





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA ESCOLA POLITÉCNICA

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 DE SANTA HELENA – BA

Luan Marcos da Silva Vieira

Salvador 2018







UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA ESCOLA POLITÉCNICA

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 DE SANTA HELENA – BA

Luan Marcos da Silva Vieira

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Orientadora: Dr^a. Andrea Sousa Fontes

Coorientador: Dr°. André Luiz Andrade Simões

Salvador 2018 Luan Marcos da Silva Vieira

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 DE SANTA HELENA – BA

Dissertação submetida à Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Salvador, 26 de julho de 2018.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Andrea Souza Fontes
Profa. Dra. Yvonilde Dantas Pinto Medeiros Mude Universidade Federal da Bahia
Prof. Dr. André Luiz Andrade Simões <u>André Zeur J. Andre Si</u> mões Universidade Federal da Bahia
Prof. Dr. Jorge Luiz Rabelo <u>FUT</u> , <u>Rabi</u> o Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelas conquistas e oportunidades.

Agradeço a minha mãe Nelma, minha maior fonte de inspiração e admiração, parceira essencial no meu processo de formação como profissional e cidadão. Obrigado por estar sempre de meu lado, me apoiando, incentivando, sendo paciente e acreditando na minha capacidade.

A minha irmã Lara, por todo incentivo, apoio e compreensão. Ao meu cunhado Lucas e a minha madrinha Viviane, pela companhia de sempre.

Aos professores do Programa de Meio Ambiente, Águas e Saneamento, em especial a professora Yvonilde Medeiros, pelos conhecimentos adquiridos.

Ao professor Luiz Rafael Palmier, pelas orientações e contribuições realizadas para elaboração desse trabalho.

Aos colegas de mestrado e amigos que fiz no MAASA, principalmente ao George, Polyana, Adriana, Negrão e Felipe pela ajuda e companheirismo.

Agradeço com muito carinho a minha orientadora Andrea Sousa Fontes, que além de ter me apresentado os recursos hídricos, é um exemplo de profissional e pessoa, por quem tenho grande admiração. Sempre me incentivou, esteve disposta a ajudar e me depositou confiança, muito obrigado por tudo.

Ao professor André Simões, que para mim é uma referência como profissional, obrigado pela disponibilidade em todas as etapas dessa pesquisa, contribuições e incentivos ao estudo.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia pela concessão da bolsa de estudos para elaboração desse trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desse estudo.

L	ISTA DE FIGURAS	7
L	ISTA DE QUADROS	9
L	ISTA DE TABELAS	9
R	ESUMO	10
A	BSTRACT	11
L	ISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
1.	. INTRODUÇÃO	16
2	. OBJETIVOS	21
	2.1 OBJETIVO GERAL	21
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3	. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
	3.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS	22
	3.1.1 RUPTURA DE BARRAGENS	23
	3.1.2 CONSEQUÊNCIAS DAS RUPTURAS DE BARRAGENS	28
	3.2 LEGISLAÇÕES DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	30
	3.3 PLANO DE AÇÕES EMERGENCIAIS	34
	3.4 ZONEAMENTO DE RISCO	39
	3.5 MECANISMOS FÍSICOS DA INSTABILIDADE DO CORPO HUMANO	50
	3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ONDA DE CHEIA	69
4	. MATERIAIS E MÉTODOS	78
	4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	78
	4.2 MÉTODOS	82
	4.2.1 Simulação da onda de cheia no modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0	85
	4.2.2 Teste da influência do coeficiente de Manning	89
	4.2.3 Geração de mapas de inundações para diferentes zoneamentos de risco	92
	4.2.4 Avaliação dos resultados de zoneamentos de risco	93
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
	5.1 SIMULAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA DA BARRAGEM	95
	5.2 TESTE DE SENSIBILIDADE DO COEFICIENTE DE MANNING	99
	5.3 GERAÇÃO DE MAPAS DE INUNDAÇÕES ZONEADOS COM DIFERENTES CRITÉRIOS	103
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	120

SUMÁRIO

7	REFERÊNCIAS	12	3
---	-------------	----	---

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estatística de falhas referentes ao tipo de barragem	.24
Figura 2: Evolução do processo de brecha causada por erosão interna (a) e	
galgamento (b) numa barragem	.24
Figura 3: Causas de ruptura de barragens de terra	.25
Figura 4: Percentagens das causas de rompimento em barragens de terra	.25
Figura 5: Representação de uma frente de onda com altura (h) elevada	.29
Figura 6: Zoneamento em função das principais responsabilidades e medidas a	
serem tomadas em caso de ruptura de barragem	.45
Figura 7: Zoneamento de risco em função da altura de lâmina d'água	.46
Figura 8: Zoneamento de risco em função da velocidade	.46
Figura 9: Curvas de perigo pela relação entre profundidade e velocidade para	
adultos	.48
Figura 10: Curvas de perigo pela relação entre profundidade e velocidade para	
crianças	.48
Figura 11: Representação dos monólitos utilizados na experiência de Abt et al.	
(1989)	.49
Figura 12: Classificação de zonas de risco segundo o Manual da evolução das	
inundações da Austrália	.50
Figura 13: Teste de estabilidade de um corpo humano em pé e em movimento nur	na
onda de cheia	.52
Figura 14: Forças atuantes em uma parte do corpo humano	.53
Figura 15: Representações de instabilidades de um corpo por momento e por atrito	0
respectivamente	.53
Figura 16: Mecanismos de segurança utilizados no experimento em canal	.55
Figura 17: Comparação de profundidades-velocidades para as pesquisas de	
instabilidade e curvas de instabilidade de momento e atrito	.58
Figura 18: Limites de instabilidade considerando mecanismos físicos de instabilida	ade
de corpo para adultos	.59
Figura 19: Modelo reduzido de corpo humano usado em teste num canal	.61
Figura 20: Modelo de corpo humano em vista lateral (a) e frontal (b)	.63
Figura 21: Forças atuantes no corpo e seus pontos de aplicações	.64
Figura 22: Limites de instabilidade ao deslizamento (a), tombamento (b) e	
afogamento (c) para crianças e adultos	.65
Figura 23: Malha computacional em torno do corpo humano para todo o corpo do s	ser
humano (a), para a perna (b) e o para o pé (c)	.66
Figura 24: Efeito de um escoamento supercrítico num ser humano	.67
Figura 25: Esquema de sub-grade utilizado pelo modelo HEC-RAS	.75
Figura 26: Direção das derivadas das células utilizadas nas formulações numérica	S
de diferenças finitas	.75
Figura 27: Representação da direção não ortogonal das células utilizadas nas	
formulações numéricas de volumes finitos	.76
Figura 28: Localização da área e vista aérea da barragem de Santa Helena	.78
Figura 29: Vista da ombreira esquerda da barragem após sua ruptura	.79
Figura 30: Localização do trecho e seções de estudo	.80
Figura 31: Caracterização das larguras de base e superior da brecha	.81
Figura 32: Hidrograma de ruptura da barragem de Santa Helena	.82
Figura 33: Resumo do procedimento metodológico da pesquisa	.84

Figura 34: Perfis transversais da seção de Emboracica e Jacuípe
Figura 35: MDT (a) e MDT com delimitação da malha a ser modelada (b)86
Figura 36: Recorte da planície de inundação com destaque aos pontos de coleta das
variáveis hidráulicas para teste de sensibilidade91
Figura 37 (a): Resultados de velocidade de escoamento máximos da simulação da
onda de ruptura da barragem de Santa Helena95
Figura 38: Comportamento da altura de escoamento durante a propagação da onda
de cheia na seção de Jacuípe98
Figura 39: Comportamento da velocidade de escoamento durante a propagação da
onda de cheia na seção de Jacuípe98
Figura 40: Velocidades máximas de escoamento atingidas para os pontos
analisados
Figura 41: Alturas máximas de escoamento atingidas para os pontos analisados .100
Figura 42: Zoneamentos de risco para deslizamento segundo o teste 1101
Figura 43: Zoneamentos de risco para deslizamento segundo o teste 3102
Figura 44: Mapeamento de risco considerando proposta da USBR (1988) para
adultos104
Figura 45: Mapeamento de risco considerando proposta da USBR (1988) para
crianças105
Figura 46: Mapeamento simplificado de zonas de risco considerando proposta da
USBR (1988) para adultos106
Figura 47: Mapeamento de risco considerando critérios da legislação brasileira108
Figura 48: Mapeamento de risco considerando limites de instabilidade para adulto
segundo Jonkman e Penning-Rowsell (2008)110
Figura 49: Mapeamento de risco considerando limites de instabilidade para adulto
segundo Jonkman e Penning-Rowsell (2008)111
Figura 50: Relações de hxv ² para diferentes profundidades de água112
Figura 51: Zoneamento de risco para instabilidade por deslizamento para adultos
segundo Rotava et al. (2013)113
Figura 52: Relações de hxv para instabilidade por deslizamento e tombamento114
Figura 53: Zoneamento de risco para deslizamento e tombamento segundo Xia et al.
(2014)
Figura 54: Relações de hxv para que sofra instabilidade por deslizamento segundo
Milanesi <i>et al.</i> (2015)117
Figura 55: Relações de hxv para que o corpo tombe segundo Milanesi et al. (2015)
Figura 56: Zoneamento de risco para tombamento e deslizamento segundo Milanesi
<i>et al.</i> (2015)

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Descrição de alguns regulamentos relacionados à Segurança de	
Barragens no mundo	30
Quadro 2: Metodologias para classificação de mapeamentos de áreas de risco	36
Quadro 3: Classificação do perigo em seres humanos com base no produto crític	:0 38
Quadro 4: Limiares de risco para diferentes indicadores	39
Quadro 5: Diferentes zoneamentos de risco em âmbito internacional	44
Quadro 6: Dados experimentais da análise da instabilidade humana	55
Quadro 7: Parâmetros físicos assumidos para adultos europeus e crianças mund	liais
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	63
Quadro 8: Resumo de algumas modelagens uni e bidimensionais	77
Quadro 9: Informações técnicas da barragem de Santa Helena e sobre seu	
rompimento	81
Quadro 10: Valores de variáveis para definição do hidrograma de ruptura da	
barragem de Santa Helena	81
Quadro 11: Coeficientes de Manning utilizados no MDT	87
Quadro 12: Coeficientes de Manning utilizados para teste de sensibilidade	90
Quadro 13: Parâmetros de atributos físicos assumidos para um adulto	93
Quadro 14: Resultados de velocidades e cotas máximas nas três seções de anál	ises 97

LISTA DE TABELAS

RESUMO

Os impactos produzidos pelas ondas de cheias decorrentes de ruptura de barragens geralmente causam danos irreversíveis à população residente, e em casos mais críticos, acarretam em perdas de vidas. Um fator responsável por contribuir nos riscos aos habitantes durante as inundações é a perda de equilíbrio do corpo, geralmente causada pela atuação de diferentes forças, que podem acarretar no seu deslizamento ou tombamento, caso as condições de equilíbrio não sejam atendidas. Buscando assim, contribuir para melhor gestão do risco em inundações, decorrentes de rupturas de barragens, esse trabalho teve como objetivo analisar a consideração dos mecanismos físicos que causam instabilidade no corpo humano na definição de zonas de risco presentes nos mapeamentos constantes no Plano de Ações de Emergência de barragens, requisito essencial para prevenção de desastres e minimização de impactos. Para isso, foi feita a simulação da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem de Santa Helena na Bahia com auxílio do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, em versão bidimensional, por meio das equações de Saint-Venant. De posse dos resultados de velocidades de escoamento e alturas de escoamento, foram relacionados e comparados os diferentes critérios de zoneamentos de risco e mecanismos que causam a instabilidade do corpo. Percebeu-se que a consideração dos mecanismos de instabilidade do corpo humano pode contribuir efetivamente na gestão do risco, através do conhecimento dos gestores de risco e defesa civil, acerca das áreas que os diferentes indivíduos possam tombar ou deslizar, ainda que sejam classificadas como de baixo risco ou zona de julgamento. Foi confirmado que em regimes de escoamento supercríticos é mais provável que o indivíduo deslize e que nos subcríticos que o indivíduo tombe. Além disso, notou-se que a inclusão de alguns parâmetros nas formulações de instabilidade do corpo humano, como a força de empuxo e o ângulo referente à capacidade adaptativa do corpo humano em inundações, influenciam na definição das zonas de risco.

PALAVRAS CHAVE: Instabilidade de corpo. Ruptura de barragem. Zonas de risco.

ABSTRACT

The impacts caused by flood waves due to dam ruptures usually cause irreversible damage to the resident population, and in more critical cases, they lead to loss of life. One factor responsible for contributing to the risks to the inhabitants during the floods is the loss of balance of the body, usually caused by the action of different forces in the body, which can lead to their sliding or tipping if the equilibrium conditions are not met. Thus seeking to contribute to better risk management in floods due to dam ruptures. This study aimed to analyze the physical mechanisms that cause instability in the human body in the definition of risk zones present in the mappings contained in the Action Plan of Dam emergency, an essential requirement for disaster prevention and minimization of impacts. For this, the propagation of the flood wave due to the hypothetical rupture of the Santa Helena dam in Bahia was carried out using the hydrodynamic model HEC-RAS, in a two-dimensional version, using the complete equations of Saint-Venant. Given the results of flow velocities and flow heights, the different criteria of risk zoning and mechanisms that cause instability of the body were related and compared. It was noticed that the consideration of the mechanisms of instability of the human body can effectively contribute to the risk management, through the knowledge of risk managers and civil defense, about the areas that different individuals can tumble or slide, even though they are classified as low risk or judgment zone. It has been confirmed that in supercritical flow regimes it is more likely that the individual will slip and that in the subcritical ones the individual will fall. In addition, it was noted that the inclusion of some parameters in the instability formulations of the human body, such as the thrust force and the angle referring to the adaptive capacity of the human body in floods, influence the definition of risk zones.

