 7.700.000 m³ considerados no estudo de rompimento ou até menor que os 2.935.342 m³ apontado por Maizonave *et al.* (2005), o que influenciaria diretamente nas proporções da mancha de inundação. O uso do volume considerado, porém, é a favor da segurança.

5 METODOLOGIA

5.1 Zoneamento de riscos

O zoneamento de riscos consiste em representar a distribuição geoespacial, no vale a jusante, do nível de perigo que as populações e bens se encontram em relação a ruptura da barragem. Este zoneamento se faz analisando o tempo de chegada da onda de cheia aos locais de interesse, de acordo com a evolução temporal das variáveis hidráulicas apresentadas no estudo de ruptura. Também deve ser analisado a profundidade de submersão e a velocidade de escoamento da onda de inundação visto que a associação destes dados gera os mapas de risco hidrodinâmico.

No âmbito deste trabalho serão utilizados os dados disponibilizados pelo autor do estudo do rompimento da barragem em questão, em função das seções na representadas na Figura 13, de acordo com a Tabela 13.

5.1.1 Zona de Autossalvamento – ZAS

Para a definição da ZAS considerou-se o que preconiza a ANA, onde a zona de autossalvamento é a região que corresponde a distância em que a onda de inundação leva 30 minutos para chegar ou 10 quilômetros, o que ocorrer primeiro (ANA, 2016b). Utilizou-se o tempo de pico para a definição da ZAS pois o tempo de chegada da onda não foi disponibilizado pelo autor do estudo de rompimento.

5.1.2 Perigosidade estática

A perigosidade estática da água, também chamada de altura de submersão, foi calculada a partir de uma malha de pontos com 25x25 m distribuídas de maneira uniforme em toda extensão da mancha de inundação. Antes de obter as profundidades de submersão de cada um dos 15.000 pontos pré-definidos foi necessário espacializar a onda de cheia, ou seja, obter uma superfície para mancha de inundação, visto que o autor do estudo de rompimento disponibilizou apenas o perímetro de inundação.

A espacialização da onda de cheia foi possível após a elaboração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolução obtido a partir da base altimétrica vetorial contínua de Porto Alegre (Figura 15A) elaborado a partir de

um levantamento aerofotogramétrico. Estas informações, inicialmente impressas em cartas topográficas, foram digitalizados e vetorizados pela 1ª Divisão de Levantamento do Exército (1a DL) e posteriormente estruturadas em arquivos vetoriais contínuos pelo Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia (LABGEO) da UFRGS, a partir dos arquivos CAD da Prefeitura, contendo os elementos referentes às curvas de nível e aos pontos cotados das cartas em escala 1:1.000 de Porto Alegre (HASENACK, 2010). Após a geração do MDT para todo território do município realizou-se um recorte para a área de interesse (Figura 15B). Todo este processamento foi realizado a partir de técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG, com auxílio do ArcMap® 10.5.

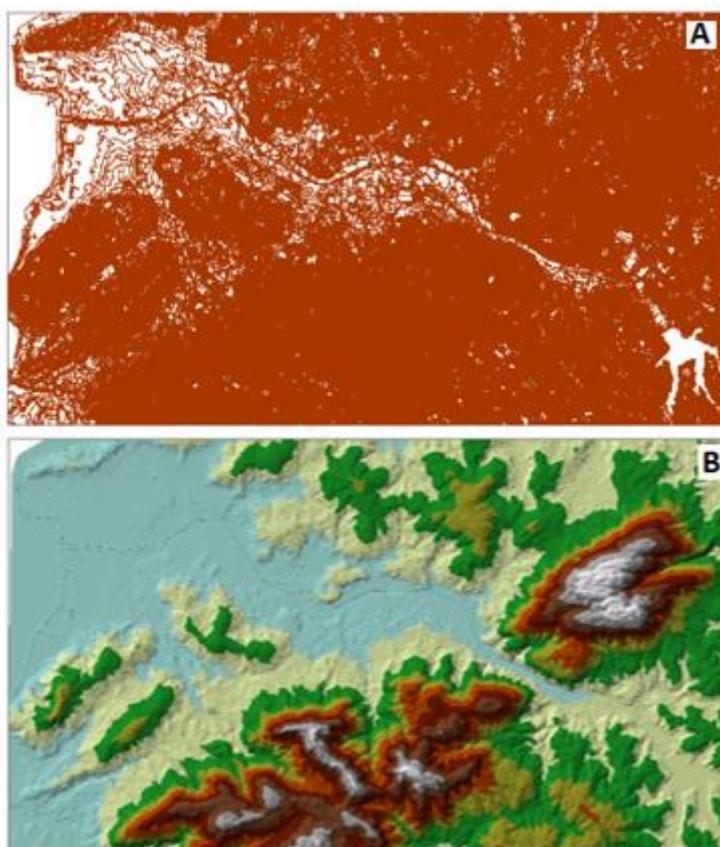


Figura 15 - Curvas de nível disponibilizadas pelo LABGEO e MDT gerado.
Fonte: Autor

Para a espacialização da onda de inundação foram criados cerca de 2.300 pontos ao longo de todo perímetro da mancha. Estes pontos foram sobrepostos ao MDT gerado anteriormente obtendo-se então suas altitudes. Após procedeu-se com uma interpolação geoestatística destes pontos por meio de um método conhecido como krigagem.

Segundo Jakob (2002) a krigagem é considerada uma boa metodologia

de interpolação de dados, ela utiliza o dado tabular e sua posição geográfica para calcular as interpolações. Utilizando o princípio da Primeira Lei de Geografia de Tobler, que diz que unidades de análise mais próximas entre si são mais parecidas do que unidades mais afastadas. A krigagem utiliza funções matemáticas para acrescentar pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes, e criar assim os novos pontos interpolados com base nessas combinações lineares de dados.

Após a krigagem dos dados foi criado um Modelo Digital de Elevação para a mancha de inundação conforme ilustrado na Figura 16.

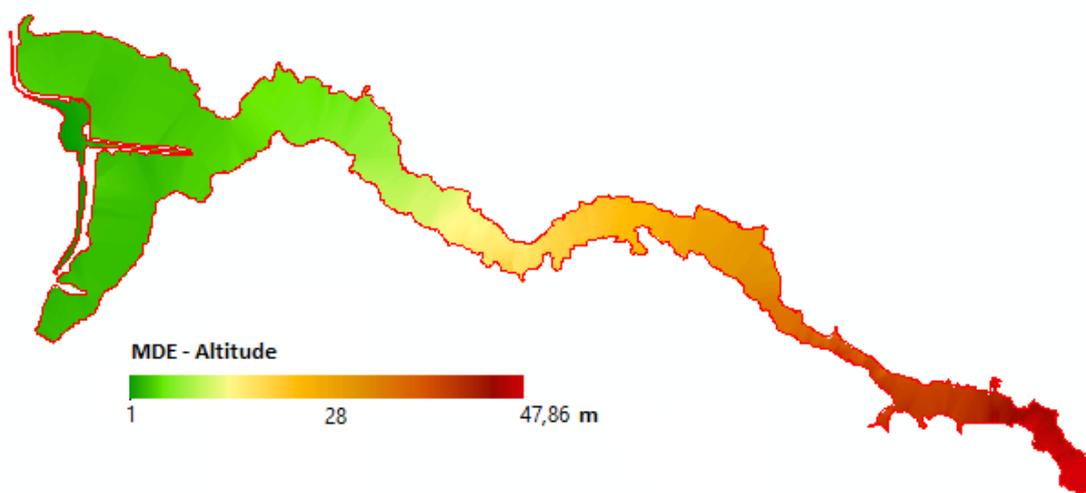


Figura 16 - MDE gerado para a mancha de inundação.
Fonte: Autor

A Figura 17 ilustra o fluxo de trabalho para a obtenção do Modelo Digital de Elevação da mancha.

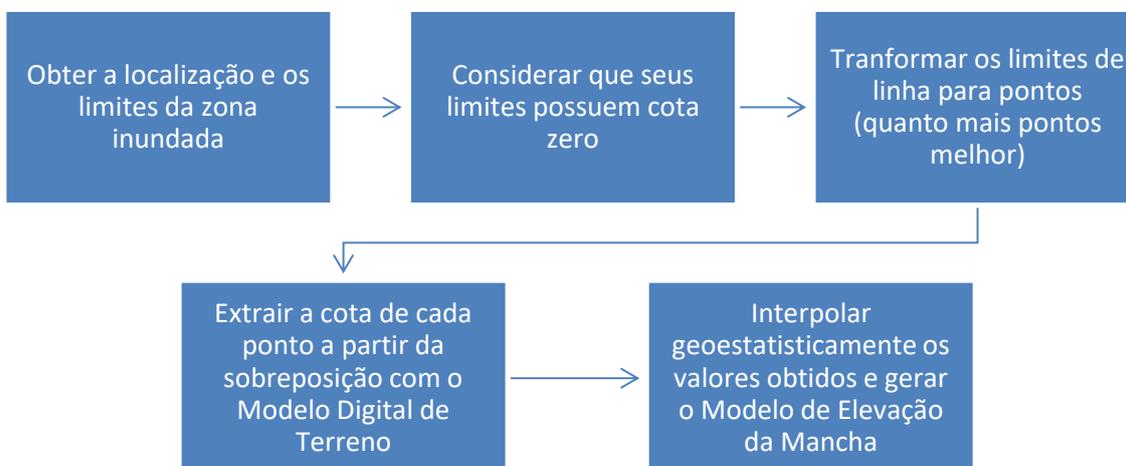


Figura 17 - Fluxo de trabalho para obter o Modelo Digital de Elevação da mancha de inundação.
FONTE: Autor

Por fim, para a obtenção da profundidade de submersão nos 15.000 pontos gerados, subtraiu-se as cotas do MDE da mancha de inundação das cotas do Modelo Digital de Terreno da região. Após a obtenção da profundidade de submersão de cada ponto procedeu-se com uma interpolação geoestatística destes dados e posterior geração de Modelo Digital de Elevação da perigosidade estática com resolução de 1x1 m.

Para cada faixa de submersão foi atribuído o índice de perigosidade (Tabela 14) proposto por Viseu (2006), conforme discutido na revisão bibliográfica deste trabalho.

Tabela 14 - Nível de perigosidade estática da água.
Fonte: Adaptado de Viseu (2006)

NÍVEL DE PERIGO	ALTURA (M)
Reduzido	Até 1
Médio	1 a 3
Importante	3 a 6
Muito importante	Maior que 6

5.1.3 Velocidade de escoamento

Os dados foram obtidos ao longo de seções de interesse e, buscando extrapola-los de modo que se trabalhe a favor da segurança, a velocidade e demais variáveis hidráulicas foram calculadas pela média entre os dados das seções a jusante e a montante deste trecho conforme (Figura 13), ou seja, para calcular a velocidade do trecho T2 foi realizada a média aritmética entre as velocidades das seções S2 e S3. Para o trecho T1 será considerado os dados da seção S1 e de modo similar, para o trecho T8 serão considerados os dados da seção S7. O cálculo destas variáveis hidráulicas encontra-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Variáveis hidráulicas nas seções consideradas.
Fonte: Autor

SEÇÃO	S1	S1-S2	S2-S3	S3-S4	S4-S5	S5-S6	S6-S7	S7
TRECHO	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Qp (m³/s)	4222	4035,5	3731,5	3415,5	3108	2714,5	2116,5	1803
Tp (min)	19	21	26	36	47	59	71	75
Altura (m) ¹	4,2	4,2	3,6	2,8	2,6	2,15	0,9	0,1
Vel. (m/s)	6,9	7	8,8	9,8	8,7	8,3	6,65	5

Para cada trecho foi atribuído um grau destrutivo, conforme proposto por

Viseu (2006), e apresentado na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16 - Nível de destruição pela velocidade da água.
Fonte: Adaptado de Viseu (2006)

NÍVEL DE PERIGO	VELOCIDADE (M/S)	DESTRUIÇÃO
Reduzido	Até 2	Até 0,13
Médio	2 a 4	De 0,13 a 0,53
Importante	4 a 5,5	De 0,53 a 1
Muito importante	Maior que 5,5	Total

É fato que o ideal seria que as velocidades fossem obtidas ponto a ponto conforme as profundidades de submersão, porém as informações geradas a partir da extrapolação das velocidades podem nortear as tomadas de decisão.

5.1.4 Perigosidade dinâmica

A perigosidade dinâmica será calculada pelo produto das alturas de submersão obtidas na malha de pontos do item 5.1.2 pelas velocidades obtidas nos 8 trechos da mancha de inundação conforme item 5.1.3.