KEY-WORDS: Body instability. Dam break. Hazard zone

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASDSO	Association of States Dam Safety Officials
A_s	Área molhada
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CDA	Canadian Dam Association
CFL	Courant - Friedrichs – Lewy
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONDER	Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia
C_D	Coeficiente de arrasto
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DSG	Dam Safety Guidelines
DSR	Dam Safety Regulations
DWAF	Departament Water Affairs and Forest
d	Diâmetro do cilindro para as Eq. (12) e (13)
D	Diâmetro do tronco para as Eq. (12) e (13)
D	Força de arrasto
d2	Distância do centro de articulação da pessoa
E	Força de empuxo para as Eq. (12) e (13)
EMBASA	Empresa Baiana de Águas e Saneamento
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FCL	Flood Control Law
F _{buoy}	Força de empuxo
F _{person}	Força peso
g	Aceleração da gravidade
h	altura de lâmina de água
h1	Altura de onda numa zona muito próxima no barramento
h2	Altura de onda a alguns quilômetros do barramento
h3	Altura de onda distante do barramento
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center River Analysis System
H_1	Elevação das superfícies de água
<i>H</i> ₂	Elevação das superfícies de água
H_p	Altura do prisma

IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
Renováveis	
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEMA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
j	Centro celular
L	Altura da pessoa
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
Ν	Diferença de valores de variáveis
ORSEP	Organismo Regulador de Seguridade de Presas
PAE	Plano de Ações e Emergências
PAEBM	Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração
PEE	Plano de Emergência Externo
PEI	Plano de Emergência Interno
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
R	Força resultante
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
USBR	United States Bureau of Reclamation
USSD	United States Society on Dams
UTM	UniversalTransversa de Mercator
v	velocidade de escoamento da água
W	Peso do corpo
Y	Altura do corpo para as Eq. (12) e (13)
ZAS	Zonas de autossalvamento
ZIP	Zona de Intervenção Principal
ZIS	Zona de Intervenção Secundária
ZSS	Zona de Segurança Secundária
K _D	Variável observada e calibrada referente ao corpo
<i>N</i> ₁	Variável hidráulica a ser aplicada na Eq. (17)
<i>N</i> ₂	Variável hidráulica a ser aplicada na Eq. (17)
S_f	Declividade da linha de energia
So	Declividade do fundo do canal

V _c	Volume do corpo submerso no fluido
X_G	Coordenada do centro de gravidade do corpo
X _{GS}	Coordenada do centro de gravidade do volume do corpo submerso
Y _G	Coordenada do centro de gravidade do corpo
Y _{Gs}	Coordenada do centro de gravidade do volume do corpo submerso
Ya	Altura do adulto
Y _c	Altura da criança
<i>a</i> ₁	Coeficiente relativo a estrutura do corpo
<i>a</i> ₂	Coeficiente relativo a estrutura do corpo
b_1	Coeficiente relativo a estrutura do corpo
<i>b</i> ₂	Coeficiente relativo a estrutura do corpo
d_1	Diâmetro do cilindro que representa as pernas
<i>k</i> ′ ₁	Faces da célula
k'2	Faces da célula
l_k	Comprimento da face da célula
$n_{k'}$	Vetor normal da face da célula
η_G	Coordenada referente ao ponto de aplicação da força peso no centro
de massa do corpo	
$\eta_{L,D}$	Coordenada de aplicação das forças D e L em relação ao calcanhar
$ heta_p$	Parâmetro de mobilidade dimensional
ξ _G	Coordenada referente ao ponto de aplicação da força peso
$\xi_{L,D}$	Coordenada de aplicação das forças D e L
$ ho_s$	Massa específica do fluido
Δt	Intervalo de tempo
Δx	Largura média da célula
Δn'	Distância entre os centros celulares
η	Plano de referência em relação ao declive do terreno
ξ	Plano de referência em relação ao declive do terreno
В	Largura média do corpo
Со	Número de Courant
а	Diâmetro do cilindro para as Eq. (2) e (3)
d	Braço do movimento de alavanca do corpo
l	Largura do prisma
ql	Vazão lateral
α	Inclinação do corpo em relação a um eixo horizontal
α	Parâmetro das Eq. (10) e (11)

- β Parâmetro das Eq. (10) e (11)
- μ Coeficiente de atrito
- ho Massa específica do corpo humano
- ϑ Declividade do solo em relação a um eixo horizontal
- Fr Número de Froude

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de falhas e rupturas de barragens geralmente desencadeia inúmeros danos à população presente no vale à jusante, especialmente pelas ondas de cheias e inundações decorrentes desses desastres. Tais fenômenos são caracterizados por desencadearem velocidades de escoamento e alturas de lâminas d'água elevadas, que comprometem a segurança humana e resultam no desequilíbrio do corpo humano, que em alguns casos apenas deslizam, outros tombam, podendo incapacitar o indivíduo e resultar em afogamentos.

O perigo relacionado a falhas e eventos extremos associados à ruptura de barragens podem provocar diversos danos e prejuízos tangíveis e intangíveis para o meio ambiente, sociedade e sistemas econômicos. Collischonn e Tucci (1997) destacam alguns danos que esses acidentes podem provocar: (i) prejuízos materiais diretos, dos quais fazem parte todas as perdas da própria barragem e das propriedades que ocupam as áreas de inundação, (ii) interrupção das atividades, (iii) operações de emergência relacionadas aos primeiros socorros e medidas de ajuda imediatas, (iv) impactos no meio ambiente e (v) perda de vidas humanas.

Entre os casos de danos causados por rompimento de barragem no Brasil está o da barragem de rejeitos nomeada de Fundão, no município de Mariana – MG, em 05 de novembro de 2015, considerado um dos maiores desastres ambientais da história do Brasil, causando consequências agudas em âmbito regional, com destruição de ecossistemas, danos na fauna, flora, prejuízos socioeconômicos, alterando o equilíbrio da Bacia do Rio Doce (IBAMA, 2015). Outro exemplo de desastre ocorreu em maio de 2009 no município de Cocal – PI, com o rompimento da barragem de Algodões I, deixando nove mortos, dezenas de feridos, perdas de animais domésticos e plantações (SOARES e VIANA, 2017).

No Brasil, a Lei N° 12.334, de 20 de setembro de 2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragem conceitua a segurança de barragem como "Condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente" (BRASIL, 2010). Mesmo assim, o risco remanescente sempre existirá, devendo-se estabelecer mecanismos e procedimentos de forma que estes riscos sejam detectados e medidas para mitigá-los sejam executadas.

Segundo ICOLD (1998), as barragens devem ter classificações determinadas por meio de previsões referentes às consequências de ruptura e, a partir disso, são executados planejamentos para mitigação dos riscos e impactos no vale a jusante. ICOLD (1998) ainda afirma que existem metodologias que orientam o estudo de rupturas, com elaboração de hidrogramas de ruptura, propagação de ondas de ruptura, mapeamento de áreas de inundação e criação de planos de ações emergenciais.

A avaliação da propagação de ondas de cheias é uma importante etapa do estudo de ruptura de barragens e zoneamento de áreas de risco, pois ela fornece resultados essenciais para essa análise, como alcance das inundações. Mas, prever o comportamento da propagação de ondas de cheias é complexo, pois esse é orientado por diversas variáveis referentes à brecha de ruptura, ao escoamento, ao canal, a planície de inundação, e aos processos associados (hidrodinâmicos, hidrológicos e geológicos) (SOUZA, 2013 e MATOS *et al.*, 2011).

As variáveis hidráulicas de velocidade de escoamento e altura de lâmina d'água, juntamente com alcances de inundação resultantes da propagação da onda de cheia são informações essenciais para o estabelecimento de planos de ações emergência (PAE) de barragens. O PAE é uma medida não estrutural de minimização de riscos, que consiste basicamente em cinco etapas detecção, tomada de decisões, notificação, alerta e evacuação devendo ser elaborado sempre que as barragens tiverem dano potencial associado alto (BALBI, 2008).

Faz parte do PAE o mapeamento de áreas susceptíveis a inundações, uma alternativa largamente utilizada e muito útil em estudos de risco (MONTE *et al.,* 2016). Esses mapas contribuem na avaliação de danos e no estabelecimento dos procedimentos de comunicação com as autoridades, para que estas possam planejar suas ações de salvamento e melhorar a gestão do risco e ocupação do solo, determinando rotas de evacuação e sistemas de alertas adequados (VISEU, 2006).

De acordo com Balbi (2008) a classificação dos mapas de inundações em zonas de risco devem levar em consideração alguns critérios, como as áreas potencialmente inundáveis, graus de perigo e a vulnerabilidade em que as pessoas e objetos são expostos.

Atualmente, as diversas definições existentes de zoneamento de risco à vida humana e bens econômicos, sujeitos a inundações, levam apenas em consideração os limites de zonas inundáveis baseadas em aspectos como velocidade máxima de propagação da onda, altura máxima de inundação e vazão máxima atingida (ANA, 2015), ou zoneamentos baseados em graus de resiliências e vulnerabilidades, através de variáveis socioeconômicas (infraestrutura, doenças, densidade demográfica etc.).

Um exemplo disso é a proposta de zoneamento apresentada pela USBR (1988), e que ainda hoje, é referência nos estudos da área. Tal proposta considera uma diversidade de curvas de perigo com base apenas em análises de duas variáveis (altura e velocidade de escoamento) para humanos (adultos, crianças), estruturas móveis (carros) e imóveis (residências com fundação, sem fundação etc.).

Mas, ao se tratar de ameaça à segurança humana, os critérios de análise citados acima podem ser insuficientes, pois a segurança do corpo humano depende também de outras diversas variáveis relacionadas ao escoamento do fluido e ao indivíduo no momento de risco (atributos físicos do corpo, idade etc.). Nesse contexto, a perda de estabilidade humana durante as ondas de cheias é um importante critério a ser considerado nos zoneamentos de risco, pois os diferentes tipos de corpos se comportam de maneiras distintas diante das variadas condições de escoamento e terreno, e, através da inclusão destes critérios, é possível o estabelecimento de zonas de riscos mais precisas (XIA *et al.*, 2014).

Um dos principais fatores que desencadeiam a instabilidade de um corpo numa inundação são os mecanismos físicos que atuam no corpo no instante da interação, que fazem com que um corpo tombe ou deslize, causados pela atuação de diversas forças, como arrasto, peso, empuxo e atrito.

Apesar de ocorrerem inúmeros prejuízos decorrentes da instabilidade de corpos em inundações decorrentes de ruptura de barragens, são raros os trabalhos que tratem dessa temática no Brasil, e não há ainda, trabalhos que discutam os diferentes mecanismos físicos de instabilidade de corpos por meio de zoneamentos de risco. Em âmbito mundial, também são poucos os trabalhos. A grande maioria considera aspectos essencialmente hidráulicos na definição das zonas de risco. Endoh e Takahashi (1964) foram os primeiros a descrever a instabilidade de corpo humano em inundações em pesquisas científicas. Até os dias de hoje, alguns autores desenvolvem equações matemáticas na tentativa de melhor representar estes fenômenos e aproximar os modelos à realidade, por meio da consideração de diversos critérios e variáveis hidráulicas de instabilidade de corpo humano em inundações.

As equações mais atuais presentes na literatura, contemplam aspectos como, rugosidade do solo, inclinação do corpo em relação à superfície, massa específica do corpo, massa específica do fluido, coeficientes de arrasto, parâmetros relacionados aos atributos físicos do corpo e até parâmetros de mobilidade, como proposto por Arrighi *et al.* (2017).

Para Milanesi *et al.* (2015), numa revisão de critérios de mapeamento de risco há uma forte heterogeneidade e fragmentação em relação às condições e mecanismos físicos considerados na análise de instabilidade do corpo humano. Na literatura há um déficit de dados sobre circunstâncias perigosas que possam acontecer e suas relações com as variáveis: altura de escoamento e velocidades máximas, pois dependem do terreno local, visibilidade, condições da pessoa, entre outros (LIND *et al.*, 2004).

Embora haja limitações e incertezas relacionadas aos estudos de mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano, assim como também existem incertezas associadas a todo estudo de ruptura de barragens, desde a definição do hidrograma de ruptura, caracterização da brecha, propagação da onda de cheia, definição de zonas de risco etc., esse trabalho buscou proporcionar uma visão geral desses processos, para melhor compreensão dos fenômenos relacionados, e principalmente, relativos à distribuição espacial da ocorrência de mecanismos físicos de instabilidade de corpo na planície de inundação.