Para cada faixa de perigosidade dinâmica será atribuído o índice de perigosidade para edificações e pessoas (Tabela 17) proposto por Viseu (2006), conforme discutido na revisão bibliográfica deste trabalho

Tabela 17 - Nível de risco hidrodinâmico para edificações e pessoas.
FONTE: Viseu, 2006

NÍVEL	CLASSE	INUNDAÇÃO DINÂMICA PARA EDIFICAÇÕES (hxV)	INUNDAÇÃO DINÂMICA PARA PESSOAS (hxV)
Reduzido	Verde	$hxV < 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$hxV < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Médio	Amarela	$3 < hxV < 5 \text{ m}^2/\text{s}$	$0,5 < hxV < 0,75 \text{ m}^2/\text{s}$
Importante	Laranja	$5 < hxV < 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$0,75 < hxV < 1 \text{ m}^2/\text{s}$
Muito importante	Vermelha	$HxV > 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$hxV > 1 \text{ m}^2/\text{s}$

5.2 Caracterização geral do vale

A caracterização geral do vale a jusante de uma barragem consiste no reconhecimento desta região para que se obtenha informações detalhadas da existência e localização das estruturas e pessoas em risco.

A topografia da região foi analisada através de um Modelo Digital de Terreno (MDT) gerado conforme 5.1.2.

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo, infraestruturas e localização das populações foram utilizadas as metodologias a seguir.

5.2.1 Uso e ocupação do solo

A identificação e classificação do uso do solo são fundamentais no reconhecimento do ambiente e podem ser utilizadas tanto para o planejamento do poder público com relação ao crescimento da cidade, quanto no diagnóstico dos impactos que uma alteração neste sistema pode causar.

No caso de vales a jusante e barragens, principalmente aquelas situadas a montante de centros urbanos, o mapeamento do uso e ocupação do solo é importante para se determinar o que será atingido, visando orientar o poder público nas tomadas de decisão.

Em março de 2008 foi lançado pela Prefeitura da capital a publicação denominada Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre que reuniu e sistematizou estudos, dados existentes e informações novas a fim de elaborar uma síntese de temas importantes para o município.

Segundo Hasenack (2008) o mapeamento de vegetação realizado por ocasião do Diagnóstico Ambiental teve como objetivo identificar e caracterizar genericamente estes remanescentes de vegetação natural, e também os diferentes usos que se faz observar. A ocupação urbana foi mapeada juntamente com a vegetação a fim de permitir a justaposição e complementariedade dos dois temas em todo território municipal.

De acordo Bittencourt et al. (2006) o conhecimento da distribuição espacial das várias formas de ocupação do espaço necessita de informações detalhadas, que possam ser obtidas com grande periodicidade, devido ao caráter extremamente dinâmico desse ambiente. Visando reduzir as incertezas com relação às mudanças de ocupação da cidade, uma vez que o mapeamento foi realizado a partir de imagens do satélite Quickbird obtidas entre os anos de 2002 e 2003, os mapas de uso e ocupação foram confrontados com imagens de satélite atuais disponíveis no Google Earth® para as alterações que se fizessem necessárias.

A Tabela 18 elenca os principais domínios e tipos de vegetação e edificações utilizados para classificação do uso e ocupação de solo e que serão considerados no mapeamento da região atingida pela onda de inundação, no âmbito deste trabalho.

Tabela 18 – Domínios e tipos de vegetação e edificações utilizados para a classificação de uso e ocupação do solo da Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre.

FONTE: Adaptado de Heinrich (2008),

DOMÍNIO	TIPO
Vegetação Arbórea	Mata nativa
	Esta formação arbórea é composta por espécies nativas, sem alteração significativa nos estratos inferiores e em bom estado de conservação.
	Mata degradada
	É uma formação arbórea composta predominantemente por espécies nativas, em que se verifica algum grau de degradação, como a presença de trilhas, voçorocas, desmatamentos, depósito de rejeitos e outros
Vegetação Arbustiva	Bosque
	É uma formação arbórea do tipo parque, típica de áreas submetidas a pastejo ou utilizadas para lazer em parques e praças
Vegetação Arbustiva	Vulgarmente conhecida como capoeira e vassoural, esta classe é uma formação arbóreo-arbustiva composta por mata em estágio intermediário de sucessão, com predomínio do estrato arbustivo e presença de elementos arbóreos isolados.
Vegetação Herbácea	Campo nativo
	A classe campo nativo constitui uma formação herbácea composta principalmente por gramíneas, e que apresenta baixa pressão antrópica.
	Campo manejado
	A classe campo manejado constitui uma formação herbácea submetida a pastejo ou a cortes periódicos, constituindo uma cobertura vegetal bastante homogênea. É típica de áreas de criação de gado e áreas de lazer e gramados urbanos.
Edificações Rurais	Área se vegetação
	Afloramento rochoso: áreas com presença de rocha exposta.
Edificações Urbanas	Edificações e instalações rurais em geral (casas, silos, galpões, pocilgas, aviários, estábulos etc.).
	Edifícios
	Áreas com ocupação predominante por edifícios individuais ou blocos de edifícios de quatro ou mais pavimentos.
	Edifícios e casas
	Áreas com ocupação predominantemente residencial, com proporção equivalente de casas e edifícios, sendo estes geralmente de pequeno porte. Estas áreas representam setores em fase de adensamento, com as casas sendo gradualmente substituídas por edifícios.
	Casas
	Áreas com ocupação predominante de casas em loteamentos. O desenho urbano é variado, mas o arruamento é regular, embora os terrenos tenham tamanho bastante variável. Contêm, na quase totalidade, residências unifamiliares. Incluem também conjuntos residenciais unifamiliares.

	Casas isoladas
	Áreas com ocupação predominante de casas, mas com terrenos grandes que resultam em maior afastamento entre as edificações. Têm baixa densidade de ocupação e apresentam grande área verde.
	Ocupação espontânea
	Geralmente área de ocupação irregular, sem padrão viário e com várias casas por terreno. As ruas são sinuosas e nem todos os terrenos têm frente para a rua. Em áreas consolidadas, a densidade de casas de tamanho reduzido é elevada.
	Pavilhões
	Edificações de grande superfície construída, como fábricas, armazéns, galpões, depósitos etc. Inclui também os cemitérios.
Áreas não edificadas	Solo exposto
	Áreas antropizadas, com solo sem cobertura vegetal (aterros, obras de terraplenagem, mineração etc.)
	Vias
	Inclui todas as vias e áreas pavimentadas com largura significativa em relação ao entorno, possíveis de individualizar na escala do mapeamento.
Água	Corpos d'água
	Inclui diversos corpos d'água com largura significativa na escala de mapeamento (arroyos, açudes, barragens etc).

O mapeamento do uso e ocupação do solo da área atingida pelo rompimento da barragem foi realizado a partir da sobreposição do mapa elaborado pelo Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre e da macha de inundação gerada por Techiedel (2017) através do Software Arcmap® 10.5. De modo complementar também foram utilizadas imagens de satélite disponíveis no Google Earth, fotos pelo Street View, além de visitas aos locais de maior interesse.

5.2.2 Populações e domicílios

A avaliação da densidade populacional e domiciliar foram realizadas a partir dos dados do censo demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), divididos por setores censitários. De acordo com Penha (2014), o censo demográfico é o mais complexo levantamento estatístico realizado por um país, quando são investigadas as características da população e dos domicílios em todo território nacional. Por abranger todo país, constitui a principal fonte de dados sobre as condições dos municípios, bem como de

recortes territoriais menores como distritos, subdistritos, bairros e outras unidades territoriais criadas a partir da agregação da unidade de coleta do censo, denominada de setor censitário.

Os setores censitários estabelecidos pelo IBGE são as menores unidades territoriais e são utilizados para fins de coleta do censo. A demarcação dos setores censitários é feita em consonância com os critérios de operacionalização da coleta de dados, de tal maneira que abranjam uma área que possa ser percorrida por um único recenseador em um mês e que possua em torno de 250 a 350 domicílios em áreas urbanas.

O município de Porto Alegre foi dividido pelo IBGE em 2403 setores censitários, dos quais 232 estão total ou parcialmente inseridos na área de inundação. Os setores que estão parcialmente inseridos na área de inundação terão seus dados ponderados de acordo com o percentual de área inundada em relação a sua área total, considerando que os dados se distribuem de maneira uniforme em toda sua extensão.

A partir das informações de cada um desses setores censitários será calculada os seguintes dados:

Quantidade de moradores por faixa etária: Crianças de 0 a 12 anos; Adolescentes e jovens de 13 a 18 anos; Adultos de 19 a 60 anos e idosos de 61 a 80 anos e maiores de 80 anos de idade. Segundo critérios do IBGE, a data de referência do censo é 31 de julho de 2010 e, considerando o tempo transcorrido desde o censo, foi aplicado no resultado obtido o mesmo crescimento populacional observado em Porto Alegre segundo o Painel de Cidades do próprio instituto.

Total de domicílios: local estruturalmente separado e independente que se destina a servir de habitação a uma ou mais pessoas, ou que esteja sendo utilizado como tal. Os critérios essenciais desta definição são os de separação e independência. Neste trabalho serão considerados três tipos de domicílio, a saber:

Casa - quando localizado em uma edificação de um ou mais pavimentos, desde que ocupada integralmente por um único domicílio, com acesso direto a um logradouro.

Casa de vila ou de condomínio - quando localizado em edificação que fazia parte de um conjunto residencial (condomínio) constituído de dependências

de uso comum. As casas de condomínio geralmente são separadas umas das outras, cada uma delas tendo uma identificação de porta ou designação própria.

Apartamento - quando localizado em edifício de um ou mais andares, com mais de um domicílio, servidos por espaços comuns; de dois ou mais andares em que as demais unidades eram não residenciais; e de dois ou mais pavimentos com entradas independentes para os andares;

O mapa de setores censitários e suas informações foram obtidos a partir do site do IBGE na *internet*, filtrados pela sobreposição do *shapefile* do mapa dos setores e a mancha de inundação através do ArcMap® 10.5. Os dados resultantes foram tratados com auxílio de planilha eletrônica.

5.2.3 Infraestruturas

Para auxiliar o levantamento das infraestruturas impactadas foi utilizada a Declaração Municipal Informativa das Condições Urbanísticas de Ocupação do Solo (DMI) instituída pelo Decreto Municipal 18.624/2014. A DMI é uma aplicação WebGIS (*Web Geographical Information System*), disponibilizado pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente e da Sustentabilidade (SMAMS) na sua página na internet. Também foram utilizadas imagens de satélite, arquivos *shapefile* disponibilizados pelo Observatório da Cidade de Porto Alegre (OBSERVAPOA) em seu canal oficial, além de visitas de campo para complementação das informações.

A partir da sobreposição dos dados de interesse do DMI, e/ou de imagens de satélite e/ou *shapefiles* com a mancha de inundação, bem como das visitas de campo, foram extraídas as seguintes informações:

- Vias de tráfego arteriais, que compreendem nas principais avenidas da cidade, próprias para o transporte de passageiros e de carga;
- Pontes e passarelas de pedestres que ligam as margens do arroio Dilúvio;
- Subestações de energia elétrica;
- Hospitais;
- Postos de combustível;
- Unidades do corpo de bombeiros;
- Instalações de defesa civil;
- Instalações de serviços de atendimento médico móvel de urgência;

- Patrimônio de interesse histórico.

Os dados coletados foram dispostos em uma tabela informando suas coordenadas geográficas e a distância da barragem, conforme orienta o Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência da ANA (ANA, 2019). Também consta na tabela o grau de perigosidade estática e dinâmica a qual está inserido e se está ou não inserida na zona de autossalvamento. Estas informações são essenciais para o planejamento dos interessados para estabelecer ações de prevenção e mitigação dos danos, sobretudo aquelas estruturas que necessitam permanecer em constante funcionamento como hospitais e subestações de energia elétrica.

5.3 Valoração dos prejuízos

Neste trabalho será empregado o modelo proposto por Tachini (2010) com algumas adaptações à realidade local. Tachini (2010) considera o Custo Unitário Básico da Construção Civil (CUB) como unidade base para a quantificação do prejuízo, considerando um fator de depreciação de 95% visto que o CUB representa o custo de uma construção nova. O CUB é divulgado mensalmente pelo Sindicato das Indústrias de Construção Civil (SINDUSCON) do estado da federação onde o estudo é realizado, para o Rio Grande de Sul o CUB divulgado em maio de 2020 é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - CUB para o Rio Grande do Sul.
FONTE: Adaptado de Sinduscon/RS, 2020

CLASSE	CUB (R\$/m ²)
A	2.441,32
B	1.922,05
C e D	1.507,40
E	1.590,99

Outros dois fatores importantes para o cálculo são a profundidade de submersão, pois influencia na intensidade do dano, e a classe socioeconômica a qual a família está inserida, visto que famílias com renda mais alta tendem a possuir imóveis mais caros, o que gera maiores prejuízos em caso de inundação. A altura de submersão deve ser ponderada conforme Tabela 20, uma vez que os dados são diretamente proporcionais a esta.

Tabela 20 - Percentual de dano à edificação dos imóveis padrão segundo a altura de submersão.
FONTE: Tachini, 2010

CLASSE	ALTURA DE SUBMERSÃO (m)				
	0 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5
A	16%	20%	24%	28%	32%
B	13%	17%	20%	26%	28%
C e D	12%	16%	18%	24%	26%
E	14%	17%	20%	26%	28%

A classe socioeconômica aplicada é aquela definida pelo IBGE, onde a população é dividida em cinco classes sociais de acordo com o rendimento familiar bruto mensal, mensurado em salários mínimos conforme discutido anteriormente neste trabalho. A classificação é apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 - Extrato socioeconômica em função da renda média familiar.
FONTE: Adaptado de Rosa, 2015

CLASSE	Nº DE SALÁRIOS MÍNIMOS	RENDA FAMILIAR (R\$)*
A	Acima de 20	Acima de 20.900,00
B	De 10 a 20	De 10.450,00 a 20.900,00
D e C	De 2 a 10	De 2.090,00 a 10.450,00
E	Até 2	Até 2.090,00
*Considerando o SM vigente de R\$ 1045,00 em 2020		

Os dados relativos à renda média serão extraídos dos setores censitários de modo similar ao item 5.2.2, enquanto a altura de submersão será obtida a partir da sobreposição do mapa de perigosidade estática ao mapa dos setores censitários. Para fins de simplificação a altura de submersão será aquela obtida no centro geométrico do setor censitário.

De acordo com Tachini (2010) o dano estimado a edificação pode ser calculado através da Equação 4 segundo a classe econômica do setor censitário na qual estão inseridas, e a quantidade de residências atingidas, obtidos através da grade estatística do IBGE.

$$DRE = 0,05 \times CUB \times Ped \times A \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

DRE: dano residual relativo a edificação em R\$;

0,05: fator que representa 5% do valor do CUB;

CUB: custo unitário básico da construção civil em R\$/m²;

Ped: percentual de dano as edificações em função do padrão construtivo;

A: área construída.

A valoração de prejuízos no âmbito deste trabalho foi realizada por área do setor censitário inseridos nas regiões residências, ao invés da área das edificações conforme proposto por Tachini (2010), conforme o mapa de uso e ocupação do solo.

A Figura 18 ilustra o processo de cálculo dos prejuízos. A adaptação da metodologia ocorreu, pois, a quantidade de casas na área inundada representa apenas 15% do total de domicílios, o que tornaria o cálculo muito impreciso. Além disso o levantamento da quantidade de edifícios na área inundada é complexo e demandaria um estudo mais aprofundado.

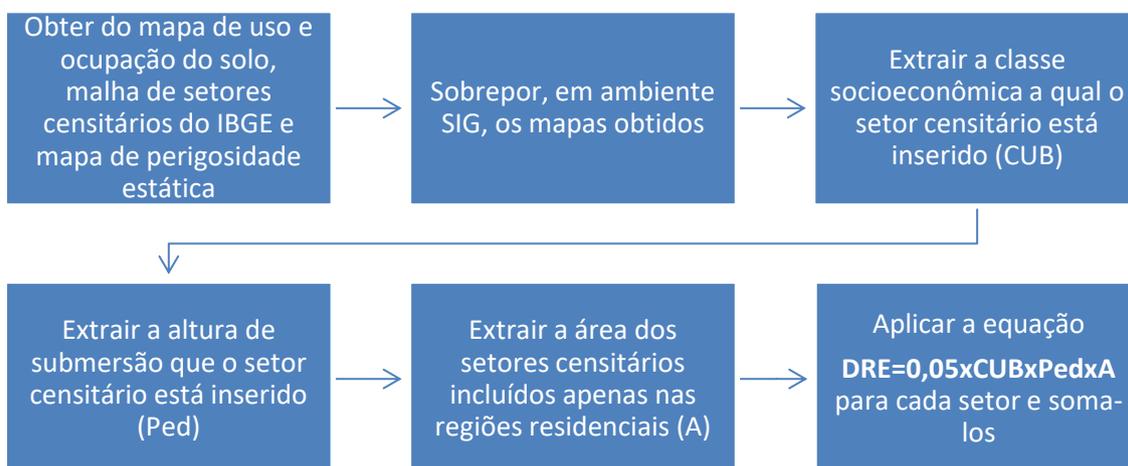


Figura 18 - Fluxograma do cálculo dos prejuízos.
FONTE: Autor

O prejuízo total causado nas edificações é soma dos prejuízos unitários de cada setor censitário, segundo o padrão construtivo das edificações em função da classe social a qual pertence os moradores e da profundidade de inundação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Zoneamento de riscos

6.1.1 Zona de Autossalvamento - ZAS

O limite da ZAS, conforme as variáveis hidráulicas da Tabela 13, é na seção S3 cujo pico da onda de inundação leva 29 min para chegar, sendo que,

por praticidade e melhor percepção das autoridades e população em geral, determinou-se que a ZAS se estenderá por mais 300 metros até a Av. Antônio de Carvalho, onde há uma limitação física que identificará os limites desta zona com maior facilidade. A ZAS é ilustrada na Figura 19.

Conforme será discutido com maiores detalhes no item de caracterização do vale a jusante, grande parte da área da ZAS pertence a UFRGS, portanto é uma região pouco habitada, minimizando os impactos a população. No entanto, devido à grande movimentação que o campus da universidade proporciona a região, é necessário que seus alunos, funcionários e frequentadores sejam informados sobre o perigo que estão sujeitos e sejam treinados para agir em caso de acidente.

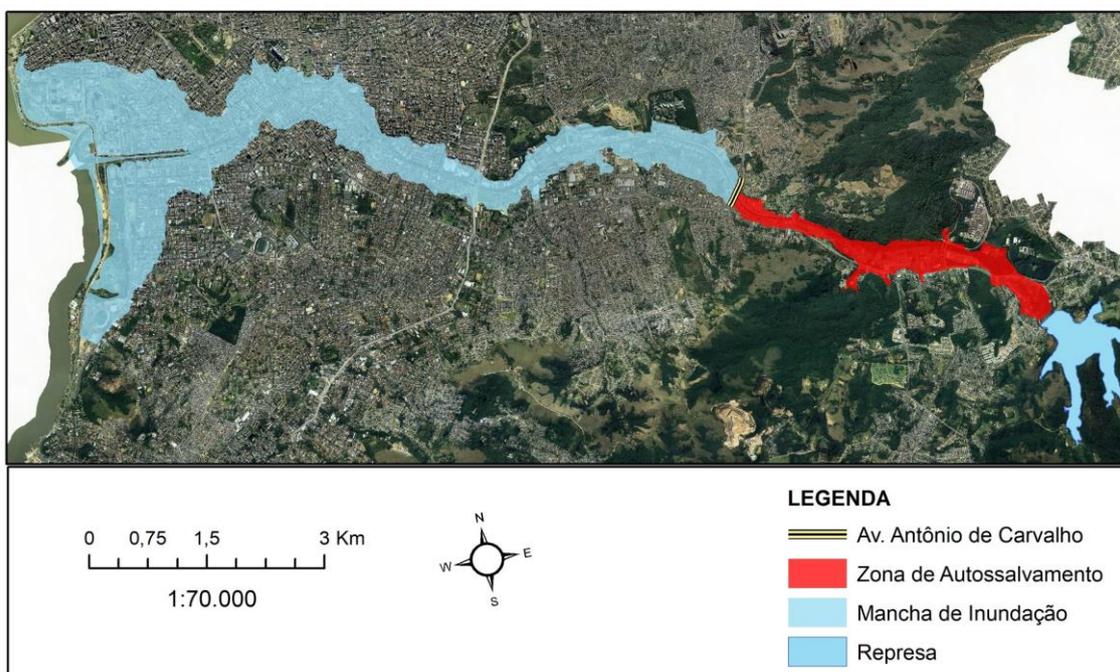


Figura 19 - Localização da Zona Autossalvamento.
FONTE: Autor

6.1.2 Perigosidade estática

Os resultados indicam que as profundidades de inundação variam de 0 a 5,75 metros. Conforme era esperado as maiores profundidades ocorrem na zona imediatamente a jusante do barramento, dentro da ZAS, e ao longo do arroio Dilúvio, se enquadrando em uma zona de risco importante – laranja – uma vez que as profundidades podem variar entre 3 e 6 metros. Observa-se ainda que grande parte da área inundada se enquadra em uma zona de perigo média – amarela – visto que as profundidades variam entre 1 e 3 metros. As áreas com

perigo reduzido – verde - são aquelas nas bordas da mancha e mais a jusante, sobretudo nos bairros Menino Deus e Praia de Belas. Não foram observadas áreas com perigo muito importante – vermelho – cuja profundidade é maior que 6 metros.

A Figura 20 ilustra a perigosidade estática da onda de inundação na região a jusante. Nos anexos deste trabalho é possível obter um mapeamento mais detalhado, em escala 1:24.000.

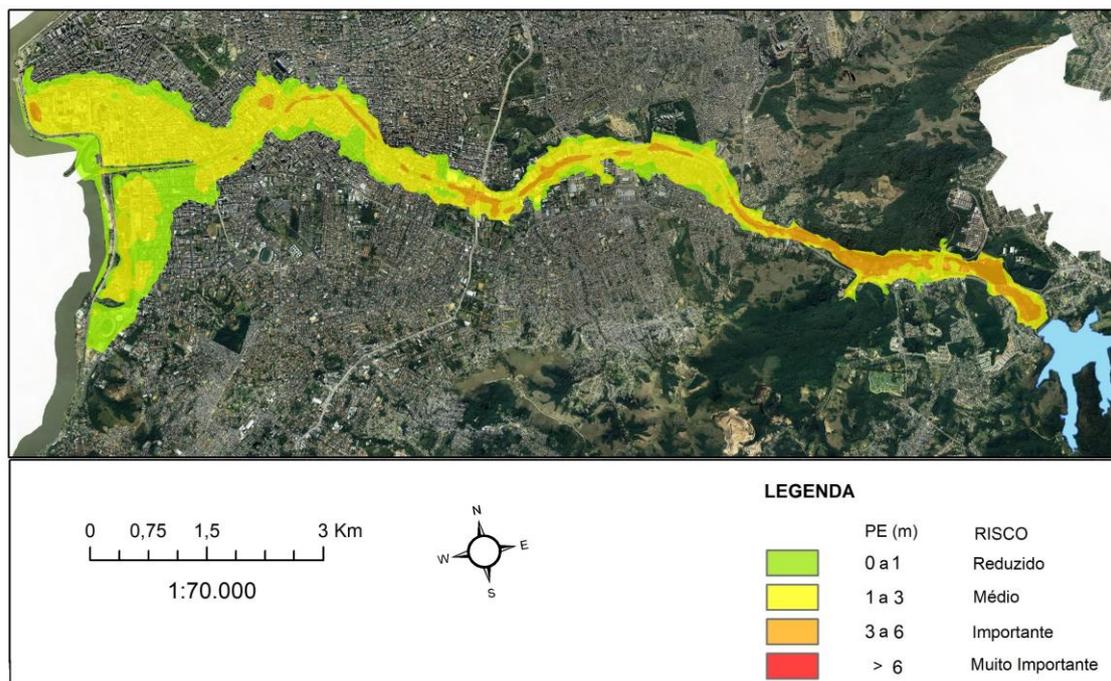


Figura 20 - Perigosidade Estática da onda de inundação.
FONTE: Autor

6.1.3 Perigosidade dinâmica

Os resultados indicam que a perigosidade dinâmica no vale a jusante se mostrou bastante acentuada, com valores variando de 0,05 a 48,3 m²/s. É importante ressaltar que os valores de velocidade utilizados para compor o índice de perigosidade dinâmica foram extrapolados e que não necessariamente representam o valor real para determinada região, no entanto serve de parâmetro para classificação dos índices de perigo podendo subsidiar as decisões das autoridades competentes.

Observa-se, a partir da Figura 21, que os maiores valores de perigosidade dinâmica (PD) para edificações ocorrem ao longo do arroio Dilúvio e nas regiões mais próximas do barramento, enquanto os menores ocorrem na região dos bairros Praia de Belas e Menino Deus, na prática o mapa da PD é

bastante similar ao mapa da perigosidade estática uma vez que estes índices são diretamente proporcionais.

Nas regiões em vermelho a perigosidade dinâmica seria catastrófica e destruiria grande parte das edificações e estruturas, enquanto nas regiões em verde os danos seriam reduzidos.