Deste modo, este trabalho busca contribuir para o conhecimento científico por meio da análise de fatores que podem auxiliar nas definições de zoneamentos de risco, considerando os mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano (tombamento e deslizamento), decorrentes da ruptura hipotética da barragem de Santa Helena – BA. Tal consideração ainda não é feita nos critérios de zoneamento atualmente utilizados e não há registros de estudos que discutam esses mecanismos físicos de instabilidade de corpo humano como critérios de zoneamentos. O conhecimento dessas informações podem auxiliar as tomadas de decisões relativas às ações emergenciais da defesa civil, podem também orientar a definição de rotas de evacuações mais eficientes contra o perigo resultante de inundações, e podem contribuir no planejamento urbano das cidades, promovendo melhor organização dos espaços frente às inundações.

O presente tema se justifica para melhor compreensão dos danos e riscos associados aos impactos da ruptura da barragem no vale a jusante em relação a perdas humanas, de forma que possa vir a subsidiar na melhoria da gestão e redução do risco associado à ruptura de barragens.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a ocorrência de mecanismos físicos de instabilidade de corpo humano (tombamento e deslizamento), em decorrência do rompimento hipotético da barragem de Santa Helena - BA, como contribuição para definir zonas de risco exigidas em Planos de Ações Emergenciais de barragens.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular velocidades de escoamento e alturas de lâminas d'água máximas na planície de inundação considerando o rompimento hipotético da barragem de Santa Helena – BA;
- Analisar formulações matemáticas que descrevem os principais mecanismos físicos instabilidade do corpo humano (tombamento e deslizamento);
- Identificar a ocorrência dos mecanismos físicos de tombamento e deslizamento na planície de inundação decorrente do rompimento hipotético da barragem de Santa Helena-BA;
- Gerar manchas de inundações zoneadas para diferentes critérios de zoneamento de riscos, orientados pela legislação brasileira, USBR (1988) e pela consideração de mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano em inundações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Brown (1998) conceitua segurança como a habilidade de executar funções e/ou atividades sem a ocorrência de acidentes. Já a Defesa Civil:

Estado de confiança individual ou coletivo, baseado no conhecimento e no emprego de normas de proteção e na convicção de que os riscos de desastres foram reduzidos, em virtude da adoção de medidas minimizadoras.

(CASTRO, 1998, p. 128)

Se tratando de barragens, esse conceito tem grande importância principalmente pelas consequências que podem ocorrer caso a segurança não seja um critério prioritário.

A segurança de barragens tem sido um assunto tratado com frequência nos dias atuais, em decorrência das altas taxas de construção de barramentos, envelhecimento das existentes, necessidade de organização legal para lidar com a segurança e, principalmente, pelos desastres que já ocorreram oriundos de falhas e acidentes.

O estudo acerca dessa temática é complexo, pois exige conhecimentos multidisciplinares, dos quais fazem parte engenheiros, hidrólogos, geólogos e especialistas em sismos na tentativa de minimizar possíveis falhas (ZUFFO, 2005).

Pisaniello *et al.* (2015) apresentam alguns elementos da segurança de barragens: segurança estrutural (análises de elementos geológicos, hidráulicos etc.), monitoramento da segurança (avaliações periódicas e instrumentalização da barragem), segurança operacional (estudos hidrológicos, regras de operação, níveis do reservatório, treinamento dos profissionais) e, por fim, planejamento de emergência (estudos de evacuação, mapas de inundação, sistemas de alerta etc).

Para eles, os países em desenvolvimento ainda carecem de sistemas de seguranças em padrões aceitáveis, pois no decorrer do tempo estes receberam pouca atenção, e, além disso, houve falta de conscientização sobre os perigos e gestão de riscos (Pisaniello *et al.*, 2015).

Em contrapartida, Medeiros (2005) considera a engenharia brasileira uma das melhores mundialmente, por seus projetos, técnicas de construção etc., embora existam milhares de barragens que desafiam a lógica da segurança, como muitas encontradas no nordeste brasileiro.

A segurança de barragens deve ser um requisito imprescindível para todos os tipos de barragens, independentemente de sua função (geração de energia, contenção de rejeitos minerais ou industriais, ou de usos múltiplos) e em todas as fases da obra, seja no planejamento, projeto, construção, fases de operação e manutenção. A avaliação periódica torna-se essencial, pois mostra medidas que devem ser tomadas para melhorar ou manter a segurança dos barramentos e aumentar sua vida útil (WIELAND, 2016).

Dessa forma, uma importante etapa do estudo de segurança de barragens é a análise do processo de ruptura e seus efeitos, pois caso isso ocorra, a planície de inundação a jusante do barramento pode sofrer diversos danos em decorrência de enchentes e inundações.

3.1.1 RUPTURA DE BARRAGENS

Levando-se em consideração a instabilidade estrutural do barramento, a ruptura da barragem se caracteriza como a liberação incontrolável do material no interior do reservatório (CBDB, 1999). O rompimento de uma barragem (seja total ou parcial) é a situação mais crítica resultante de uma falha ou acidente e, portanto, deve ser evitado.

Os barramentos podem romper por causas naturais (eventos naturais como terremotos e abalos sísmicos) e/ou pela ação humana. Nesse contexto, um importante critério a ser considerado na investigação de ruptura de barragens é sua constituição, seja terra, enrocamento, concreto etc.

Os acidentes ocorridos em barragens dependem do seu tipo. ZHANG *et al.* (2009) fez uma revisão de literatura com diversos trabalhos da área como Vogel (1980) e USCOLD (1975) e fez uma compilação com mais de 1600 casos de falhas em barragens referentes ao seus tipos numa base de dados, e percebeu que a maior quantidade de acidentes/falhas que causam a ruptura do barramento ocorrem em barragens de terra (aproximadamente 66%), conforme a Figura 1.



Figura 1: Estatística de falhas referentes ao tipo de barragem Fonte: ZHANG *et al.* (2009)

Com base em análises históricas de rupturas de barragens, ICOLD (1998) publicou o BULLETIN 111 em que constatou que a maior causa de ruptura de barragens no mundo é devido ao galgamento, tanto em barragens de terra como de concreto. Medeiros (2005) também considera o galgamento, o *piping* e a ruptura de taludes algumas das principais causas de ruptura.

A erosão interna ou *piping* é definida pela percolação da água em seu interior com carregamento de materiais resultando no colapso da estrutura (Figura 2) e o galgamento ocorre devido à ineficácia da descarga do vertedouro, resultando num escoamento sem controle na crista da barragem (XIONG, 2011).



Figura 2: Evolução do processo de brecha causada por erosão interna (a) e galgamento (b) numa barragem Fonte: Gregoretti *et al.* (2010) e Jónatas (2013)

Onde h é a altura do talude da barragem.

Em barragens de concreto, as maiores probabilidades de ruptura ocorrem devido a problemas na fundação e erosão interna; já nas barragens de terra o cenário mais provável é por galgamento (ICOLD, 1998). As falhas geralmente ocorrem no primeiro enchimento do reservatório e durante sua operação.

Ainda segundo o BULLETIN 111, conclui-se que barragens mais novas (nos primeiros 10 anos de vida), mais baixas (menor que 10 metros) e barragens de concreto com problemas nas fundações e vertedouros incapazes de extravasar cheias extremas apresentam maior suscetibilidade ao rompimento.

As Figuras 3 e 4 ilustram o resumo da percentagem das causas de ruptura em barragens de terra em 1998 e 2009.









Com base nas figuras 3 e 4 se observa que, mesmo com o passar dos anos (11 anos de diferença entre as pesquisas de ICOLD, 1998 e ZHANG *et al.*, 2009) e aumento das tecnologias e estudos relacionados à segurança de barragens, as maiores causas dos rompimentos de barragens de terra ainda são o galgamento, a erosão interna e o deslizamento, e, além disso, os índices percentuais aumentaram com o tempo.

Exemplos de ruptura de barragens são citados nos trabalhos desenvolvidos por Cestari Jr. (2013), Balbi (2008) e no Relatório de avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão em Mariana (Governo do Estado de Minas Gerais, 2016):

• China (1975): As barragens de Shimantan e Banquia romperam e, em consequência, houve o rompimento de mais de 60 represas a jusante resultando na morte de mais de 230 mil pessoas.

 Itália (1985): A barragem de Stava (acumulava rejeitos de mineração) nas proximidades de Trento rompeu e matou mais de 286 pessoas, além de causar graves problemas ambientais.

• Estados Unidos (1980): A barragem de *Teton*, que pertencia ao *Bureau of Reclamation* dos Estados Unidos, rompeu durante seu primeiro enchimento devido ao aumento de percolações de água nas fundações e *piping*, matando onze pessoas e provocando inundação em cidades a jusante.

• Estados Unidos (1977): A barragem de *Kelly Barnes Lake*, com altura igual a oito metros, rompeu matando 39 pessoas.

 Alemanha (1943): Após bombardeios a barragem de Moehne rompeu havendo o esvaziamento do reservatório em poucas horas, causando 1.200 mortes e destruição da infraestrutura do vale a jusante.

 Brasil (1960): A barragem de Orós, localizada no estado do Ceará, foi galgada por uma cheia resultante de altas precipitações. A cidade de Jaguaribe, situada a 75 km a jusante da barragem foi, atingida depois de 12 horas do início da ruptura registrando um total de aproximadamente 1.000 mortes.

 Brasil (2007): Localizada no estado de Minas Gerais, a barragem de mineração, chamada de São Francisco rompeu afetando inúmeros municípios, dentre eles o de Miraí, onde estava a barragem, com cerca de 765 vítimas desalojadas.

 Brasil (2015): A barragem de Fundão, localizada na unidade industrial de Germano no município de Mariana (MG), se rompeu causando uma exurrada de lama e rejeitos de mineração que provocou a destruição do subdistrito de Bento Rodrigues, deixou 17 mortos e ainda causou diversos danos ambientais, socioeconômicos a toda bacia do rio Doce. Ainda para o BULLETIN 111 do ICOLD (1998), uma metodologia de estudo de ruptura de barragens consiste em quatro fases: elaboração do hidrograma de ruptura, propagação da onda de cheia, geração de mapas de inundação e elaboração de planos de contingência.

As condições de ruptura e formação da cheia influenciam diretamente nas vazões das diferentes zonas inundadas e nos intervalos de tempo disponíveis para implementação de planos de emergências. Esses processos envolvem a análise de formação da brecha e o cálculo do hidrograma efluente resultante (VISEU, 2006).

Segundo o manual do Empreendedor Volume IV da ANA (2015) a brecha é definida por três características, sendo elas: configuração geométrica, dimensões e o tempo de ruptura. Segundo a mesma publicação, as informações topográficas e hidrológicas são significativas para o conhecimento dos efeitos da ruptura da barragem, entre elas as áreas inundadas, cotas e velocidades máximas, tempo de chegada da onda e hidrograma de cheia (COLLISCHONN e TUCCI, 1997).

Um conjunto de fatores - tipo, forma e fundação da barragem; a topografia do local; materiais utilizados na construção; carga e volume armazenado no reservatório no momento de ruptura também interferem no tamanho e tempo de formação da brecha, explicando a complexidade e dificuldade de estabelecer previsões de seu comportamento na ruptura (CHAUHAN *et al.*, 2004).

Como definido na *Guidelines for Dam Breach Analyisis* (ICOLD, 2010), as formações da falha inicial e da brecha não são bem definidas e não existem metodologias específicas que descrevam esses comportamentos e, por isso, os conhecimentos empíricos contribuem para essa previsão.

As propagações das ondas nos canais variam conforme uma combinação de elementos da seção, dos quais se destacam a largura de fundo, área e perímetro molhado, altura d'água, rugosidade e velocidade de escoamento.

A rugosidade da superfície tem grande importância para cálculos hidrodinâmicos na propagação e eventos de extremos de cheias (MATOS *et al.*, 2011), e variam de acordo as características da área e os materiais que constituem a calha do rio, como vegetação, aflorações rochosas e bancos de areia. Os valores adotados para descrever a rugosidade nos canais naturais são complexos devido à diversidade de materiais que revestem suas margens e fundo (PORTO, 2006).

Dessa forma, a partir do conhecimento das fases do estudo da ruptura de barragens torna-se possível obter informações relativas à inundação, como alcance, tempo de ruptura, vazão de pico, valores hidráulicos de velocidades de escoamento e alturas de lâminas d'água, importantes para se estimar e avaliar os efeitos e consequências decorrentes do desastre,

3.1.2 CONSEQUÊNCIAS DAS RUPTURAS DE BARRAGENS

Os principais impactos decorrentes da ruptura de barragens se relacionam a ocorrência de enchentes. Freitas e Ximenes (2012), Kobyama (2006), Quiroga *et al.* (2016) citam algumas das possíveis consequências:

Consequências ambientais: Contaminação da água, solo e alimentos;
 Comprometimento dos serviços de saneamento ambiental; Alteração nos ciclos ecológicos etc.

 Consequências sobre a saúde e mortalidade: Aumento de doenças infecciosas e parasitárias; Doenças endócrinas, nutricionais e metabólicas; Doenças na pele etc.; Causas externas de mobilidade e mortalidade (afogamento, choques elétricos, quedas etc.)