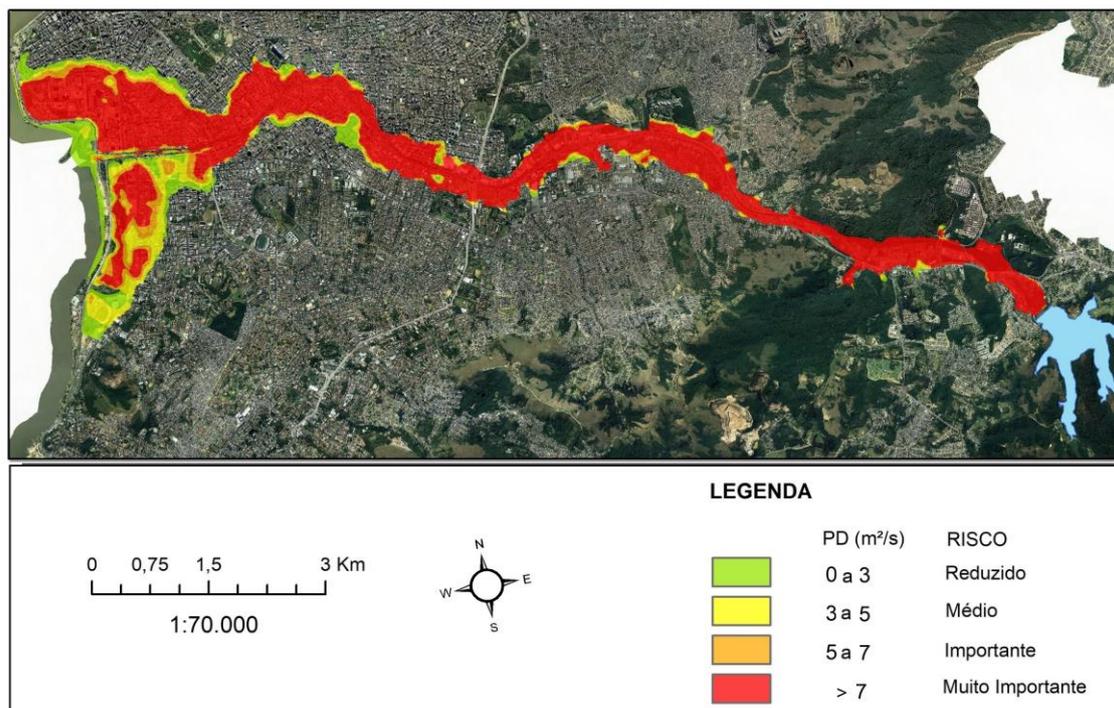


Figura 21 - Perigosidade Dinâmica para edificações.
FONTE: Autor

A PD também pode ser representada para pessoas, porém, devido aos valores elevados de velocidade no caso em estudo está será omitida, visto que o risco seria classificado como muito importante em toda mancha de inundação. Nos anexos deste trabalho é possível obter um mapeamento mais detalhado, em escala 1:24.000.

6.2 Caracterização do vale a jusante

A mancha de inundação provocada pelo rompimento da Barragem Lomba do Sabão está inserida, praticamente, em sua totalidade na sub-bacia do arroio Dilúvio, que por sua vez pertence a bacia do lago Guaíba. De acordo com Oliveira (2010), a sub-bacia do arroio Dilúvio possui área total de 77,9km² distribuídas entre os municípios de Viamão e Porto Alegre, dos quais cerca de 88,3% inseridos do território da capital. Segundo Morandi (2000), as nascentes

se localizam onde hoje é o Parque Saint Hilaire, na Lomba do Sabão. Neste local o Dilúvio, junto com os arroios Vitorino, Taquara, Pequeno, Casa Velha e Sem Nome formam a Represa Lomba do Sabão.

O vale principal da bacia do Dilúvio passou por um forte processo de urbanização no século XX e o crescente conflito da sociedade com as enchentes e a necessidade de se criar vias de fluxo rápido, forçaram a retificação do riacho dando origem a Av. Ipiranga. (DEVOS *et. al*, 2010). A Av. Ipiranga atualmente é uma das principais vias de acesso, comércio e moradia de Porto Alegre.

No final da década de 30 e início da década de 40 foram projetadas e iniciadas as obras de canalização do arroio Dilúvio, curso d'água principal da sub-bacia, ligando suas águas desde a Av. João Pessoa até o Guaíba. A obra de desvio e canalização do riacho e implantação da Av. Ipiranga prolongou-se por 20 anos, livrando uma série de bairros dos crônicos problemas das enchentes (MORANDI, 2000).

Segundo Mog (2014) a localização estratégica da sub-bacia do Dilúvio a torna a mais importante do município de Porto Alegre, estima-se que possui cerca de 446 mil habitantes, representando aproximadamente um terço da população total do município.

A Figura 22 representa o Modelo Digital de Terreno (MDT) da sub-bacia do arroio Dilúvio em uma escala de 1:80.000, a represa da Barragem Lomba do Sabão está representada na região a montante.

O relevo da sub-bacia do Dilúvio se caracteriza na metade sudeste por terrenos íngremes, com altitudes entre 290 e 306 metros, cobertos com matacões e matas. A área mais a oeste é caracterizada com terras baixas formadas por terraços e planícies fluviais com altitudes entre 1 e 10 metros, portanto fortemente susceptíveis a inundação. No trecho intermediário do vale principal, próximo ao bairro Agronomia, a planície fluvial possui cerca de 500 metros de largura, bastante encaixada no vale, onde são drenadas grande parte dos afluentes do curso d'água principal. Pode-se observar Figura 22 que a declividade no vale a jusante da barragem é pequena, segundo Tschiedel (2017) da ordem de 4 metros/km.

Atualmente, de acordo com Morandi (2000), a extensão canalizada e retificada do curso d'água principal está estimada em 12 km, dos quais 10 km, compreendidos entre a Av. Antônio de Carvalho e o Guaíba, tem calha central

localizada entre as duas pistas da Av. Ipiranga.

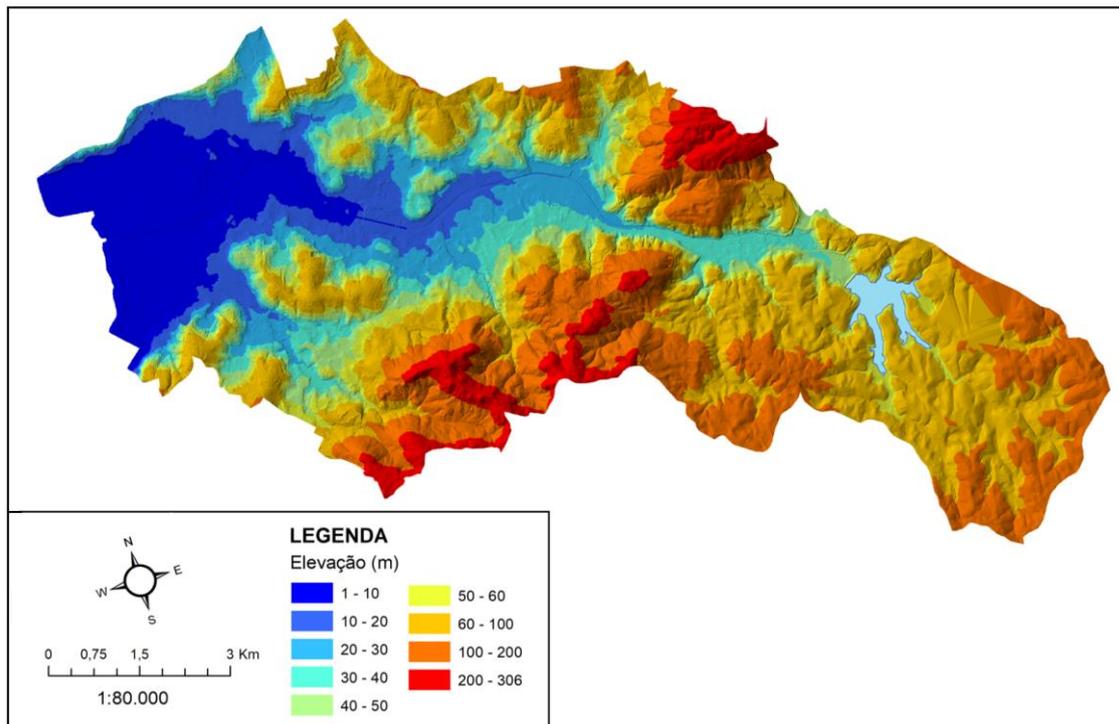


Figura 22 - MDT da bacia do Arroio Dilúvio.
FONTE: Autor

A seção retificada a montante da Av. Antônio de Carvalho, com 2 km de extensão, possui uma calha central em alvenaria de pedra de 8 metros de largura por 2 metros de altura e taludes laterais com grama. Neste local as ruas próximas não têm calçamento e as condições atuais são precárias, na Figura 23 pode-se observar o arroio no centro da foto, do lado direito o fim da Av. Ipiranga e do lado esquerdo os fundos dos lotes que tem frente para a Av. Bento Gonçalves.



Figura 23 - Arroio Dilúvio a montante da Av. Antônio de Carvalho.
FONTE: Google Street View (2019).

Ainda de acordo com Morandi (2000), entre a Av. Antônio de Carvalho e a Av. Cristiano Fischer o canal apresenta uma calha central com fundo natural e

paredes laterais com 15m de largura e 2m de altura em alvenaria de pedra. Possui taludes laterais em lajes de grês com 2,5m de altura e inclinação de 1:1 e talude superposto em grama, também com 2,5m de altura e inclinação de 1:1. (Figura 14).

Até a Av. Borges de Medeiros, a partir da Av. Cristiano Fischer, a seção possui as mesmas características, variando somente a calha central que se alarga em 5m e possui 2m de altura, construído em alvenaria de pedra. O trecho final, da Av. Borges de Medeiros até a foz, a seção do curso d'água não é definitiva, carecendo de obras para execução das paredes e taludes laterais.



Figura 24 - Seção típica do Arroio Dilúvio entre as Av. Antônio de Carvalho e Cristiano Fischer.
FONTE: Google Street View (2019).

Observa-se que mesmo com espaço livre para onda de inundação se deslocar dentro do canal, que chega a apresentar largura de 20 metros e profundidade de 5 metros, a onda extravasaria a calha, inundando grande porção do vale principal da sub-bacia do arroio Dilúvio, a principal da cidade de Porto Alegre.

6.2.1 Uso e ocupação do solo

A partir da sobreposição mapa de uso e ocupação do solo de Porto Alegre (HASENACK, 2008) e a mancha de inundação percebe-se que 61,65% da região atingida corresponde a áreas com edificações urbanas, das quais 27,81% são de edifícios com mais de quatro pavimentos e 23,73% edificações de grande superfície construída, como indústrias, armazéns, galpões e lojas. A Tabela 22 demonstra os principais tipos de usos e ocupação da região atingida pela onda de inundação, de acordo com o domínio e os tipos.

Tabela 22 - Uso e ocupação do solo da região atingida pela onda de inundação.
FONTE: Autor

DOMÍNIO	ÁREA (ha)	%	TIPO	ÁREA (ha)	%
Vegetação Arbórea	59,32	6,47%	Mata nativa	34,60	3,77%
			Mata degradada	14,7	0,16%
			Bosque - parques e praças	23,24	2,53%
Vegetação Arbustiva	8,87	0,97%	Arbustos	8,87	0,97%
Vegetação Herbácea	165,20	18,01%	Campo nativo	0,49	0,05%
			Campo manejado	164,71	17,96%
Edificações Rurais	0,27	0,03%	Casas rurais	0,27	0,03%
Edificações Urbanas	565,44	61,65%	Edifícios - 4 pavimentos ou mais	255,06	27,81%
			Edifícios e casas - 50% a 50%	30,27	3,30%
			Casas	47,00	5,13%
			Ocupação espontânea - favelas	15,44	1,68%
			Pavilhões - comerciais e industriais	217,66	23,73%
Área Não Edificadas	98,04	10,69%	Solo exposto	14,30	1,56%
			Vias de tráfego importantes	83,73	9,13%
Água	19,98	2,18%	Lâmina d'água	19,98	2,18%

A Figura 25 demonstra de forma visual os dados apresentado na Tabela 22, evidenciando que as áreas com edificação urbanas serão as mais atingidas pela onda, resultando em grande perda de bens materiais e vidas.

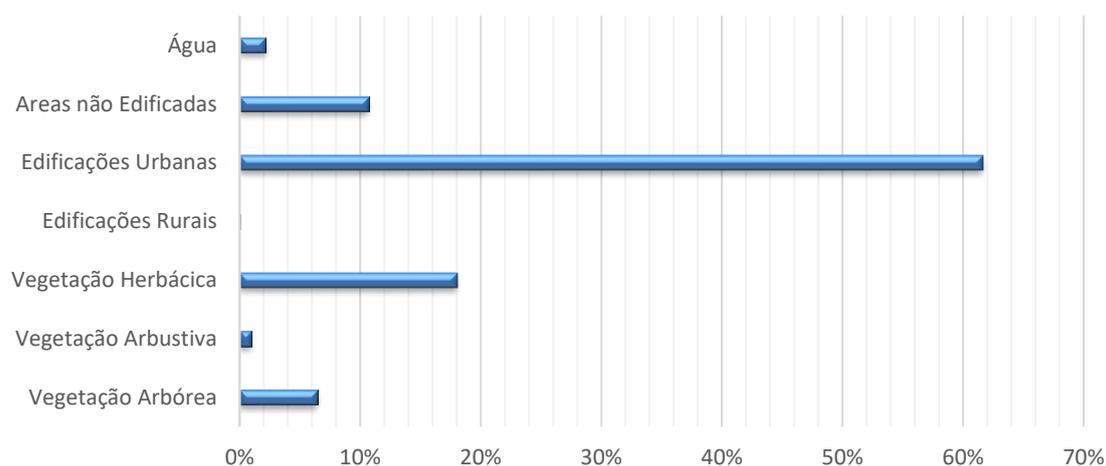


Figura 25 – Percentual de áreas atingidas pela onda de inundação.
FONTE: Autor

Das edificações urbanas atingidas, conforme se observa na Figura 26, cerca de 84% representam edifícios com mais de quatro pavimentos e pavilhões com grande área construída destinados a

comércio, serviços e instalações industriais.

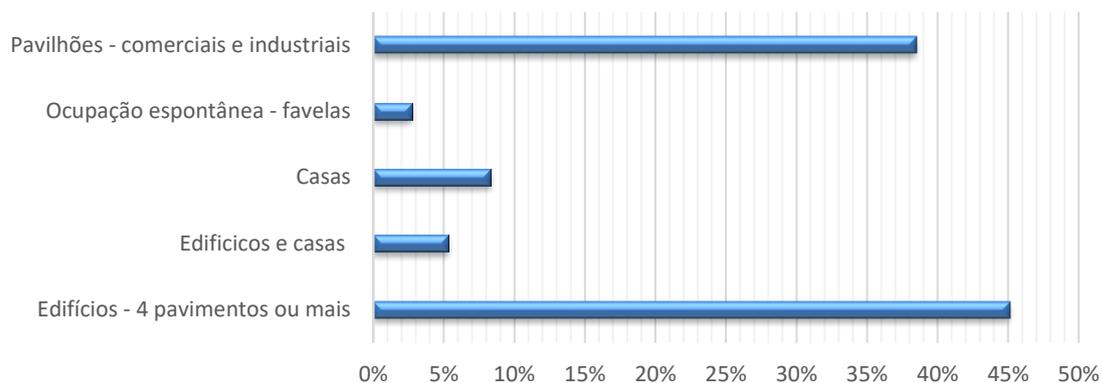


Figura 26 – Principais tipo de uso das edificações urbanas atingidas.
FONTE: Autor

A Figura 27 representa o mapa de uso e ocupação do solo do vale atingido pela onda de inundação. Percebe-se que as regiões de vegetação arbórea estão concentradas na região próxima à barragem, principalmente dentro do campus do Vale da UFRGS. A área comercial, industrial e de serviços se concentra ao longo da Av. Ipiranga (no centro da mancha), enquanto as regiões residenciais se concentram a partir a partir da Av. Terceira Perimetral, que corta o centro da mancha no sentido norte-sul. Na região mais a jusante, junto a foz do arroio Dilúvio, pode-se perceber a concentração de áreas verdes devido ao parque da Marinha, do parque Harmonia e da orla do lago Guaíba.

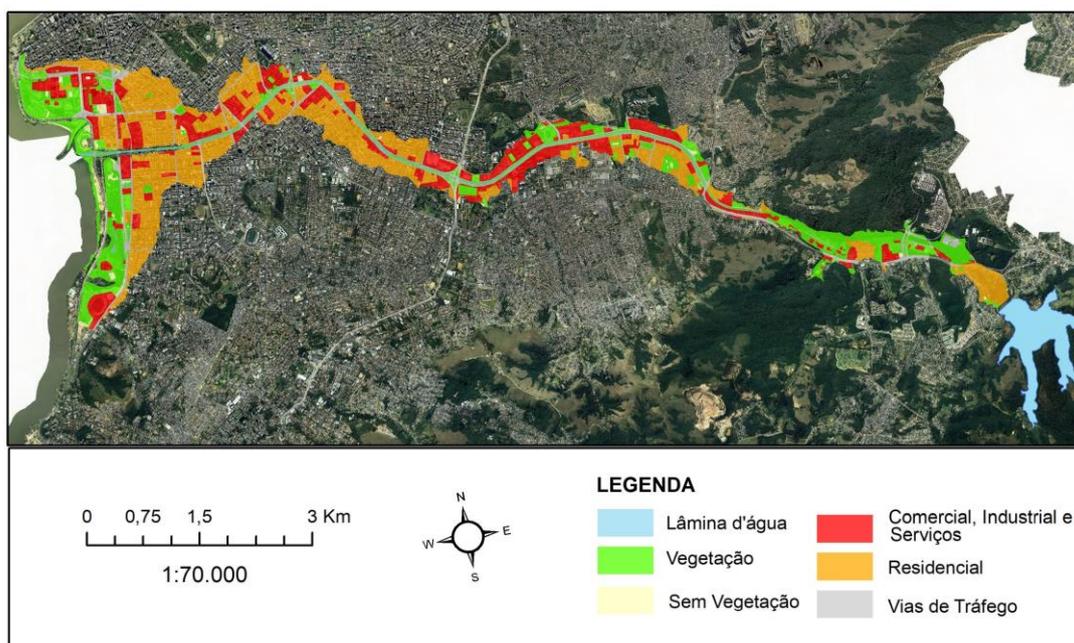


Figura 27 - Mapa de uso e ocupação do solo da região atingida.
FONTE: Autor

6.2.2 Demografia e domicílios

De acordo com IBGE (2020), em 2010 havia em Porto Alegre 1.409.351 habitantes e em 2019 foi estimado que a população era de 1.483.771, portanto 5,02% maior. A região de inundação possuía, segundo dados do censo de 2010, aproximadamente 65.490 habitantes, considerando a mesma taxa de crescimento observado no município, a população atingida é de aproximadamente 68.778 pessoas. A área de inundação é de cerca de 8,33 km², portanto com densidade populacional de 7.860,25 hab/km², mais de 2 vezes maior que a densidade populacional observada na cidade. A Figura 28 ilustra a distribuição por faixa etária da população diretamente atingida.

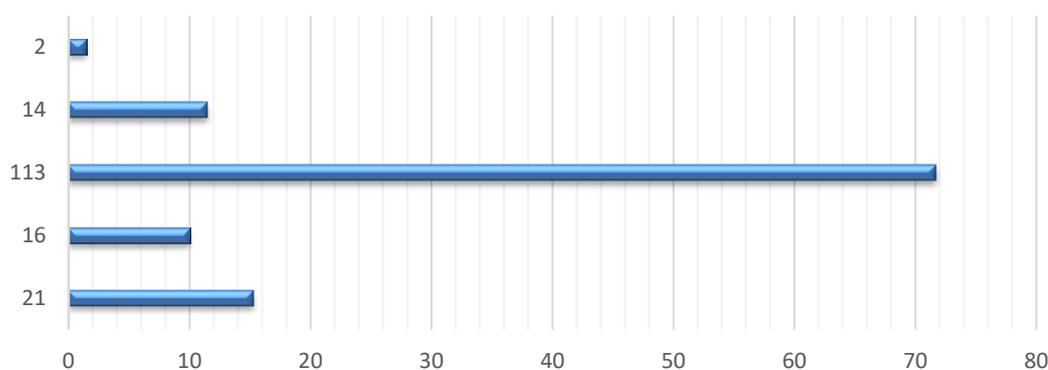


Figura 28 - Faixa etária dos habitantes atingidos.
FONTE: Autor com dados do IBGE (2010).

Observa-se que cerca de 66% dos atingidos são pessoas entre 19 e 60 anos e cerca de 19% são de idosos.

Geograficamente a população atingida está localizada, em sua maioria, fora da ZAS. Estima-se que 1.618 dos moradores atingidos estejam localizados dentro da Zona de Autossalvamento, o que representa 2,47% do total de atingidos. Esse fato se dá pois cerca de 64,90% da área da ZAS pertence a UFRGS, onde não há residentes permanentes.

Percebe-se a partir da análise da Figura 29 que a população está uniformemente distribuída a jusante da ZAS, se concentrando ao longo da Av. Ipiranga e conseqüentemente as margens do arroio Dilúvio. Na região próxima a foz do arroio Dilúvio a população também é reduzida em função da presença de grades parques, áreas de lazer e prédios governamentais, fato semelhante ao que ocorre dentro da ZAS. Este mapeamento foi realizado a partir do número de moradores de cada setor censitário potencialmente atingido.

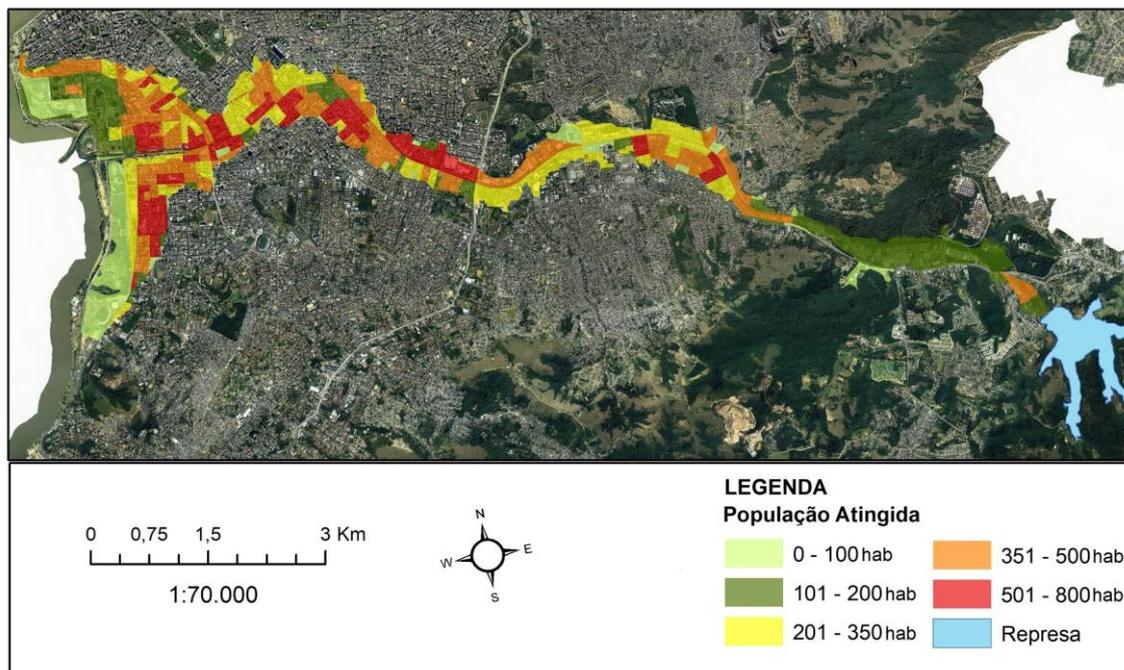


Figura 29 - Localização da população absoluta atingida por setor censitário.
Fonte: Autor

A onda de inundação atinge cerca de 29.802 domicílios, sendo 85% apartamentos e 15% casas. A maioria dos domicílios encontram-se fora da ZAS, e se concentram a partir da Av. Terceira Perimetral. As casas se concentram na região próxima à barragem, portanto em uma região de maior risco, enquanto os apartamentos estão localizados mais a jusante, em uma região densamente urbanizada e com risco reduzido em função da distância da barragem. A distribuição geográfica dos domicílios é muito semelhante a distribuição da população, a densidade de moradores por domicílio na região atingida é de aproximadamente 2,14, variando de 1,61 a 3,52 nas regiões mais densamente habitadas.

6.2.3 Infraestruturas

Além das infraestruturas levantadas conforme Tabela 23, a onda de inundação atinge adutoras de água tratada e tubulações de gás que transpõem o Arroio Dilúvio; uma linha de transmissão de 230 Kv que percorrem a extensão da Av. Ipiranga interligando a subestação Porto Alegre 6 e Gravataí 2 as subestações Porto Alegre 10 e 4; dois *shoppings centers*; vários órgãos públicos estaduais e municipais, dentre eles o Centro Integrado de Comando (CEIC), que reúne serviços públicos responsáveis pela rotina da cidade e o Departamento

Municipal de Limpeza Urbana (DMLU); o Palácio da Polícia Civil; e a Sede da Polícia Federal no RS.

Em síntese, das infraestruturas apresentada na Tabela 23, são atingidos 8 hospitais, sendo dois apenas parcialmente; seis passarelas de pedestres e 32 pontes, das quais sete são tombadas como patrimônio histórico pelo município e/ou pelo estado; 37 postos de combustível; duas subestações de energia elétrica da CEEE; uma base do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) e duas bases de Corpo de Bombeiros Militar (CBM/RS).