 Consequências para infraestrutura, serviços, economia e sociedade local: Interrupção total ou parcial de pontes, ruas e estradas por inundação ou destruição; Interrupção total ou parcial do fornecimento de serviços de eletricidade, gás, abastecimento de água, coleta e comunicação; Comprometimento total ou parcial das atividades agrícolas e pecuárias; Prejuízos econômicos pela destruição total ou parcial de propriedades, casas e construções; Rompimento ou fortalecimento da amizade, cooperação e laços afetivos entre os membros de uma comunidade afetada etc.

Os efeitos das consequências da ruptura de barragem estão fortemente associados ao alcance das ondas de cheias. Viseu (2006) destaca que as ondas induzidas são frequentemente mais perigosas que as ondas naturais, porque para população a existência de uma barragem a montante pode gerar a falsa segurança e resultar no esquecimento das ações práticas de prevenção de cheias. Além disso, as cheias que geralmente apresentam valores de alturas de água e velocidades de escoamento alto (Figura 5), tendem a diminuir o tempo de aviso e evacuação da população.



Figura 5: Representação de uma frente de onda com altura (h) elevada Fonte: VISEU (2006)

Na Figura 5, h_1 é a altura de onda numa zona muito próxima no barramento, h_2 é a altura de onda a alguns quilômetros do barramento e h_3 é a altura de onda distante do barramento.

O vale a jusante sofre impactos das cheias induzidas de diferentes formas devido a uma gama de fatores associados ao escoamento e ao terreno. E se tratando das consequências, especificamente aos seres humanos no vale a jusante do barramento, essas dependerão do grau de ocupação da várzea, seja para habitação, recreação, uso agrícola, comercial ou industrial e da frequência de ocorrência desses eventos (CORDEIRO *et al.*, 2000).

A instabilidade do corpo é um critério que agrava ainda mais as consequências dos impactos das ondas de cheias no vale a jusante. Pois, nas diferentes áreas ocupadas, o indivíduo pode sofrer perdas de equilíbrio e ficar instável. Em locais ocupados por crianças, por exemplo, como em escolas, creches e parques, o risco de seus corpos sofrerem instabilidade na onda de cheia é ainda maior, quando comparados a adultos, por possuírem corpos com atributos corporais inferiores (massa, altura etc.).

Algumas legislações existentes no mundo regulamentam ações de segurança com fins de minimização dos impactos no vale a jusante, descrevendo por meio de leis, resoluções e planos de emergência estratégias para preservação da vida humana e redução da possibilidade de acidentes e efeitos.

3.2 LEGISLAÇÕES DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

Diversos são os documentos em âmbito mundial que buscam tratar e regulamentar informações acerca da segurança de barragens. A relação de algumas regulamentações internacionais e brasileiras é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Descrição de alguns regulamentos relacionados à Segurança de Barragens no mundo

País	Descrição de regulamentos
África do Sul	O Departament Water Affairs and Forest - DWAF (2008) publicou em 25 de julho de 1986 as Dam Safety Regulations (DSR), entrando em vigor em 1987 para barragens classificadas como de risco.
Alemanha	A norma técnica alemã DIN8 19700 de 1986 considera 5 tipos de barragens (reservatórios, controle de cheias, vertedouros, reservatórios de bombeamento e de resíduos minerais), independente da altura ou do volume acumulado.
Argentina	O governo argentino promulgou em 1999 o Decreto 239/99 que cria o Organismo Regulador de Seguridade de Presas - ORSEP, que tem a função de supervisionar questões de segurança de barragens desde o projeto, construção, manutenção e operação de projetos hidrelétricos.
Áustria	A Federal <i>Water Law</i> é a principal lei que trata de segurança de barragens no país.
Canadá	O gerenciamento de recursos hídricos cabe às províncias. Mas caso sejam insuficientes as legislações específicas sobre segurança de barragens as <i>Dam Safety Guidelines 13</i> - DSG elaboradas pela <i>Canadian Dam Association</i> - CDA atualizadas em 2007 são aceitas.
China	Na China são diversas as leis e regulamentações que tratam de segurança de barragens. Entre elas estão: <i>Flood Control Law</i> - FCL, elaborado em 29 de agosto de 1997 que impõe aos indivíduos e unidades responsabilidades pela prevenção de cheias e o regulamento sobre segurança de reservatórios e o regulamento de combate a enchentes editado pelo <i>"State Concil"</i> .
Espanha	A regulamentação sobre segurança de barragens se relaciona com inúmeras publicações, como a Ley das Águas (1979), a "Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas" (1962 e 1967), "Programas de Seguridad y Explotación de Presas del Estado" (1983 e 1992), "Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones" (1994) e "El Regulamento Técnico sobre Seguridad e Emblases" (1996).

Estados Unidos	As leis relacionadas à segurança de barragens são tanto federais como estaduais. Cada estado controla sua regulamentação de forma particular. A " <i>United States Society on Dams</i> " USSD, que representa o ICOLD nos Estados Unidos, e a <i>Association of States Dam Safety Officials</i> (ASDSO) apresenta inúmeros trabalhos sobre a segurança de barragens no país.
Portugal	Podem ser citados documentos como o Regulamento de Segurança de Barragens - RSB, Decreto-Lei nº 11/90, de 6 de janeiro de 1990, Portarias nº 846/93 e 847/93, de 10 de setembro que estabelecem Normas de Projeto de Barragens e Normas de Observação e Inspeção de Barragens. Ainda em 1993 foi promulgado um documento de pequenas barragens presente no decreto nº 409/93. Em 2007 o RSB foi atualizado e publicado no Diário da República em outubro pelo Decreto-Lei nº. 344/2007, que impõe a realização de estudos de ruptura, mapas de inundações e classificação das barragens em função dos danos potenciais associados.
Brasil	Em 1976 o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - CBDB (atual Comitê Brasileiro de Barragens) criou um Grupo de Segurança de Barragens que redigiu uma minuta que tratava de diretrizes para inspeção e avaliação da Segurança das Barragens em operação publicada em 1979. Ainda em 1979 o governo do estado de São Paulo emitiu um Decreto-Lei relativo à segurança de barragens para o estado e em 2001 foi desenvolvido o Guia Básico de Segurança de Barragens. Em 2010 entrou em vigor a Lei 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água de quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais.

Fonte: Adaptado de CESTARI JR. (2013) e Jónatas (2013)

Como visto no Quadro 1, no Brasil, a legislação sobre segurança de barragens no Brasil ainda é recente. Sampaio (2016) critica em seu trabalho o descaso legislativo decorrente da demora da Lei 12.334/2010 ser regulamentada no país, o que ocorreu apenas após dois anos de ser promulgada.

A lei N° 12.334, de 20 de setembro de 2010 instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e é hoje o principal regulamento sobre segurança de barragens no país. Seu objetivo é minimizar os acidentes, controlar e regulamentar medidas de segurança em barragens de múltiplos usos, que acumulem água, resíduos industriais e disposições de rejeitos.

A PNSB tem como alguns de seus fundamentos a segurança do barramento, proteção à população, bens e ambiente, visando à mitigação das consequências de

um acidente e, além disso, descreve medidas de responsabilidades do empreendedor e a garantia de informação a população.

Essa Lei estabelece ainda que as barragens com altura do maciço maior ou igual a 15 m ou capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ ou, ainda, que possuem categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, devem participar do Plano Nacional de Segurança e Barragens (PNSB).

São alguns dos instrumentos da PNSB: o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA), o relatório técnico de Segurança de barragens e o Plano de Segurança de Barragens.

O Plano de Segurança da Barragem é um instrumento obrigatório segundo a Lei 12334/2010, com fins de auxiliar na gestão da segurança da barragem. Conforme a Lei 12334/2010 estabelece, devem estar contidas, nesse plano, diversas informações, como dados técnicos do barramento, da construção, operação, manutenção, estados de segurança obtidos por inspeções, estrutura organizacional, técnica da equipe de profissionais da segurança da barragem e o Plano de Ações Emergenciais, quando exigido, contendo as diversas medidas de identificação, análise e prevenção de riscos associados, além de ações que minimizem as consequências de possíveis desastres.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas - ANA é responsável por organizar, implementar e gerir o SNISB; além disso, ela promove a articulação entre os órgãos fiscalizadores, fiscaliza as barragens outorgadas e elabora o relatório de Segurança de Barragens.

As principais entidades fiscalizadoras envolvidas nas seguranças de barragens no Brasil são (ANA, 2015):

 Agência Nacional de Águas (ANA) para as barragens destinadas a usos múltiplos, onde a hidroeletricidade não é o principal uso, quando estiverem situadas em rios federais, e os órgãos estaduais gestores de recursos hídricos, quando as barragens estiverem situadas em rios estaduais; • Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para as barragens em que a hidroeletricidade é o principal uso;

 Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) para as barragens de rejeitos utilizadas na indústria de mineração.

 As barragens de resíduos industriais são reguladas pelo órgão de licenciamento ambiental, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Ainda segundo a Lei, o Plano de Segurança de Barragens deve conter diversos dados, dentre eles os que se relacionam às características técnica das barragens, regras operacionais do reservatório, informações relativas a inspeções de seguranças, equipes de trabalho e o Plano de Ações Emergenciais, quando exigido.

Alguns outros documentos legais também tratam de segurança de barragens, entre eles:

 Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012 do CNRH, que 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 nº 143, de 10 de julho de 2012 do CNRH, que estabelece critérios gerais de classificação de barragem por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório;

 Resolução nº 91, de 02 de abril de 2012 da ANA, que estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem;

Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017 da ANA, que estabelece a periodicidade da 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 da Barragem e do Plano de Ação de Emergência;

 Portaria nº 4.672, de 28 de março de 2013 do INEMA, que estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem de Acumulação de Água e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem de Acumulação de Água;

 Portaria nº 4.673, de 28 de março de 2013 do INEMA, que estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança regulares de barragens de acumulação de água;

 Portaria nº 416, de 03 de setembro de 2013 do DNPM, que cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração;

 Portaria nº 526, de 09 de dezembro de 2013 do DNPM, que estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM); e

 Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 do DNPM, que 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 de Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ações de Emergências (PAE) para barragens de mineração.

3.3 PLANO DE AÇÕES EMERGENCIAIS

O Plano de Ações de Emergências - PAE deve ser elaborado quando exigido, no Plano de Segurança da barragem e estabelece ações tomadas pelo empreendedor em caso de emergência, além de também identificar os agentes a serem notificados sobre a ocorrência.

O PAE é um documento formal elaborado pelo empreendedor do barramento e deve ser adaptado à fase da obra de vida da obra, às circunstâncias de operação e às condições de segurança. A ANA (2015) recomenda que ele seja dividido em (ANA, 2015):

Informações gerais do PAE e da Barragem;

- Detecção, avaliação, classificação e ações esperadas para cada nível de resposta;
- Procedimentos de identificação e sistema de alerta;
- Responsabilidades gerais do PAE; e
- Estudo de inundação e mapa de inundação.

Também no PAE devem ser contempladas medidas de identificação das situações de emergência, com descrições de comportamentos da onda de cheia (seu alcance e tempos de chegada resultante da operação), execução de procedimentos preventivos e corretivos, e divulgação e estabelecimento de sistemas de alerta para população. Esse documento pode ser solicitado pelo órgão fiscalizador em função da categoria de risco e dano potencial associado ao barramento (BRASIL, 2005).

Para Viseu (2006) a divisão do Plano de Ações Emergenciais em duas partes se torna interessante por detalhar melhor as obrigações do empreendedor e do Sistema da Defesa Civil na prevenção e na tomada de medidas de alerta à população do vale a jusante, são: o Plano de Emergência Interno (PEI) e o Plano de Emergência Externo (PEE).

O PEI, de responsabilidade do empreendedor da obra, contém principalmente medidas de prevenção de risco no aproveitamento hidráulico e nas zonas de autossalvamento (ZAS), que são as zonas em que não se torna possível ajuda das autoridades competentes por conta de serem áreas atingidas mais rapidamente. Já o PEE é de responsabilidade da Defesa Civil, e contempla todo vale a jusante após o ZAS (VISEU, 2006).

Em seu estudo Balbi (2008) analisou a aplicação de PAE's em alguns países e constatou que em maior parte da Europa os países possuem PAE's bem estabelecidos e regulamentados, como Portugal e Suíça. Na Espanha ainda só são plicados para barragens de propriedades do Estado. O Reino Unido apresenta PAE's bem detalhados e companhias de água também elaboram mapas de inundação, observando consequências e extensões da ruptura.

Nos Estados Unidos também é considerado na elaboração de PAE's a ação de ataques terroristas e os planos contemplam a divulgação das informações e

treinamento das equipes (BALBI, 2008). A falta de um plano de emergência pode comprometer o planejamento da obra e causar seu embargo (Sampaio, 2016).

Segundo a Lei brasileira 12334/2010, no PAE devem ser identificadas e analisadas as situações de emergência possíveis; além disso, devem constar os procedimentos executivos e preventivos a serem adotados com representação do responsável para cada atividade, e as estratégias junto aos meios de comunicação e alerta para as comunidades acometidas pelo evento.

No que se concerne ao PAE, Sampaio (2016) afirma que a legislação brasileira está de acordo aos parâmetros internacionais, de maneira que exige estratégias, ações e procedimentos por meio de estudos de diferentes cenários, mas, ainda assim, é falha, porque não prescreve os adequados mecanismos para controle de tudo isso, possivelmente confiando na boa fé do empreendedor.

Uma importante etapa do PAE é a elaboração de mapas de inundações. De acordo com Horas e Gomes (2009) os mapeamentos de risco a inundações contribuem com a gestão, com o controle, com o planejamento e com a prevenção de inundações.

Os mapas de inundações são usados para o desenvolvimento de planos de alerta e evacuação e orientam o planejamento e construção de obras de infraestrutura e superestrutura a jusante da barragem (ICOLD, 1998). As metodologias dos mapas de áreas de risco podem ser de diferentes formas conforme apresentado no Quadro 2.

Empírica	Após a ocorrência do fenômeno, a área atingida é verificada em trabalho de campo e considerada área de perigo;
Semi- empírica	Além de caracterizar a área atingida como área de perigo, os fatores ambientais (topografia, solo etc.) também são analisados, sendo que os valores críticos de fatores que podem causar o mesmo fenômeno são determinados numericamente. Com base nesses valores, as áreas que possuem características semelhantes também serão consideradas áreas de perigo;
Física	Com base nas leis da física são analisados os mecanismos de ocorrência de determinado fenômeno. Depois da realização de simulações numéricas ou físicas, procura-se onde, teoricamente, o fenômeno poderá ocorrer. Desta forma, todas as áreas em que as simulações mostrarem a possibilidade de ocorrência do fenômeno serão consideradas áreas de perigo.

Quadro 2: Metodologias para classificação de mapeamentos de áreas de risco

Fonte: KOBYAMA et al. (2006)
No planejamento de emergência os mapas de inundação devem ser mais detalhados, com escalas e informações suficientes para que permitam orientar todos os envolvidos em processos de tomadas de decisões.

O Manual do Empreendedor volume IV desenvolvido pela ANA (2015) descreve algumas das principais características que devem constar no mapa de inundação:

- Identificação do cenário que lhes corresponde;
- Limites das zonas inundáveis;
- Limites administrativos das áreas atingidas (estado, município, localidade), vias de comunicação inundadas e identificação das obras de arte atingidas; e
- Infraestruturas e instalações importantes.

Os mapas de inundações são elaborados a partir de resultados numéricos da modelagem das ondas de cheias induzidas pela ruptura da barragem (LAURIANO, 2009) e bases de dados da bacia. A metodologia da modelagem escolhida deve ser descrita no PAE e justificada as razões de seu uso. O software utilizado para modelar também deve ser expresso (ANA, 2015).

A elaboração desses mapas requer dados detalhados, principalmente associados ao terreno a ser utilizado, e para isto podem ser necessários altos investimentos (equipamentos, deslocamentos etc.) relacionados à topografia e batimetria detalhada (SOUZA, 2017).

Dentre os resultados das modelagens de ruptura de barragens, aqueles considerados mais importantes são a velocidade e altura de escoamento, por oferecerem risco à vida da população quando alcançam valores capazes de provocar afogamentos e outras ocorrências danosas. Na literatura, são encontradas diferentes relações matemáticas entre essas duas variáveis, mas o simples produto da velocidade de escoamento da água pela altura de lâmina d'água (Equação 1) é a relação mais conhecida e utilizada mundialmente em estudos da área, nomeada de "perigo" ou "produto crítico", e corresponde ao perigo que a água oferece às pessoas e às edificações (BALBI, 2008).

Alguns autores discutiram aplicações de produtos críticos em suas pesquisas. ALMEIDA (1999), por exemplo, considera que o produto menor 1 m²/s é o fator de sobrevivência. Já Viseu e Martins (1998) consideram que o produto igual a 1 m²/s oferece um risco alto, enquanto o DEFRA (2006) é mais conservador, pois considera que valores superiores a 0,5 m²/s já podem ser considerados de alto risco. A estimativa das consequências para seres humanos podem ser representadas da seguinte forma (Tabela 1):

$$v x h \left[\frac{m^2}{s}\right]$$

Tabela 1: Estimativa das consequências do perigo para pessoas e edifícios		
Parâmetro- $v \ge h$ (m²/s)	Consequências	
< 0,5	Crianças e deficientes são arrastados	
0,5 - 1	Adultos são arrastados	
1 - 3	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas	
3 - 7	Danos estruturais em edifícios e possível colapso	
> 7	Colapso de certos edifícios	

Fonte: SYNAVEN et al. (2000) apud BALBI (2008)

Viseu (2006) também propõe uma classificação do perigo em seres humanos com base no produto crítico, conforme indicado no Quadro 3.

addie e. Classificação do polígo em seres namanos com sase no produce entre			
Nível	Classe	Inundação estática (H)	Produto crítico ($v \ge h$)
Reduzido	Verde	<i>h</i> <1 m	v x h <0,5 m²/s
Médio	Amarela	1 m< <i>h</i> <3 m	0.5< 𝒴 x h <0,75 m²/s
Importante	Laranja	3 m< <i>h</i> <6 m	0,75< 𝒴 x h <1 m²/s
Muito importante	Vermelha	<i>h</i> >6 m	$v \ge h > 1 \text{ m}^2/\text{s}$

Quadro 3: Classificação do perigo em seres humanos com base no produto crítico

Fonte: VISEU (2006)

Ribeiro Neto *et al.* (2016), também utilizaram resultados de produtos críticos de profundidade e velocidade da água em suas análises para definição de zonas de risco. Ao todo foram utilizados seis indicadores de risco em sua pesquisa, a profundidade da água (m), a velocidade do escoamento (m/s), o produto crítico (m²/s), a vazão (m³/s), a força do escoamento (kg.m/s²), e a energia do escoamento, por unidade de peso do fluido (m), para construção de uma metodologia de mapeamento de áreas propensas a inundações de mapas de inundações. A metodologia consistiu em determinar o índice topográfico da região, determinar a matriz de custo de distância, ambos com base no modelo digital de terreno do município de Ipojuca – PE, simular a propagação da onda de cheia por meio de um modelo hidrodinâmico e classificar zonas de risco (baixo, médio e alto risco) por meio de indicadores (Quadro 4).

(1)

Indicador	Baixo	Médio	Alto
Profundidade (m)	0-0,6	0,6-1,2	>1,2
Velocidade de escoamento (m/s)	0-0,6	0,6-1,2	>1,2
Energia de escoamento (m)	0-1,0	1,0-2,0	>2,0
Força de escoamento (m/s ²)	0-1,0	1,0-2,0	>2,0
Produto crítico (m ² /s)	0-0,36	0,36-1,5	>1,5
Fonte: Adaptado de Ribeiro Neto et al. (2016)			

Quadro 4: Limiares de risco para diferentes indicadores

Os limiares de risco definidos acima, foram estipulados pelos autores com base nas pesquisas de Wright (2008) e Kreibich *et al.* (2009).

Assim como realizado por Ribeiro Neto *et al.* (2016), a definição de zonas de risco no vale a jusante de barragens, podem contribuir para avaliação de danos, para o planejamento urbano da área ocupada e principalmente, para preservação da vida humana, sendo, portanto, um requisito importante dos mapeamentos de inundações.

3.4 ZONEAMENTO DE RISCO

Balbi (2008) define o zoneamento de risco como a divisão do território passível de ser atingido em áreas classificadas de acordo com o risco associado, a magnitude do dano, as vulnerabilidades e os tempos de alertas.

No capítulo 5º do PAE, após definida a modelagem das cheias de ruptura, segundo seus critérios e cenários (brecha de ruptura, cenário de ruptura mais provável, cenário extremo), devem ser feitas as análises do vale a jusante das barragens e identificadas as suas vulnerabilidades (ANA, 2015).

O zoneamento de risco está fortemente associado ao valor econômico das propriedades, estabelecendo severas condições para o planejamento de uso e controle do solo. Em países europeus, por exemplo, os zoneamentos de risco são ferramentas fundamentais para programas de seguro contra inundações, principalmente de imóveis que estão localizados em áreas de risco, para proteção dos proprietários. Nas zonas de médio e baixo risco esses zoneamentos são opcionais (MILANESI *et al.*, 2015).

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.

• Zonas de risco no Brasil

No Brasil, não há legislações disponíveis que descrevam detalhadamente critérios e metodologias a respeito das definições dos zoneamentos de risco para inundações resultantes de rupturas de barragens. As principais leis relacionadas a recursos hídricos e barragens são: a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e a Lei nº 12.334/2010 que estabelece a política nacional de segurança de barragens. Essas não mencionam o zoneamento de risco.

Como já citado, a Lei 12.334/2010 instrumentaliza o Plano de Segurança de Barragens, o qual que deve conter o Plano de Ações Emergenciais, quando exigido, e deste faz parte a identificação e análise das possíveis situações de emergência, assim como também os procedimentos preventivos e estratégias para as comunidades afetadas em situação de emergência, sem mencionar as definições de zoneamento de risco.

As resoluções nº 144, de 10 de julho de 2012 e nº 91, 02 de abril de 2012, e as portarias nº 416, de 03 de setembro de 2013, e nº 526, de 09 de dezembro de 2013, todas em conformidade com a Lei 12.334/2010, não citam o zoneamento de risco. Esta última, de forma breve, em seu Art. 19, ressalta que, em caso de ruptura, o Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração (PAEBM), em também conformidade com a Lei 12.334, deve incluir no Plano de Segurança de Barragem a identificação das áreas afetadas.

Elaborada em 2012, uma minuta da ANA traz documentado aspectos relacionados ao zoneamento de risco nos artigos 2º, 8º, 13º e 14º. O Art. 2º conceitua as zonas de autossalvamento como:

Região a jusante da barragem que se considera não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente, devendo-se adotar a menor das seguintes distâncias: 10 km ou a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

Em seus Art. 8º e 14º responsabiliza o empreendedor da barragem alertar a população potencialmente afetada na zona de autossalvamento e relata que o sistema de alerta pode compreender a indicação das áreas afetadas com indicação dos níveis e cotas altimétricas atingidas pela onda de cheia.

A resolução nº 236 da ANA, de 30 de janeiro de 2017, e a portaria nº 70.389 do DNPM, de 17 de maio de 2017 são os documentos mais recentes que abordam a definição dessas zonas. Ambos confirmam a necessidade de um zoneamento de risco mais detalhado constantes no PAE, de forma que contemple um estudo de inundação, com mapas, identificação das ZAS e os pontos vulneráveis passíveis de serem afetados.

Na resolução nº 236 estão escritas algumas responsabilidades do empreendedor da barragem; dentre elas estão o alerta à população potencialmente afetada pela ZAS e o estabelecimento junto à Defesa Civil de estratégias de comunicação e defesa da população. Na portaria 70.389 do DNPM é abordada uma zona nomeada como ZSS, assim é definida:

"Zona de Segurança Secundária - ZSS: Região constante do Mapa de Inundação não definida como ZAS".

Segundo a portaria, barragens de mineração com Danos Potenciais Associados altos, ou médios que seguem alguns critérios descritos no documento relativos a impactos à população a jusante e ao meio ambiente, devem conter mapas que explicitem as ZAS e ZSS.

Segundo a nota técnica nº 24/2012/GESER/SER da ANA, nos estudos de rompimento de barragem devem ser definidas áreas afetadas que servirão de auxílio para evacuação em caso de acidente. Ainda na nota é descrito que os dados a serem utilizados para o estudo - entre eles as características topográficas do terreno, parâmetros hidráulicos do escoamento - e o auxílio de ferramentas para simulação de ondas de cheias devem estar documentados.

Segundo o Manual do Empreendedor em seu volume IV – Guia de orientação e Formulários dos Planos de Ações e Emergências (ANA, 2015), desenvolvido pela ANA, no PAE devem constar a caracterização geral do vale a jusante da barragem com mapas de inundação e o correspondente zoneamento de risco, com descrição e localização das populações e infraestrutura de risco, de forma a permitir que a defesa civil possa realizar as ações necessárias.

Nos mapas de inundações deve haver informações como os tempos de chegada da frente de onda de inundação, o instante de chegada do pico da onda, a altura e cota máxima da cheia atingida, a duração da cheia, a velocidade máxima da onda de cheia, a vazão máxima atingida, vias de comunicação inundadas, limites de zonas inundáveis etc. (ANA, 2015). Segundo o manual, por meio do conhecimento das

zonas inundáveis e da altura e velocidade da onda em cada trecho, torna-se possível elaborar zoneamentos de risco em função de graus distintos de gravidade. Nas zonas de autossalvamento devem ser apresentadas as povoações afetadas, estimativa do número de pessoas atingidas, o levantamento das infraestruturas afetadas, as estruturas da defesa civil afetadas e a localização de refúgios (ANA, 2015).

Nesse contexto, percebe-se a ausência de uma metodologia específica brasileira regulamentada relacionada ao zoneamento de risco, constatação essa também observada por Menezes (2016).

Menezes (2016) em seu trabalho discutiu diferentes critérios de zoneamentos de risco para classificar danos, decorrentes da ruptura da barragem de Santa Helena – BA, localizada no município de Camaçari.

Para isso, Menezes (2016) aplicou duas metodologias diferentes, a de índices de Risco e a de Classificação do Risco. Seu processo metodológico também contemplou a simulação da propagação da onda de cheia no modelo matemático unidimensional HEC RAS 4.1.0 e o mapeamento de áreas inundadas.