Tabela 23 - Infraestruturas atingidas pela inundação.
FONTE: Autor

INFRAESTRUTURA	COORDENADAS		DISTÂNCIA BARRAGEM (KM)	PD		PE	
	X	Y		m ³ /s	Nível	m	Nível
Ponte Av. Bento Gonçalves	488668,7776	6672477,418	0,80	27,39	Muito Importante	3,91	Importante
Ponte Colégio de Aplicação	488322,4257	6672821,336	1,29	21,40	Muito Importante	3,04	Importante
Ponte Acesso ao Campus do Vale	488026,8117	6672963,719	1,59	19,66	Muito Importante	2,81	Médio
Ponte Acesso ao Campus do Vale	487990,7595	6672982,877	1,63	12,82	Muito Importante	1,82	Médio
Posto Shell	487681,1924	6672650,49	1,69	1,98	Reduzido	0,28	Reduzido
Posto Petrobras	486905,6951	6672909,341	2,50	16,80	Muito Importante	1,92	Médio
Ponte Beco dos Marianos	486173,7464	6673650,985	3,49	34,04	Muito Importante	3,86	Importante
Posto Ipiranga	485940,1362	6673668,047	3,70	36,03	Muito Importante	4,09	Médio
Unidade de Saúde São Carlos	485538,0653	6673923,167	4,18	30,92	Muito Importante	3,16	Importante
Ponte Av. Antônio de Carvalho	485508,3887	6674084,914	4,29	33,63	Muito Importante	3,43	Importante
Posto Ipiranga	485449,4216	6674110,547	4,35	30,40	Muito Importante	3,12	Médio
Hospital Divina Providência ¹	485612,7975	6674405,31	4,38	-	-	-	-
Posto Petrobras	484982,4457	6674805,486	5,12	27,18	Muito Importante	2,78	Médio
Ponte Joaquim Porto Vilanova	484632,9637	6675005,55	5,52	43,27	Muito Importante	4,41	Importante
Ponte Rua José Albano Volkmer	484366,8156	6675023,815	6,02	28,92	Muito Importante	2,95	Médio
Ponte Rua Frei Germano	483899,0177	6675018,493	6,15	28,74	Muito Importante	2,93	Médio

Posto INCA	483719,2977	6674957,491	6,27	17,40	Muito Importante	1,77	Médio
Ponte Prof. Cristiano Fischer	483697,6249	6675020,053	6,32	34,39	Muito Importante	3,51	Importante
Ponte da PUCRS	483121,0544	6674854,373	6,75	34,27	Muito Importante	3,48	Importante
Passarela da PUCRS	483121,0544	6674854,373	6,75	34,27	Muito Importante	3,48	Importante
Hospital São Lucas - PUCRS	483146,3669	6675074,954	6,83	19,21	Muito Importante	1,96	Médio
Posto Shell	482747,5893	6674626,007	6,99	24,48	Muito Importante	2,50	Médio
Posto Petrobras	482567,3643	6674789,881	7,22	25,54	Muito Importante	2,61	Médio
Ponte Av. Dr. Salvador França	482281,9892	6674763,559	7,47	33,47	Muito Importante	3,84	Importante
Ponte Av. Dr. Salvador França	482250,8006	6674779,831	7,51	33,30	Muito Importante	3,82	Importante
Ponte Av. Dr. Salvador França	482216,8722	6674799,926	7,55	33,14	Muito Importante	3,81	Importante
Passarala próximo ao Bourbon Ipiranga	482005,8699	6674921,285	7,60	30,67	Muito Importante	3,52	Importante
Ponte Rua Guilherme Alves	481821,3577	6675022,575	8,00	21,37	Muito Importante	2,46	Médio
Posto Ipiranga	481832,1736	6675244,015	8,08	8,38	Muito Importante	0,98	Reduzido
Ponte Rua Barão do Amazonas	481738,3224	6675069,806	8,09	22,80	Muito Importante	2,60	Médio
Posto Ipiranga	481700,6389	6675147,737	8,16	20,82	Muito Importante	2,40	Médio
Posto RadOil	481527,0673	6675261,04	8,36	16,23	Muito Importante	1,88	Médio
Passarela próximo ao Shark Sushi	481443,0354	6675258,367	8,44	29,22	Muito Importante	3,35	Importante
Posto SIM	481433,5014	6675330,198	8,48	23,10	Muito Importante	2,66	Médio
Posto Ipiranga	481391,4645	6675236,632	8,48	22,34	Muito Importante	2,58	Médio
Posto Ipiranga	481353,1567	6675425,798	8,59	24,71	Muito Importante	2,84	Médio
Posto Ipiranga	481262,6419	6675575,639	8,74	12,18	Muito Importante	1,39	Médio
Ponte Rua Euclides da Cunha	481190,4329	6675612,29	8,82	23,68	Muito Importante	2,84	Médio
SAMU	481100,8661	6675657,838	8,92	18,12	Muito Importante	2,18	Reduzido
Ponte Cel. Lucas de Oliveira	481058,698	6675824,842	9,03	27,88	Muito Importante	3,36	Importante
Posto RadOil	480995,0523	6675852,269	9,10	10,35	Muito Importante	1,25	Médio

CEEE-GT Subestação Porto Alegre 10	481043,9129	6675984,641	9,11	17,70	Muito Importante	2,13	Médio
Ponte Rua Vicente da Fontoura	480932,6667	6676033,253	9,23	27,01	Muito Importante	3,24	Importante
Passarela próximo ao Zarrafi Ipiranga	480830,9646	6676200,045	9,40	31,29	Muito Importante	3,76	Importante
Posto Buffon	480722,0387	6676284,389	9,54	16,93	Muito Importante	2,05	Médio
Passarela próximo a Rua João Guimarães	480720,2536	6676371,031	9,58	25,30	Muito Importante	3,04	Importante
Posto Ipiranga	480494,2261	6676347,987	9,77	23,57	Muito Importante	2,84	Médio
Comando Geral CBM/RS ¹	480430,0058	6676537,235	9,91	-	-	-	-
Ponte Rua São Manoel (Rua Silva Só)	480337,9841	6676392,614	9,93	28,77	Muito Importante	3,46	Importante
Ponte Rua São Manoel (Rua Silva Só)	480275,9446	6676393,177	9,98	26,53	Muito Importante	3,18	Importante
Posto Ipiranga	480295,0919	6676581,993	10,05	9,81	Muito Importante	1,19	Médio
Ponte Mário Rigato ²	480045,872	6676309,336	10,15	26,80	Muito Importante	3,21	Importante
Ponte Rua Santana ²	479791,9969	6676137,497	10,31	19,30	Muito Importante	2,31	Médio
Hospital de Clínicas - UFRGS ¹	480084,7938	6676815,317	10,35	-	-	-	-
Posto Ipiranga	479690,8057	6676137,617	10,40	20,51	Muito Importante	2,48	Médio
Hospital Ernesto Dornelles	479541,9362	6675906,744	10,44	9,59	Muito Importante	1,16	Médio
Ponte Av. João Pessoa ²	479573,4751	6675987,657	10,45	16,22	Muito Importante	1,94	Médio
Posto Shell	479683,5736	6676356,992	10,50	19,34	Muito Importante	2,33	Médio
Ponte Av. da Azenha ²	479406,7128	6675920,08	10,57	19,75	Muito Importante	2,80	Médio
Posto Megapetro	479362,9483	6675976,099	10,63	13,79	Muito Importante	2,08	Médio
Posto Shell	479202,2339	6675831,456	10,73	14,83	Muito Importante	2,22	Médio
Passarela próximo ao Jornal Zero Hora	479026,6456	6675861,996	10,90	11,79	Muito Importante	1,76	Médio
Ponte Av. Érico Veríssimo	478980,3076	6675857,991	10,94	10,60	Muito Importante	1,58	Médio
Hospital Porto Alegre	479084,9548	6676173,882	10,97	10,60	Muito Importante	1,60	Médio
Ponte Av. Érico Veríssimo	478941,6029	6675856,264	10,98	11,22	Muito Importante	1,67	Médio
Posto Petrobras	478909,7336	6675799,313	10,99	6,79	Importante	1,02	Médio

Posto Barça	478600,2394	6675658,006	11,23	3,55	Médio	0,53	Reduzido
Ponte Av. Getúlio Vargas ²	478643,108	6675842,289	11,25	7,41	Muito Importante	1,09	Médio
Posto Petrobras	478605,0608	6675752,024	11,26	2,11	Reduzido	0,32	Reduzido
Posto Petrobras	478232,3415	6674839,522	11,33	2,76	Muito Importante	0,41	Reduzido
Posto Ipiranga ¹	478448,3643	6675809,881	11,42	-	-	-	-
Posto Ipiranga	478046,9047	6674528,652	11,44	2,96	Reduzido	0,44	Reduzido
Ponte Rua Mucio Teixeira	478411,9662	6675863,214	11,48	6,31	Muito Importante	0,94	Reduzido
Posto Ipiranga	478019,4451	6674608,997	11,48	5,84	Médio	0,88	Reduzido
Posto Ipiranga	478358,3643	6675818,881	11,51	4,81	Médio	0,72	Reduzido
Hospital Mãe de Deus	477921,9181	6674634,238	11,58	9,49	Muito Importante	1,43	Médio
Hospital do Câncer Mãe de Deus	477902,5947	6674759,331	11,63	4,73	Médio	0,73	Médio
Posto Petrobras	478570,1181	6676657,396	11,63	5,77		0,87	Reduzido
Posto Ipiranga	477981,2252	6675238,947	11,69	8,72	Muito Importante	1,34	Médio
Posto Ale	478013,7699	6675401,671	11,70	11,39	Muito Importante	1,75	Médio
Ponte Av. Praia de Belas ²	478061,559	6675894,797	11,82	6,68	Muito Importante	1,17	Médio
Defesa Civil de Porto Alegre	477531,1713	6673970,004	11,82	3,55	Médio	0,57	Reduzido
Posto Petrobras	478240,0383	6676418,547	11,84	14,68	Muito Importante	2,21	Médio
CEEE-GT Subestação Porto Alegre 4	477992,292	6675989,245	11,91	8,14	Muito Importante	1,63	Médio
Ponte Av. Borges de Medeiros ²	477892,8809	6675919,748	11,98	4,54	Médio	0,90	Reduzido
Posto Ipiranga	477322,9833	6673765,853	11,99	2,87	Reduzido	0,55	Reduzido
1º Batalhão CBM/RS	477992,292	6676374,959	12,05	12,92	Muito Importante	2,58	Médio
Posto Shell	477883,6541	6676224,283	12,06	12,55	Muito Importante	2,51	Médio
Posto Shell	477870,9978	6676088,68	12,06	12,37	Muito Importante	2,47	Médio
Ponte Av. Edvaldo Pereira Paiva	477657,4807	6675934,808	12,21	3,85	Médio	0,77	Reduzido
Ponte Av. Edvaldo Pereira Paiva	477564,4961	6675943,376	12,30	7,10	Muito Importante	1,42	Médio

¹ atingidos parcialmente.

² fazem parte do patrimônio histórico.

Avenidas importantes para a mobilidade da cidade também são atingidas, dentre elas as avenidas Bento Gonçalves, Ipiranga, João Pessoa, Borges de Medeiros, Praia de Belas e Loureiro da Silva. A inundação também prejudicaria a integração entre as zonas sul e norte da capital em função do bloqueio de todos os acessos. A Tabela 24 elenca as principais infraestruturas viárias atingidas.

Tabela 24 - Infraestruturas viárias atingidas.
FONTE: Autor

NOME		CEP
R	Antônio Klinger Filho	90.110-130
AV	Presidente Joao Goulart	90.010-120
AV	Borges de Medeiros	90.020-020
AV	Loureiro da Silva	90.010-420
PCA	Açorianos	90.010-340
VDT	Açorianos-Acesso Leste 2	90.110-340
AV	Augusto De Carvalho	90.010-390
AV	Joao Pessoa	90.040-000
AV	Ipiranga	90.160-092
AV	Erico Verissimo	90.160-180
AV	Praia De Belas	90.110-000
ESP	Hely Lopes Meirelles	90.110-350
R	Silva Só	90.610-270
PRQ	Mauricio Sirotsky Sobrinho	90.010-440
AV	Aureliano De Figueiredo Pinto	90.050-190
PCA	Garibaldi	90.050-020
R	São Manoel	90.620-110
AV	Getúlio Vargas	90.150-000
AV	Edvaldo Pereira Paiva	90.110-060
AV	Azenha	90.160-000
AV	Princesa Isabel	90.620-000
AC	Trevo Ipiranga Salvador	90.610-000
R	Dr. Salvador Franca	90.690-000
VDT	Dom Pedro I	90.110-190
R	Jose De Alencar	90.880-480
R	Prof. Cristiano Fischer	91.410-000
R	Barão do Amazonas	90.670-000
AC	Trevo Ipiranga Salvador	90.610-000
R	Harry Graeff	90.680-000
AV	Padre Cacique	90.810-240
AV	Antônio Carvalho	91.430-000
AV	Bento Goncalves	90.650-002
AV	Senador Salgado Filho-Viamão	94.475-000

O patrimônio histórico atingido, tombados pelo município e/ou estado, é composto por 25 edificações e seis pontes conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Patrimônio Histórico atingido.
FONTE: Autor

PATRIMÔNIO HISTÓRICO	COORDENADAS		DISTÂNCIA BARRAGEM (KM)	PD		PE	
	X	Y		m³/s	Nível	m	Nível
Nome não localizado	477023,1152	6677115,734	13234,4209	4,77	Médio	0,95	Reduzido
Ponte de Pedra - Praça do Açorianos	477871,2159	6676849,892	12350,9551	3,65	Médio	0,73	Reduzido
Fundação O Pão dos Pobres Santo Antônio	478060,7426	6676705,693	12119,384	9,35	Muito Importante	1,41	Médio
Museu de Porto Alegre - Joaquim Felizardo	478398,1161	6676570,735	11756,2109	10,9	Muito Importante	1,64	Médio
Travessa dos Venezianos - 19 casas	478547,2849	6676526,369	11601,8044	10,5	Muito Importante	1,57	Médio
Ponte Mário Rigatto (Rua Ramiro Barcelos)	480044,0528	6676311,633	10153,7794	26,8	Muito Importante	3,21	Importante
Ponte Rua Santana	479787,3013	6676140,159	10312,41	19,4	Muito Importante	2,32	Médio
Ponte Av. João Pessoa	479568,7692	6675991,775	10451,7505	17,2	Muito Importante	2,05	Médio
Ponte Av. da Azenha	479403,9042	6675928,89	10578,8647	20,3	Muito Importante	2,83	Médio
Ponte Av. Borges de Medeiros	477891,8121	6675911,5	11982,1076	4,54	Médio	0,9	Reduzido
Ponte Av. Getúlio Vargas	478642,4868	6675840,296	11253,3684	7,41	Muito Importante	1,09	Médio
Ponte Av. Praia de Belas	478058,0917	6675893,105	11819,5149	6,68	Importante	1,17	Médio
UFRGS - FAGRO	486435,9312	6673381,059	3129,52402	20	Muito Importante	2,28	Médio
UFRGS – HCV FAVET	487708,5246	6672730,947	1702,62809	3,43	Médio	0,49	Reduzido

Como as infraestruturas são dispersas a representação em mapa ficará restrita aos anexos, pois a escala não permitiria sua representação com definição apropriada ao corpo deste trabalho.