Seus resultados indicaram que uma grande área povoada e de estuário podem ser atingidas no vale a jusante do barramento, e por isso, a classificação dos danos segundo a metodologia de Índice de Risco foi de "Muito importante", e segundo a metodologia de Classificação do risco os danos foram classificados como "Alto" (nível de gravidade máxima possível para metodologia).

Critérios internacionais para definição de Zonas de risco

A legislação portuguesa prevê o estabelecimento de medidas visando à proteção das pessoas e bens em casos de acidentes, que compreendem também a elaboração dos Planos de Ações Emergenciais, mapas de inundações e zonas de risco, algumas destas presentes no Decreto Lei 11/90, de 06 de janeiro de 1990, e no artigo 4º do decreto Lei nº 344/2007, de 15 de outubro de 2007 do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Segundo este último Decreto Lei, os mapas relativos a cada cenário de inundação devem indicar os tempos de chegada da onda, os níveis máximos atingidos (cota e altura), velocidade máxima e duração da fase crítica da inundação para os diferentes aglomerados populacionais ou bens

materiais ou ambientais. De forma similar ao Brasil, as zonas de autossalvamento em Portugal são definidas pela distância à barragem correspondente ao tempo de chegada da onda igual a trinta minutos, com o mínimo de 5 km.

No Art. 50º são abordadas algumas das informações necessárias para elaboração do plano de emergência interno, como os mapas de inundações (com caracterização hidrodinâmica das ondas de inundação e dos cenários de acidentes considerados, com a delimitação das zonas de autossalvamento e dos limites administrativos dos distritos), caracterização das populações, bens e ambiente em risco nas zonas afetadas com risco de inundação com cenário de acidente mais crítico.

A Portaria 846/93, de 10 de Setembro de 1993, expõe no seu artigo 58º que o projeto deve conter o estudo da zona inundável a jusante em caso da ruptura da barragem com indicação das zonas de segurança, seus acessos, sistemas de aviso e alerta e planos de evacuações.

Conforme Viseu (2006) o zoneamento de risco em nível internacional se baseia de forma geral na variável tempo de chegada da cheia induzida. Nas zonas de maior risco a proteção das pessoas ocorre por meio de avisos e a população que já deve conhecer os lugares de refúgio seguem para áreas mais seguras. Ainda para ela, a diferenciação dos níveis de risco é pouco precisa.

No Quadro 5, são apresentadas algumas definições de zoneamentos de risco em âmbito internacional.

País	Fonte	Descrição
França	PARQUIER (1993)	Se diferem de acordo ao tempo de chegada da onda induzida. Zona de um quarto de hora (Zona de autossalvamento): Correspondente à distância percorrida pela onda em um quarto de hora no intervalo de 5 a 10 km. Zona de alerta I: Sofre inundações significativas e deve existir um PAE. Zona II: Inundações pouco importantes.
Suíça	OFFICE FEDERAL DE L' ECONOMIE DES EAUX (1993) MILANESI <i>et al.</i> (2014)	Zona "próxima": Distância percorrida pela frente da onda em duas horas; devem existir avisos sonoros. Zona "afastada". Atualmente também são utilizados critérios hidráulicos relacionados ao produto crítico, associados à deposição e velocidades dos sedimentos em escoamento. As zonas definidas são: Zona de alto risco: hv>2 m²/s Zona de médio risco: 0,5 <hv<2 Zona de baixo risco:<0,5 m²/s</hv<2
Espanha (VOGEL, 1998)	ALMEIDA (1999)	Zona 1: Percurso da onda de inundação igual a 8,5 km. (Zona com maior risco na qual a população deve estar sujeita a um programa específico de prevenção/proteção e deve ser considerada a possibilidade de não ser autorizada a ocupação permanente. Zona 2: Percurso da onda de inundação no intervalo de 8,5 e 25 km. Zona 3: Para casos com percursos maiores que 25 km.
Portugal	SSBPC (ROCHA, 2002)	Zona de risco máximo é a distância percorrida pela onda de inundação em 30 minutos (definindo, ainda, um percurso mínimo de 5 km). Mas em cada caso é necessário maior análise.
Estados Unidos	USBR (1995)	As zonas próximas à barragem compreendem o trecho de alerta de barragens de até 4 horas.
Austrália	NSW (2005)	O Manual da evolução das inundações (2005) da Austrália também apresenta gráficos de zoneamentos de risco baseados no produto crítico, classificando o risco em o risco como alto e baixo. As zonas de alto risco são consideradas as que oferecem risco à segurança das pessoas, zonas com evacuação difíceis e zonas que oferecem perigo significante nas construções. As de baixo risco são as que os meios de transporte são utilizados facilmente pelas pessoas e em segurança.
Áustria	MILANESI <i>et al.</i> (2014)	Sao definidas relações de velocidade/profundidade (produto crítico) e valores de energias específicas do escoamento; a partir daí são estabelecidos níveis de perigo por ordem de cores num período de retorno de 150 anos.

Quadro 5: Diferentes zoneamentos de risco em âmbito internacional

Fonte: Adaptado de NSW (2005); VISEU (2006); BALBI (2009); MILANESI et al. (2014)

Como visto, são diversos os critérios para definição do zoneamento de risco, pois as diferentes zonas sofrem impactos distintos e as ações de emergência devem levar essas variações em consideração.

Para Viseu (2006) o zoneamento de risco deve ser definido em função das características da onda de cheia, seja altura máxima atingida pela água, velocidade do escoamento ou tempo de chegada da onda de cheia. Mas tais variáveis necessitavam ser avaliadas para maior gestão das ações a serem executadas e com isso foram relacionadas em função do número de vítimas mortais e danos econômicos (como exemplo, a sobrevivência das pessoas e resistência de edifícios). Um exemplo hipotético de zoneamento é apresentado na Figura 6.



Oceano Atlântico

Figura 6: Zoneamento em função das principais responsabilidades e medidas a serem tomadas em caso de ruptura de barragem Fonte: VISEU (2006)

Nas ZIP a Defesa Civil tem um importante papel nas operações de salvamento, assim como, os grupos comunitários. Em Portugal essa área corresponde a um tempo (t) 30 < t < 120 min ou a um produto crítico da velocidade (v) e profundidade (h) $v x h > 0,5 m^2/s$ nas margens do rio (VISEU, 2006).

As ZIS são consideradas áreas seguras por oferecerem baixo risco à população, a qual deverá estar ciente do risco que se aproxima, tomando as medidas necessárias associadas à emergência. São definidas por t> 120 min ou $v x h < 0.5 m^2/s$.

Outros exemplos de classificações de zonas de risco baseadas nas variáveis altura de água e velocidade são apresentados nas Figuras 7 e 8.



Figura 7: Zoneamento de risco em função da altura de lâmina d'água Fonte: VISEU (2006)

A altura de água é um dos primeiros indicadores de perigo. Um ser humano médio sem abrigo se sente em perigo quando a água atinge valores superiores a 1 m. Já considerando um edifício como abrigo, com média de 3 m de pé direito, este valor pode ser a fronteira de perigo. Em caso com edificações verticais maiores, com mais de um andar, que permitem a evacuação vertical, foi definida uma fronteira de 6m (VISEU, 2006).

A variável velocidade tem grande importância principalmente pelo fato do seu poder de arraste e destruição. A partir dela torna-se possível definir uma relação de destruição (D) em função da velocidade (VISEU, 2006).



Figura 8: Zoneamento de risco em função da velocidade Fonte: VISEU (2006)

Para USBR (1988), as vidas em perigo são aquelas presentes dentro das fronteiras de inundação e tais riscos associados se limitam aos impactos diretos a jusante da

ruptura da barragem sem considerar pessoas no reservatório ou acidentes como os de veículos em estradas ou depois que a onda de cheia passou.

A mesma publicação ainda relaciona a profundidade e a velocidade da água durante a inundação em três zonas:

 Zona de baixo risco: Se o indivíduo estiver sujeito à baixa velocidade e profundidade da água, sendo nulos os riscos à vida.

• Zona de alto risco: Áreas em que se assume a possibilidade de risco à vida.

 Zona de julgamento: Esta zona se localiza entre os extremos (zona de baixo risco e zona de alto risco) por ser uma zona de incerteza em relação à avaliação de vidas em perigo devido à impossibilidade de considerar todas as variáveis que interferem no risco à vida e na magnitude da inundação. Cabe assim ao analista com conhecimentos de engenharia julgar o perigo à vida e documentar suas razões num relatório de classificação de perigos.

Por exemplo, nas áreas em que há permanência temporária de vidas, com risco de inundação incerto, cabe um julgamento mais conservador a respeito. Diferente de uma zona com residências construídas adequadamente, de três andares, sujeitas a baixas profundidades e velocidades de água, supõe-se que os ocupantes não correm grande perigo, principalmente se a inundação for de curta duração. Em tais situações (imóveis com mais de um andar), são consideradas áreas mais seguras, pois parte do pressuposto que os ocupantes se deslocam para os andares mais elevados e não dormem, ficando atentos ao nível da água.

Caso as inundações não possam ser previstas, deve-se considerar que tais zonas oferecem riscos à população e oferecem perigo (USBR, 1988).

As Figuras 9 e 10 apresentam as zonas de risco propostas pela USBR (1998) que relacionam uma série de curvas de perigo (para adultos e crianças) com informações de velocidade e profundidade.



Figura 9: Curvas de perigo pela relação entre profundidade e velocidade para adultos Fonte: Adaptado de USBR (1988)



Figura 10: Curvas de perigo pela relação entre profundidade e velocidade para crianças Fonte: Adaptado de USBR (1988)

Tais zonas de risco, ainda que elaboradas em 1988 em meio à falta de dados experimentais ainda são referência atualmente em estudos de zoneamento.

A Figura 9 foi elaborada por uma análise teórica realizada por David J. Love and Associates num laboratório com auxílio de monólitos e seres humanos por Abt *et al.* (1989). Os resultados obtidos por Abt *et al.* (1989) consideraram experimentos com monólitos (corpo rígido simplificado composto por um bloco retangular com face larga e membros superiores - Figura 11) como sendo uma estrutura extremamente conservadora do corpo humano em relação à exposição de inundações e constatou que com produtos críticos inferiores a 0,3 m²/s, os escoamentos derrubavam os

monólitos; os seres humanos suportavam até 0,6 m²/s sem sofrer instabilidade. Foi considerada a distribuição de velocidades uniforme em todo corpo.

Os experimentos foram desenvolvidos no *Center of Colorado State*, Fort Collins, numa série de 71 testes, sendo 6 com monólitos (aproximadamente 54 kg e 1,5 m de altura, 0,3 m de largura e 0,15 m de espessura) e 65 com seres humanos em canais com declividades de 0,005 e 0,015 de 61 m de comprimento, 2,44 m de largura e 1,22 m de profundidade. O monólito foi construído em seu interior de isopor envolto com tecido de arame de reforço e um peso leve de agregado misturado com a pasta de cimento com verniz. Os pesos dos 21 seres humanos (duas mulheres e 19 homens) que participaram dos testes com idades entre 19 e 54 anos variavam entre 40,9 a 91,4 kg com alturas de 1,52 a 1,83 m (ABT *et al.*, 1989).

A medição de vazões foi realizada com placas de orifícios instaladas na tubulação de entrada, a velocidade foi medida com um sistema magnético e a altura de escoamento foi medida com transdutores de pressão montados no fundo do canal, em cada seção de teste.



Figura 11: Representação dos monólitos utilizados na experiência de Abt et al. (1989) Fonte ABT *et al.*, (1989)

Drie *et al.* (2013) compararam as curvas de perigo da USBR (1988) com as curvas da Figura 12 referentes ao Manual da evolução das inundações da Austrália (NSW, 2005) e concluíram que as da USBR (1988) descrevem aspectos mais reais. Segundo os autores, as linhas retas possuem valores de velocidade e profundidade que não se relacionam corretamente com o produto crítico definindo zonas de baixo e alto risco, supondo que as linhas apenas ligam dois pontos do gráfico e necessita-se assim de uma correlação mais precisa.



Figura 12: Classificação de zonas de risco segundo o Manual da evolução das inundações da Austrália Fonte: Adaptado de NSW (2005)

Como já descrito, percebe-se que o conhecimento de zonas perigosas e áreas essenciais, potenciais а serem inundadas tornam-se pois orientam 0 desenvolvimento de medidas e procedimentos que reduzam o risco à vida. Os riscos aos quais uma vida humana está sujeita numa inundação podem ser ocasionados por diferentes causas; além dos parâmetros descritos anteriormente (profundidade e velocidade do escoamento), também podem ocorrer por trauma físico, ataque cardíaco, possíveis afogamentos e perda de estabilidade do corpo humano (JONKMAN e PENNING ROWSELL, 2008).

3.5 MECANISMOS FÍSICOS DA INSTABILIDADE DO CORPO HUMANO

Segundo Arrighi *et al.* (2017) a perda de equilíbrio de um corpo humano em inundações é o resultado da interação entre a água e o sujeito. Tal perda ocorre porque o equilíbrio humano é afetado pela ação de diversos mecanismos durante uma inundação.