6.3 Valoração dos prejuízos

Os prejuízos causados pelo rompimento de uma barragem são muito vastos, indo de danos ambientais severos e a infraestruturas a perda de vidas humanas. Atribuir um valor a vida humana, embora corriqueiro em alguns setores, é extremamente complexo e sua singularidade e importância faz com que não seja viável qualquer quantificação.

Divididos em mensuráveis e imensurável, diretos e indiretos, os prejuízos decorrentes de uma inundação são muito importantes na tomada de

decisão a cerca de uma intervenção numa estrutura deteriorada e/ou no planejamento de ações a serem tomadas.

Neste trabalho, conforme discutido anteriormente, limitou-se aos cálculos dos prejuízos diretos gerados pela inundação estática às edificações residências, no entanto os prejuízos gerados pela onda de inundação às subestações, linhas de transmissão, adutoras de água, tubulação de gás natural, hospitais, pontes e em prédios governamentais são enormes, talvez imensuráveis, visto que os impactos podem afetar a vida de todos os habitantes da capital e até das cidades vizinhas.

O custo aproximado para reforma das edificações residenciais é de cerca de 40 milhões de reais, os bairros com os maiores custos são Partenon, Menino Deus e Santana. A Tabela 26 contém a distribuição dos custos pelos bairros.

Tabela 26 - Custos de reforma das edificações residenciais por bairro.
FONTE: Autor

BAIRRO	CUSTO (R\$)	%
Santa Teresa	195.206,17	0,48%
Petrópolis	488.032,63	1,20%
Santa Cecília	748.384,29	1,85%
Jardim Carvalho	934.749,91	2,30%
Centro Histórico	1.020.212,85	2,52%
Praia de Belas	1.607.563,94	3,96%
Agronomia	1.860.159,73	4,59%
Jardim Botânico	1.893.915,60	4,67%
Azenha	3.088.814,56	7,62%
Cidade Baixa	3.331.339,85	8,21%
Santana	6.456.182,04	15,92%
Partenon	8.602.675,31	21,21%
Menino Deus	10.330.658,37	25,47%
TOTAL	40.557.895,25	100,00%

A Figura 30 ilustra a distribuição espacial dos custos de reconstrução em função dos bairros atingidos.

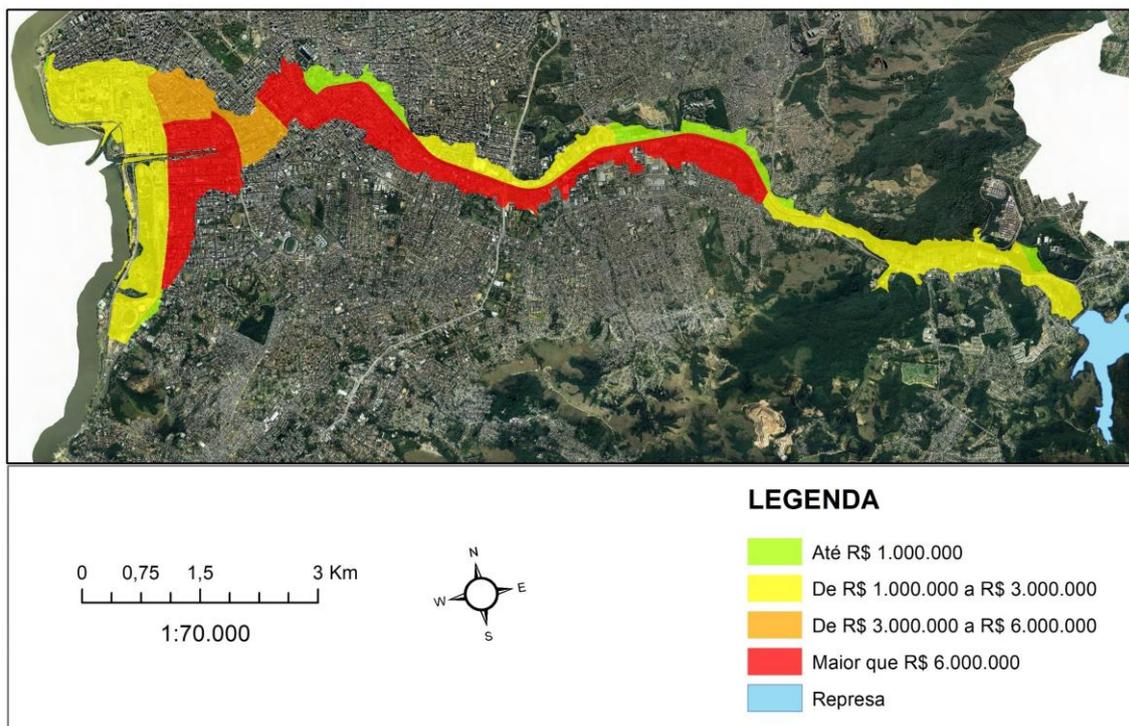


Figura 30 – Distribuição espacial do custo de reconstrução.
FONTE: Autor

7 CONCLUSÃO

Os objetivos e produtos deste trabalho visam auxiliar o empreendedor e o ente público na elaboração do PAE e do PlanCon, respectivamente, para a barragem Lomba do Sabão, além de auxiliar interessados na condução de estudos semelhantes.

No que compete a proposta de fluxo de trabalho para espacializar a onda de cheia para posterior elaboração do mapeamento de riscos, foi apresentada uma rotina de trabalho simplificada e que se apresentou efetiva para lidar com a obtenção, tratamento e transformação de dados em informações úteis para geração dos mapas de perigosidade estática e dinâmica, localização das populações e das infraestruturas atingidas. Os mapas gerados possuem bastantes informações e podem auxiliar os órgãos competentes na elaboração de medidas de prevenção, socorro às vítimas e mitigação de danos em caso de rompimento. O fluxo de trabalho proposto pode ajudar os interessados na condução de estudos semelhantes em sua região de interesse ou ao menos guiá-los para que obtenham os dados necessários para iniciar os estudos.

Em relação a definição dos limites da zona de autossalvamento procurou-se aplicar as recomendações dos órgãos de fiscalização e regulação competentes. No âmbito deste trabalho adotou-se um limite físico para que a região da ZAS fosse facilmente identificável, facilitando o trabalho dos órgãos competentes e a percepção dos próprios residentes desta região.

Como medida de previsão sugere-se que os moradores residentes na zona de autossalvamento sejam treinados para lidar com as possíveis emergências e aqueles que moram imediatamente a jusante da barragem sejam reassentados em locais apropriados. Sugere-se ainda que os frequentadores da zona de autossalvamento, na sua maioria funcionários e/ou alunos da UFRGS, sejam alertados com relação ao risco que estão expostos. Além disso, providenciem maneiras de as edificações serem menos afetados em caso de rompimento, uma vez que os impactos nas instalações da universidade podem ser catastróficos. Também é importante que infraestruturas vitais se preparem para a eventual inundação, provendo formas de se manterem em funcionamento mesmo que parte de suas instalações sejam atingidas, como no caso dos oito hospitais e duas importantes subestações localizadas na área de inundação.

No que tange ao arranjo metodológico para estimar os prejuízos decorrentes do rompimento de barragens, buscou-se na literatura uma metodologia passível de grande aplicação a partir de dados livres e amplamente divulgados por órgãos governamentais. No âmbito deste trabalho adaptou-se a metodologia de Tachini (2010), uma vez que 45% das edificações atingidas eram prédios de quatro pavimentos ou mais, enquanto a metodologia original se baseava em casa unifamiliares. O arranjo metodológico proposto neste trabalho pode ser replicado para qualquer área de inundação desde que o interessado tenha os dados do último censo do IBGE - amplamente utilizado e disponível para qualquer cidadão – e a profundidade a qual a região está submetida.

No âmbito deste trabalho o prejuízo calculado é de aproximadamente R\$ 40 milhões, levando-se em conta apenas os danos nas edificações residenciais. Se todas as infraestruturas potencialmente atingidas fossem consideradas o custo total de reconstrução seria significativamente superior, sem mencionar a perda de vidas. Este montante, embora calculado de forma aproximado - assim como todo levantamento de custos - pode ser crucial para que o empreendedor e/ou o ente público decidam sobre os investimentos em manutenção e prevenção ou pelo descomissionamento da barragem.

O produto final deste trabalho consiste em produzir, a partir da espacialização da onda de cheia, mapas com as zonas de riscos hidrodinâmicos – perigosidade estática e dinâmica – mapa com a delimitação da zona de autossalvamento; mapa de uso e ocupação do solo; mapa de localização da população e mapa de localização das infraestruturas. Todos estes mapas estão nos anexos deste trabalho.

Por fim é importante destacar que as barragens representam a solução e não o problema. É preciso lidar com os riscos impostos, utilizando as ferramentas disponíveis para mensurá-los e tomar as medidas necessárias para mitigá-los.

8 REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.721/2006: **Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios de edifícios**. Rio de Janeiro, 2006.

ABRHidro. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2016. **Relatório final das rodadas de oficinas revisando a segurança de barragens**. Brasília, 29 de novembro de 2016.

ALCÂNTARA, A.; A. R. R. OUTÃO; C. S. A. B. AFFONSO; E. M. QUEIROZ; L. B. MARTINS; L. C. PINHEIRO; L. A. M. COELHO; M. S. MACHADO; S. L. T. CARVALHO; S. MACHADO; H. M. GITIRANA; A. B. BARROS. **Terminologias básicas na área de defesa civil e segurança civil: construindo pontes para um entendimento intersetorial**. V Seminário Internacional de Defesa Civil – DEFENCIL – São Paulo, 2009. Anais eletrônicos – artigos. BRASIL

ALMEIDA, A. B. **Emergência e gestão do risco**. In: Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Capítulo 7. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 2001. 104p

ALMEIDA, A. B. **Riscos a jusante e legislação**. In: MARTINS, R.; VISEU, T. e RAMOS, F. (Coordenadores). Legislação sobre segurança de barragens. Projeto NATO. Lisboa: LNEC, 1999, pp. 107-124

ALVES, HR. **O rompimento de barragens no brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos?**. Dom Total, 18 dez. 2015.

ANA (2017). **Resolução nº 236/2017, de 30 de janeiro de 2017**. Seção 1 do D.O.U de 7 de fevereiro de 2017.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2015** / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2016a. 168 p. : il.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). **Guia de orientação e formulários do plano de ação de emergência - PAE**. -- Brasília: ANA, 2016b. 129 p. il.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2018** / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2019. 103 p. : il.

ANA, Agência Nacional do Águas (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2017** / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2018. 81 p. il.

ANEEL (2015). **Resolução Normativa Nº 696, de 15 de Dezembro de 2015**. D.O. de 22.12.2015, seção 1, p. 228, v. 152, n. 244 e o retificado no D.O. de 25.02.2016, 31.05.2017.

ART WALZ (París). Vice-presidente do Cigb (Ed.). **As barragens e a água no mundo**. Paris: Benoît Lamy - Vfc, 2007. 64 p.