Alguns estudos foram feitos com intuito de aumentar a compreensão dos mecanismos que causam a perda da estabilidade do corpo humano em inundações e percebeu-se que os fatores que mais influenciam nesses mecanismos são os hidrodinâmicos (velocidade e profundidade da água), os atributos físicos (peso, altura), as condições psicológicas do ser humano e as condições topográficas do lugar.

Com o passar do tempo os estudos se tornaram menos simplificados, contemplando mais critérios na tentativa de se aproximar de situações mais realistas. No Brasil são poucos os trabalhos que tratam a análise desses mecanismos, podendo citar Rotava *et al.* (2013) e Simões *et al.* (2016), com análises que abordam essencialmente o comportamento de diferentes variáveis e parâmetros nas formulações de mecanismos físicos de instabilidade do corpo e produtos críticos.

Jonkman e Penning Rowsell (2008) afirmam que são poucos os dados acerca das circunstâncias perigosas que podem ocorrer em eventos de inundações com a população atingida, principalmente associadas às profundidades e velocidades das águas que oferecem risco à vida. Assim, a escolha dos critérios de vulnerabilidade adequados é fundamental (MILANESI *et al.*, 2015).

A escolha de critérios é complexa, pois há uma forte heterogeneidade e fragmentação nas metodologias utilizadas por cada estudo, não havendo uma que seja plenamente satisfatória, devendo-se, assim, ser selecionadas as mais adequadas para a finalidade do estudo e dados disponíveis a serem trabalhados (MILANESI *et al.*, 2015).

Simões *et al.* (2016) também constatam dificuldades similares às citadas anteriormente em seu estudo sobre análise dimensional para problemas de estabilidade humana em escoamentos em canais, com observância de grupos adimensionais, afirmando que o conjunto de variáveis envolvidas na instabilidade humana em escoamentos é grande e raros são os dados que estão disponíveis na literatura sobre as experiências executadas.

Xia *et al.* (2014) reitera a necessidade de se estudar a instabilidade de corpos humanos em inundações, pois a segurança das pessoas pode ser comprometida caso as inundações excedam a sua capacidade de se manter em pé ou em movimento (Figura 13) e, portanto, a estabilidade humana deve ser uma grande preocupação no manejo das áreas propensas a inundações. Sendo assim, é importante o estabelecimento de uma metodologia quantitativa capaz de avaliar a estabilidade do corpo humano para fornecer, por meio de base científica, a gestão de risco nessas áreas.



Figura 13: Teste de estabilidade de um corpo humano em pé e em movimento numa onda de cheia Fonte: BBC (1999) *apud* JONKMAN e PENNING ROWSELL (2008)

Alguns critérios citados por Peng e Zhang (2012) podem ser incluídos nos estudos de instabilidade humana através de mecanismos físicos, como os critérios hidráulicos (como exemplo a profundidade da água e duração da enchente) e os critérios referentes ao terreno, ao clima e as características da população presente (como a idade, condição financeira, experiência etc.).

Peng e Zhang (2012) descreveram modelos acerca de alternativas para se estimar perdas de vidas por inundações, e esses modelos podem ser classificados como: modelos físicos, empíricos e combinados. Os modelos físicos são elaborados com finalidade de simular o comportamento humano durante as inundações, por meio de teste de estabilidade humana em diferentes profundidades e velocidades de escoamento; os empíricos estão mais associados a relações estatísticas entre parâmetros, como população de risco, tempos de alerta, profundidade etc. Por último, o combinado utiliza conhecimento de modelos físicos e empíricos para simular o comportamento do corpo de seres humanos nas inundações.

Conforme Rotava *et al.* (2013) e Simões *et al.* (2016), diversos são os critérios de desestabilização do corpo e a consideração de aspectos físicos pode ser útil para estimar os níveis de vulnerabilidade de um indivíduo exposto à ameaça. Para que isso ocorra, uma metodologia pode ser representada por um modelo matemático com valores de forças atuantes (Figura 14) com condições críticas para que se estabeleça a estabilidade.



Figura 14: Forças atuantes em uma parte do corpo humano Fonte: SIMÕES *et al.* (2016)

O risco hidrodinâmico associado à instabilidade de pessoas em situação de inundações é considerado por autores como Viseu (2006), USBR (1998), Jonkman e Penning Rowsell (2008) pelo produto crítico dado na Equação 1. Contudo, essa função de aproximação empírica é puramente regressiva e não permite estabelecer uma ligação efetiva entre o nível de risco e efeitos físicos, tais como instabilidade para crianças ou para adultos (MILANESI *et al.*, 2015).

Estudos existentes, como Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.* (2015), indicam que a instabilidade humana pode ser provocada por dois tipos de mecanismos, o deslizamento e o tombamento (Figura 15). O deslizamento ou instabilidade de atrito ocorre quando a força de arrasto induzida pelo escoamento horizontal é maior que a resistência de atrito entre o pé e a superfície do chão. Por sua vez, o tombamento ou instabilidade de momento ocorre sempre que o momento causado por um escoamento se aproxima ou excede o momento referente ao peso do corpo.



Figura 15: Representações de instabilidades de um corpo por momento e por atrito respectivamente Fonte: Adaptado de JONKMAN e PENNING ROWSELL (2008)

Em que d2 é a distância do centro de articulação da pessoa (ponto P) ao centro da força de empuxo vertical [m], h é a altura de escoamento, P é o ponto no qual a pessoa se articula enquanto se inclina no escoamento, v é a velocidade do escoamento [m/s], α é a inclinação da pessoa em graus e L a altura da pessoa [m]. Para Milanesi *et al.* (2015) as manobras posturais de uma pessoa na tentativa de se adaptar ao escoamento podem aumentar a estabilidade contra o tombamento, diferente do deslizamento, pois a distribuição da massa corporal não altera substancialmente a resistência ao atrito.

Diversos autores descreveram estudos de análises da instabilidade de corpo humano em inundações, dentre os quais, destaca-se:

• Em 1973, Foster e Cox testaram a estabilidade de crianças (9-13 anos) de diferentes alturas e massas num laboratório e constataram a influência dos fatores físicos, emocionais e dinâmicos na estabilidade sob o escoamento de água. Não foi elaborada nenhuma relação quantitativa da instabilidade, mas foi percebida uma forte influência do deslizamento nas crianças, o que pode ser explicado porque o experimento foi realizado em escoamento com baixas profundidades de água e altas velocidades.

 Abt *et al.* (1989): Foi o primeiro estudo experimental desenvolvido para identificar o comportamento do equilíbrio humano em inundações, já apresentando uma formulação para o produto crítico em função de atributos físicos do corpo humano (altura e massa). O objetivo principal era prever a profundidade e a velocidade aproximadas que causam a perda de equilíbrio. Para isso foi utilizado um corpo rígido de concreto simplificado de base retangular (monólito) e seres humanos (Figura 16), e constatou-se que, à medida em que a declividade aumenta, o produto crítico diminuía. Um de seus resultados foi que a instabilidade dos monólitos ocorria mais rápido que a instabilidade humana.



Figura 16: Mecanismos de segurança utilizados no experimento em canal Fonte: ABT *et al.* (1989)

Uma comparação dos resultados experimentais obtidos por Abt *et al.* (1989) com os de Karvonen *et al.* (2000) é apresentado no Quadro 6.

Referência	Superfície	Condições	Pessoas	Resultados
Abt <i>et al.</i> (1989)	Grama, concreto, aço.	v= 0,36 - 3,5 m/s h= 0,42 - 1,2 m	20 pessoas, homens e mulheres de boa saúde, com 19 a 54 anos, com massa variando de 41 - 91 kg e altura de 1,52 - 1,91 m	hv méd.=1,33 m²/s Desvio padrão = 0,28 m²/s
Karvonen <i>et</i> <i>al.</i> (2000)	Grade de aço escorregadia	v= 0,6 - 2,75 m/s h= 0,3 - 1,1 m	7 pessoas, homens e mulheres, algumas profissionais de sobrevivência, com massa de 48 - 100 kg e altura de 1,60 - 1,95 m	hv méd.=1,33 m²/s Desvio padrão = 0,28 m²/s

Fonte: Adaptado de JONKMAN e PENNING-ROWSELL (2008)

• Endoh e Takahashi (1995): Realizaram pesquisas de instabilidade de corpo decorrentes de passagens de ondas em um quebra mar. Para isso, foram realizados experimentos com três protótipos em formato circular para avaliação da perda de equilíbrio e os mecanismos de tombamento e deslizamento já foram citados no trabalho. Um de seus resultados foi que a perda da estabilidade ocorreu com velocidade de 0,9 m/s com profundidade aproximada de 0,7 m.

• Lind *et al.* (2004): Calibrou parâmetros (K) em fórmulas de produtos críticos com base em três modelos mecânicos, com intuito de analisar a instabilidade em diferentes tipos de corpo. Os três modelos considerados correspondiam a um corpo rígido de seção transversal cilíndrica circular, um corpo de seção transversal quadrada e um corpo composto por três cilindros circulares rígidos de diferentes diâmetros. Todos esses modelos buscavam representar um corpo humano sujeito a forças de arrasto e flutuabilidade. Para a calibração dos parâmetros foram utilizadas informações das pesquisas de Abt *et al.* (1989) e Karvonen *et al.* (2000) em 103 observações com homens e mulheres, variando a inclinação local, peso, altura, vestimentas e rugosidade da superfície local (concreto, grama, solo, cascalho).

Alguns de seus resultados é que se a inclinação local e a rugosidade forem moderadas, suas influências são insignificantes no produto crítico. O gênero do ser humano foi um parâmetro que teve influência significativa nas análises, com maiores coeficientes de variações, mas que em contrapartida pode também ser desprezado caso os valores de altura e peso sejam relevantes.

A proposta de definição de instabilidade do corpo humano, segundo estes autores também segue a análise de forças e momentos. Para cada um dos três modelos estudados foram estabelecidas formulações de perda de estabilidade de corpo.

Para análise de instabilidade de um corpo cilíndrico com seção transversal circular, foram desenvolvidas as Equações 2 e 3, com base em estudos experimentais.

$$hv = \left[\left(\frac{\pi g}{C_D}\right) a dL \left(1 - \frac{h}{L}\right)\right]^{1/2}$$
(2)

Na Equação 2, o termo $\left(\frac{\pi g}{c_D}\right)^{1/2}$ foi substituído pelos referidos autores, por um parâmetro K que, diferente do coeficiente de arrasto, C_D , não é adimensional devido à unidade da aceleração da gravidade, *g*.

$$hv = K \left[adL\left(1 - \frac{h}{L}\right)\right]^{1/2} \tag{3}$$

Onde *a* é o diâmetro do cilindro, *d* é o braço do movimento de alavanca do corpo, h é a altura de escoamento, C_D é o coeficiente de arrasto e L é a altura do corpo.

Percebendo semelhanças nas equações para os três modelos citados anteriormente, com variações em torno de 15%, foi desenvolvida uma equação mais simples e genérica (Equação 4), que relaciona o produto crítico, a altura, o peso do corpo e a altura de escoamento. Cada corpo foi associado a um parâmetro K_D

calibrado referente às observações de cada análise relativas à rugosidade da superfície, gênero do ser humano e inclinação local.

$$h\nu = K_D \left[W \left(1 - \frac{h}{L} \right) \right]^{1/2},\tag{4}$$

em que W é o peso do corpo e K_D é a variável calibrada.

Jonkman e Penning-Rowsell (2008): Em seu estudo, descreveram alguns trabalhos, dentre eles os de Ramsbottom *et al.* (2004) e Penning-Rowsell *et al.* (2005), que relacionaram o perigo de inundação (baixo, médio, moderado, significativo ou extremo) com o produto crítico e detritos da água. Em sua pesquisa, os referidos autores relacionaram a instabilidade humana com o tombamento e deslizamento por meio de um experimento feito em um rio, onde comportas controlavam o escoamento; os participantes ficavam presos a fios de segurança. Durante o experimento, foi observado que primeiro o sujeito deslizava e depois caia. O deslizamento do sujeito começou a ocorrer com profundidade de 0,23 m e velocidade de 1,8 m/s, já o tombamento com velocidade de 3 m/s. Um dos resultados foi que tanto com velocidades de 0,5 – 3 m/s e profundidades de 0,5-1,2 m as pessoas ficam instáveis tanto por momento quanto por atrito.

Jonkman e Penning Rowsell (2008) ainda apresentam o estudo feito no Centro de Pesquisas de Perigos de Inundação (FHRC) do Reino Unido, no rio Lea, controlado por comportas que operam um canal para Cattlegate. Durante o teste um indivíduo de 68,25 kg com altura de 1,70 m se inclinava à medida em que a velocidade do escoamento aumentava, de modo a ficar na diagonal em relação a direção do escoamento, até cair. Profundidades de até 0,35 m e velocidades de até 2,6 m/s foram descritas como toleráveis para permanência em pé; no entanto, com profundidades de 0,23 m e 1,8 m/s de velocidade o deslizamento para trás já ocorria. No teste o sujeito caiu quando submetido a uma velocidade de escoamento de 3 m/s, a uma profundidade de 0,36 m.