BALBI, Diego Antônio Fonseca. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens** [manuscrito] : Estudo de caso: Barragem de Peti - MG / Diego Antônio Fonseca Balbi .— 2008. xv, 336 f

BELLADORA, Rossano. **Zoneamento do uso do solo em áreas localizadas no vale a jusante de barragens** / Rossano Belladonna. – 2018. 95f.

BITTENCOURT LFF, Batista GT, Catelani CS. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ocupação de solo de mata ciliar do rio Paraíba do Sul no município de Caçapava**. In: Anais do I Seminário de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento do Vale do Paraíba – GEOVAP; 2006; Taubaté, Brasil. UNITAU; 2006. p. 89-99.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem**. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras. Belo Horizonte. 201 p. (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

BRASIL. **Entendendo a política nacional de proteção e defesa civil no Brasil** / Ministério da Integração Nacional. - Brasília : Ministério da Integração Nacional, 2017. 72 p. : il. – (Série Manual de Proteção e Defesa Civil)

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens**. Brasília, 2010

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC**. Brasília, 2012

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Agência Câmara de Notícias. **Proposta estabelece maior controle sobre barragens**. In: **Proposta estabelece maior controle sobre barragens** . Brasília/DF, 13 maio 2019. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/557344-proposta-estabelece-maior-controle-sobre-barragens>. Acesso em: 11 jul. 2020.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de cheias**. São Paulo: Oficina de Textos. 2005.

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **Guia básico de segurança de barragens**. São Paulo: CBDB, 2001.

CESTARI, Euclides Junior. **Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragem** :

UHR Três Irmãos estudo de caso / Euclides Cestari Junior. – Ilha Solteira, 2014. 189f.

CIBG, Comissão Internacional de Grandes Barragens (París). **Dam failures statistical analysis**. Paris: Boletim 99, 1995

CLAUSEN, L. & CLARK, P.B. 1990. **The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures**. In: International Conference on River Flood Hydraulics, edited by W. R. White. 17. - 20. September, 1990. John Wiley & Sons Ltd. Hydraulics Research Limited, 1990. pp. 369-380.

CNRH (2012). **Resolução nº 143/2012**. Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012.

CNRH (2012). **Resolução nº 144/2012**. Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012.

CONFEA. Resolução Nº 1.002, de 26 de novembro de 2002. **Adota o Código de Ética Profissional da Engenharia, da Arquitetura, da Agronomia, da Geologia, da Geografia e da Meteorologia e dá outras providências**. Brasília, 2002

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CUNGE, J. A., HOLLY, F. M. e VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. Boston, Pitman Edition. 1980, 419 p.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Brasília: Eletrobrás, 2003.

FADEL, Amanda Wajnberg. **Incorporação do risco de prejuízo no gerenciamento de medidas de controle de inundação**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de PPRHSA, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

GIRÃO, Italo et al. Análise teórica dos conceitos: **Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade**. Revista Regne, Natal, v. 4, p. 71-83, 2018.

GRAHAM, W. J. **A procedure for estimating loss of life caused by dam failure (DSO-99- 06)**. Denver: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1999.

HASENACK, H.; Weber, E.; Marcuzzo, S. (org.). **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação e Ocupação**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008. 84 p.

HASENACK, H.; Weber, E.J.; Lucatelli, L.M.L. 2010. **Base altimétrica vetorial contínua do município de Porto Alegre-RS na escala 1:1.000 para uso em**

sistemas de informação geográfica. Porto Alegre, UFRGS-IB-Centro de Ecologia.

IBGE (Brasília). **Panorama de Cidades Brasileiras.** 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>. Acesso em: 21 abr. 2020.

JAKOB, Alberto Augusto Eichman. **A Krigagem como Método de Análise de Dados Demográficos.** In: XIII ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 2002, Ouro Preto. Anais [...] . Ouro Preto: 2002. p. 1-21

JANSEN, R.B. **Dam and public safety.** USA: water resources technical publication. Denver: U.S. Department of the Interior, 1980. 332p

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos** [manuscrito] : o caso UHE-São Simão / Josias Eduardo Rossi Ladeira .— 2007.

LAURIANO, André Wilhiam. **Estudo de ruptura da barragem de Funil** [manuscrito]: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS / André Wilhiam Lauriano.-- 2009. xiv, 193 f. , enc. : il.

LEITE, Pedro Sisnando. **A tragédia do Orós** : documento histórico / Pedro Sisnando Leite. – Fortaleza : Gráfica LCR, 2009. 264 p.

LICCO, Eduardo Antonio; SEO, Emilia Satoshi Miyamaru. **Perigos e riscos naturais: estudo de caso do Jardim Pantanal.** Revista Interfaces. Vol. 8, n. 1, 2013. ISSN 1980-0894.

LIMA, Joélma Costa de. **Avaliação dos riscos e danos de inundação e do impacto da adoção de medidas não-estruturais em Itajubá-MG,** 2003, 160 f. Dissertação (Dissertação em Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003

LOUZADA, Aline Furtado. **Segurança de barragens e governança de risco em hidrelétricas na Amazônia** /Aline Furtado Louzada. — 2018. 170 f. : il. Color

MACHADO, Léa Machado et al. **Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia.** Porto Alegre: Rega – Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 2, n 3, p. 32-52, jan/jun. 2005.

MAIZONAVE, C. R. M.; BENDATI, M. M.; WERNER, V. R.; CYBIS, L. F. A.; CARVALHO, E. N. **Avaliação planctônica do reservatório da lomba do sabão (Porto Alegre/RS) com ênfase na ocorrência de cianobactérias:**

implicações para o abastecimento público. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 2005

MEDEIROS, C. H. A. C.; PINTO, A. A. V. **A importância dos fatores não tecnológicos na avaliação da segurança de barragens: destaques para o erro humano e gestão de risco.** Revista Brasileira de Segurança de Barragens, v. 1, n. 1, p. 52-58, 2014.

MEIRELLES, Fernando Setembrino Cruz. **Barragens: Aspectos legais, técnicos e socioambientais: Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento.** In: Carlos Henrique de A. C. Medeiros (Ed.). Curso Segurança de Barragens. Brasília. 2014. p. 1-86.

MENEGAT, Rualdo; Porto, Maria Luisa; Carraro, Clovis Carlos; Fernandes, Luís Alberto Dávila. **Atlas ambiental de Porto Alegre.** Porto Alegre; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1999. 228 p. Ilus.

MENESCAL, Rogério de Abreu; VIEIRA, Vicente de Paulo e OLIVEIRA, Sandra Keila. 2005. **Terminologia para análises de riscos e segurança de barragens.** [A. do livro] Rogério de Abreu Menescal. A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil. Brasília : Ministério da Integração Nacional, 2005, p. 316.

MME/DNPM (2017). **Portaria nº 70.389, de 17 de Maio de 2017.** D.O.U Edição: 95 | Seção: 1 | Página: 68

MOG, William. **Análise morfológica de espaços urbanos em bacias hidrográficas: um olhar sobre o entorno do Arroio Dilúvio em Porto Alegre.** Caderno Metrópole, São Paulo, v. 16, n. 31, p.221-239, jun. 2014. Quadrimestral.

MORANDI, Iara Conceição.; FARIA, Carla Marque. **A difícil recuperação de arroios em áreas urbanas – Arroio Dilúvio, Porto Alegre, RS.** In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, RS, Anais... Rio de Janeiro; ABES, 2000.

MORRIS, M.W., GALLAND, J.C.. **Dambreak modelling – guidelines and best practice, Conclusions from the CADAM Concerted Action Project,** January 2000

NAGEM, Fernanda Raquel Maximiano. **Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas** [Rio de Janeiro] 2008 XI, 114 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2008) Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

NEVES, Luiz Paniago. **Segurança de barragens: legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada.** Brasília: 2018.

OLIVEIRA, Othon Fialho de et al. **A Utilização da Simulação Dinâmica como Ferramenta de Apoio à Gestão de Bacias Hidrográficas: O Caso do Arroio Dilúvio em Porto Alegre, RS.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 4, n. 15, p.17-29, 24 nov. 2010. Trimestral.

PENHA, Thales Vaz, FRANCISCO, Cristiane Nunes. **Manual de utilização de dados censitários em SIG.** Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2014.

RESCDAM, EU-Project. **The use of physical models in dam-break flood analysis.** Finlândia, 2000.

ROCHA, João Soromenho. **Prevenção de inundações e reabilitação de edifícios em zonas inundáveis.** 1995.

ROSA, Thiago Mendes. **Ensaio sobre consumo**, 125f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico). Universidade Federal do Paraná, 2015.

ROSSATO, Maíra Suertegaray; BASSO, Luis Alberto; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. **Formação de depósitos tecnogênicos em barragens. O caso da Lomba do Sabão, Rio Grande do Sul, Brasil.** Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, Barcelona, VII, n. 407, 30 out. 2002.

RUBÍ, A. M. **Clasificación de presas y evaluación del riesgo con programa HEC-RAS.** Tesina (Enginyeria Hidràulica, Marítima i Sanitària: Embassaments i Preses) – Departament d’Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2006.

SAMPAIO, Marcos Vinicius Nunes. **Segurança de barragens de terra: um relato da experiência do Piauí / Marcos Vinicius Nunes Sampaio.** – 2014. 76 p.

SEMA/RS. Resolução nº 136, de 29 de dezembro de 2017. **Estabelece o conteúdo mínimo e o detalhamento do plano de segurança de reservatórios de acumulação de água - açudes e barragens, e a sua revisão periódica, bem como da outras providências.** Porto Alegre/RS, 2017

SHAENE, Keroly, et al. 2019. **Geologia aplicada a barragens.** Pesquisa e Ação. Junho de 2009, Vol. V5, N2.

SILVEIRA, João Francisco A.; MACHADO, José Augusto de. **A importância de implementação de planos emergenciais para as barragens à montante de centros urbanos.** Comitê Brasileiro de Barragem, XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia, 11-15 April 2005

SINDUSCON/RS. **Preços e Custos da Construção.** Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.sinduscon-rs.com.br/produtos-e-servicos/pesquisas-e-indices/cub-rs/>. Acesso em: 14 jun. 2020.

SOUSA, Daniela Silva; GOERL, Roberto Fabris. **Proposta metodológica para estimar danos**. Florianópolis: COBRAC, 2018

SYNAVEN, K. **The pilot Project Kyrkojarvi dam and reservoir**, Seinajoki, Finland. In: *International seminar and workshop risk assessment, dam-break flood analysis and emergency action planning*. Seinajoki: Finnish Environment Institute, 2000.

TACHINI, M., KOBAYAMA; M. LOESCH; C. SEVERO; D. L. SILVA, H. S. e CORDERO, A. **Avaliação de danos de inundações ocorridas em Blumenau/SC nos anos 1983, 1984, 1992 E 2001**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, 2009.

TACHINI, Mario. **Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau** / Mario Tachini; orientador: Masato Kobiyama. – Florianópolis, 2010. xvii, 167 f.: il.

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens. 2017**. 138 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

USBR, ACER Technical Memorandum No. 11, **Downstream Hazard Classification Guidelines**, 1988.

VALENCIO, Norma. **Sociologia dos desastres – construção, interfaces e perspectivas no Brasil** / organizado por Norma Valencio, Mariana Siena, Victor Marchezini e Juliano Costa Gonçalves – São Carlos : RiMa Editora, 2009. 280 p. il.

VARGAS, M.; NUNES, A. J. C.; LOPES, J. C.; CONTINENTINO, L.; FEDERICO, D. **A Ruptura da Barragem da Pampulha**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1955, n.529. Relatório Técnico.

VAZ, Valéria Borges. **Avaliação de custos de risco de inundações urbanas: estudo de caso dos danos de inundação em Porto Alegre-RS**. 2015, 147f.

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** / Aline Pires Veról. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

VIANNA, N. S. **Belo Horizonte: seu abastecimento de água e sistema de esgotos (1890- 1973)**. Belo Horizonte, 1997, 115 p.

VIEIRA, Luan Marcos da Silva. **Análise dos mecanismos físicos de instabilidade de corpo humano para definição de zonas de risco constante no plano de ações emergenciais de barragens. Estudo de caso: barragem Santa Helena/BA** / Luan Marcos da Silva Vieira. – Salvador, 2018. 133f.

WISEU, T. **Segurança dos vales a jusante de barragens – metodologias de apoio à gestão dos riscos**. 2006. 482f. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006

WISEU, T.; ALMEIDA, A.B. **Plano de emergência interno de barragens**. In: congresso da água. Lisboa, 2000

WISEU, T.; FRANCO, A. B.; ALMEIDA, A. B.; SANTOS, A. **Modelos uni e bidimensionais na simulação de cheias induzidas por rotura de barragens – a experiência do vale do Arade**. IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 1999, Coimbra

ANEXOS

I - Delimitação da Zona de Autossalvamento;

II – Mapa de Uso e Ocupação do Solo;

III – Mapa de População;

IV – Mapa de Perigosidade Estática;

V – Mapa de Perigosidade Dinâmica;

VI – Mapa de Localização das Infraestruturas.