Se tratando dos mecanismos de instabilidade de corpos, Jonkman e Penning-Rowsell (2008) foram os primeiros a descrever formulações de produtos críticos para instabilidade por tombamento e para instabilidade por deslizamento levando em consideração atributos físicos do corpo (massa do individuo, sua altura, largura média do corpo exposto ao fluido), ângulo de inclinação da pessoa em relação à direção do escoamento, características da área de estudo, como a rugosidade da superfície do solo, e ainda, elementos relacionados ao escoamento, como a densidade do fluido referente à inundação, desconsiderando forças de empuxo. Na Figura 17 são comparados os produtos críticos definidos pelas pesquisas de Abt *et al.* (1989), Karvonen *et al.* (2000) e do *Flood Hazard Research Centre*, Middlesex University - FHRC (1999) apresentados por Jonkman e Penning-Rowsell (2008).



Figura 17: Comparação de profundidades-velocidades para as pesquisas de instabilidade e curvas de instabilidade de momento e atrito Fonte: Adaptado de Jonkman e Penning-Rowsell (2008)

As curvas de instabilidade de tombamento (momento) e deslizamento (atrito) da Figura 17 foram elaboradas com base no mesmo indivíduo testado pelo FHRC, com massa de 68,25 kg, altura de 1,70 m e coeficiente de momento de $0,16 \frac{m^2}{s k a^{0.5}}$.

Como resultado, o produto crítico que causou a instabilidade no corpo humano para tombamento proposto por Abt *et al.* (1989) igual a 1,27 m²/s foi parecido com o valor de 1,32 m²/s obtido pelo FHRC (1999). Além disso, foi pressuposto que as diferenças entre Abt *et al.* (1989) e as observações Karvonen *et al.* (2000) estão associadas ao tipo da roupa do teste e as circunstâncias em que foram submetidas, como tempo e clima.

Os testes da FHRC (1999) confirmaram que em altas velocidades e profundidades rasas a instabilidade de atrito ocorre mais cedo do que a instabilidade por momento. Esta última ocorre geralmente quando a profundidades mais elevadas e velocidades de água mais baixa.

As instabilidades por momento e atrito são também definidas por meio do equilíbrio de forças e momentos nas direções cartesianas x e y (Figura 15).

As relações de velocidade de escoamento e altura de lâmina d'água que representam a instabilidade por momento e atrito são, respectivamente:

$$h\nu = \left(\frac{2mg\cos(\alpha)L}{C_D B\rho}\right)^{0.5} \tag{5}$$

$$hv^2 = \frac{2\mu g}{C_D B\rho} m \tag{6}$$

Em sua pesquisa, Jonkman e Penning-Rowsell (2008) sugeriu o coeficiente de Manning igual a 0,4, como um valor conservador de primeira ordem para cálculo das relações de hxv.

Os limites teóricos definidos por Jonkman e Penning-Rowsell (2008) são: $C_D = 1.1$; $\alpha = 75^{\circ}$; B = 0.4 m; $g = 9.81 m/s^2$; a massa específica (ρ) = 1.00 g/cm³para um adulto, com altura (L) igual a 1.75 m e massa (m) igual a 75 kg. O declive da superfície foi desconsiderado na análise por ser considerado baixo.

O gráfico da Figura 18 representa os limites de instabilidades por atrito e momento definidos por Jonkman e Penning-Rowsell (2008).





 Rotava *et al.* (2013) avaliaram mecanismos físicos e forças que influenciam no equilíbrio e desenvolveram uma formulação para o produto crítico. Foi constatado que o produto crítico variava também em função do atrito da superfície, e que essa não era uma relação constante com a profundidade. Além disso, na análise de critérios e mecanismos de análise de instabilidade humana, foi percebido que a inclusão da força de empuxo na equação matemática melhorou o seu ajuste em relação aos dados experimentais, tendo, reduzido o produto crítico em profundidades mais altas. Rotava *et al.* (2013) descreveram uma equação para instabilidade por atrito, que diferentemente de Jonkman e Penning-Rowsell (2008), foi considerada também a força de empuxo. Para isto, sua metodologia seguiu de forma similar, através de equilíbrio de forças e momentos.

$$hv_c^2 = \frac{\mu(F_{person} - F_{buoy})}{0.5 C_D B \rho}$$
(7)

Na Equação 7, F_{buoy} é a força de empuxo, em Newton. Os parâmetros adotados nesta pesquisa seguiram os limites teóricos apresentados anteriormente.

$$F_{buoy} = \rho_s V_c g,\tag{8}$$

em que, ρ_s é a massa específica do fluído (g/cm³), V_c é o volume submerso da pessoa (m³), g é a aceleração da gravidade local (m/s²) e m é a massa do corpo [kg]. O volume submerso é dado por (caso h≤L):

$$V_c = \frac{hm}{L\rho},\tag{9}$$

em que h é a profundidade da água (m) e ρ é a massa específica da pessoa, assumida igual à 1,00 g/cm³. Também é indicado por esse autor utilizar o coeficiente de arrasto igual a 1,1, pois foi o mesmo usado por Endoh e Takahashi (2005) e presente no intervalo sugerido por Fox e McDonald (1998), que vai de 1 a 1,5.

Segundo os autores, se a força de arrasto exceder a força de atrito, é impossível que uma pessoa não seja arrastada pela corrente de água, e isso se torna mais susceptível à medida que o valor da profundidade é menor que 0,5 m ou maior que 1,0 m.

 Xia et al. (2014) estabeleceram equações que analisavam a instabilidade de corpos em inundações por meio de análises teórico experimentais, com um canal de baixa profundidade e alta velocidade, considerando o tombamento e o deslizamento dos corpos. Imaginou-se também uma situação em que o indivíduo tombaria escorregando, desconsiderando inclinações corporais.

Foram desenvolvidas formulações de instabilidade para tombamento e deslizamento, observando o comportamento da variação de perfis de velocidade de propagação e apresentadas equações de velocidades incipientes para cada mecanismo.

Suas formulações de instabilidade foram definidas por meio da análise de equilíbrios de momentos e forças, atuantes durante a interação do corpo com o escoamento,

como o empuxo de Arquimedes, a força de arrasto, a força peso, a força de atrito e a força normal.

Para a determinação de alguns parâmetros, como o volume de água deslocado pelo corpo, recorreu-se a relações de proporcionalidade de segmentos do corpo presentes na literatura.

Alguns parâmetros foram mensurados por meio de testes experimentais (8 testes para análise da instabilidade por deslizamento e 46 para o tombamento) com o modelo reduzido (Figura 19) que buscava representar um sujeito típico chinês (altura de 1,70 m e massa de 60 kg) inserido em um canal de 60 m de comprimento, 1,2 m de largura e 1 m de profundidade.



Figura 19: Modelo reduzido de corpo humano usado em teste num canal Fonte: XIA *et al.* (2014)

Para facilitar suas análises, Xia *et al.* (2014) usaram a formulação de distribuição do perfil de velocidade para canais abertos e determinaram velocidades incipientes para os mecanismos de instabilidade por deslizamento e tombamento.

$$v = \alpha (\frac{h}{L})^{\beta} \sqrt{\frac{m}{\rho_{s}hL} - (a_{1}\frac{h}{L} + b_{1})\frac{ma_{2} + b_{2}}{L^{2}}}$$
(10)

$$v = \alpha (\frac{h}{L})^{\beta} \sqrt{\frac{m}{\rho_{s}h^{2}} - (\frac{a_{1}}{h_{p}^{2}} + \frac{b_{1}}{hL})ma_{2} + b_{2}}$$
(11)

Os parâmetros α e β são calibrados conforme a estrutura do corpo humano, a força de atrito e a força de arrasto; a_1, b_1, a_2, b_2 são coeficientes calibrados em função da estrutura do corpo humano considerado, h é a profundidade da água, L é a altura do corpo, ρ_s a massa específica do fluido, e *m* é a massa do corpo.

As variáveis medidas tiveram como base um modelo reduzido numa escala geométrica λ_L 5,54, com altura 30 cm, massa 0,334 kg representando um corpo

humano com altura de 1,70m e massa igual a 70 kg, respeitada a similaridade geométrica sem distorções. Os autores adotaram um coeficiente de atrito entre o solado da bota a superfície de cimento igual a 0,5.

As determinações de α e β foram realizadas com os dados experimentais obtidos no referido canal.

Uma das constatações do estudo é que a instabilidade por deslizamento geralmente ocorre em regimes de escoamento supercríticos (com baixas profundidades de água e altas velocidades de propagação) e a instabilidade por tombamento geralmente acontece em regimes de escoamento subcríticos (altas profundidades e baixas velocidades de propagação).

• Em seu estudo, Milanesi *et al.* (2015), assim como Jonkman e Penning Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013) e Xia *et al.* (2014), analisaram a estabilidade humana através das forças envolvidas durante a interação do escoamento da água com o corpo, e equilíbrio de momento. Para isto utilizou um corpo composto por cilindros, considerando o seu deslizamento, tombamento e afogamento, relacionado aos níveis elevados de água.

Uma das maiores diferenças do trabalho de Milanesi *et al.* (2015) em relação aos anteriores é que o mesmo foi o primeiro a incluir a inclinação local (Figura 20) para fluidos de diferentes densidades, em situações em que as inundações poderiam ameaçar a vida humana e comprovou-se que essas variáveis influenciam significativamente nos fatores de risco e redução da estabilidade.



Figura 20: Modelo de corpo humano em vista lateral (a) e frontal (b) Fonte: MILANESI *et al.* (2015)

Em que h é a profundidade da água (m), Y é a altura do corpo composto por cilindros em posição vertical (m), ϑ é o ângulo de inclinação em relação à direção horizontal, α é a inclinação do corpo em relação ao terreno ($\alpha = \pi/2 - \vartheta$), d é o diâmetro do cilindro que representa as pernas, D é o diâmetro do cilindro que representa o tronco (D = 2d), o centro de gravidade do corpo é identificado pelas coordenas X_G , Y_G , o centro de gravidade do volume do corpo submerso é X_{GS} , Y_{GS} , U é a velocidade da água (m/s), ξ e η são os planos de referência em relação ao declive do terreno.

Ciente de que vários são os limiares de perigo, pois as pessoas têm pesos e alturas diferentes, foi definido um limiar de estabilidade para uma criança de 7 anos (visto que essa é uma idade em que as crianças estão mais propensas a estar envolvidas em escoamentos, sem o acompanhamento de adultos, segundo Milanesi *et al.* (2015)) e um limiar de estabilidade para um adulto médio (Quadro 7).

Parâmetros	Criança	Adulto	
m (kg)	22,4	71	
Y (m)	1,21	1,71	
D (m)	0,17	0,26	
d (m)	0,085	0,13	

Quadro 7: Parâmetros físicos assumidos para adultos europeus e crianças mundiais

Fonte: Milanesi et al. (2015)

O coeficiente de atrito definido foi igual a $\mu = 0,46$, calibrado considerando valores de profundidades e velocidades médias, usando parâmetros de crianças e adultos, em inclinações relativas a cada teste.

Uma das críticas descritas em seu estudo é ao trabalho de Xia *et al.* (2014). Isso se deve pelo de ser desconsiderada a inclinação local nas equações, e também, pela necessidade de calibrações substanciais de parâmetros nas equações e pela falta de capacidade dos equacionamentos representarem situações com baixas profundidades e altas velocidades (instabilidade por deslizamento), pois, para situações em que o terreno tiver inclinações superiores a 20%, a instabilidade por deslizamento é predominante.

Milanesi *et al.* (2015) também considera a representação simplificada do corpo humano como um conjunto de cilindros num modelo conceitual para representação do corpo humano, e são avaliadas as instabilidades de corpo por deslizamento e tombamento por meio de equilíbrios de forças e momentos.

São incluídas nas equações a massa específica do fluido e variações da inclinação local até então não consideradas para esse tipo de análise. Milanesi *et al.* (2015) afirmam que a inclinação afeta na instabilidade modificando a direção relativa entre o peso e as forças impactantes. Dessa forma, cada força é definida em função de um eixo normal referente à inclinação local (Figura 21).





A relação para estabilidade é definida pela seguinte equação:

$$D + W_p \le T,\tag{12}$$

em que D é a força de arrasto, W_p é a componente da força peso paralela a força de arrasto e T a força de atrito.

Caso a força de atrito seja menor, o indivíduo irá deslizar.

O mecanismo de tombamento é definido pela seguinte relação:

$$D\xi_{L,D} + W_p\xi_G + B_N\eta_{GS} + L\eta_{L,D} \le W_N\eta_G,$$
(13)

em que, D e L são forças decompostas da força resultante (R), referentes a força de empuxo e arrasto, B_N é a força de empuxo no corpo submerso, ξ_G e η_G são coordenadas referentes aos pontos de aplicação da força peso no centro de massa, e, finalmente, $\xi_{L,D}$ e $\eta_{L,D}$ são as coordenadas da aplicação das forças D e L em relação ao solo e ao calcanhar, respectivamente.

Milanesi *et al.* (2015) ainda propõem uma condição de afogamento, de modo que a cabeça esteja totalmente fora do escoamento. Assumindo o tamanho da cabeça igual a 3/16Y, pode ser ajustada a profundidade admissível para não haver afogamento.

Um coeficiente de arrasto igual a 1,0 foi adotado, referente a um cilindro circular que caracteriza um corpo humano vestido.

As análises realizadas por Milanesi *et al.* (2015) resultaram no gráfico da Figura 22, que expõe os limiares de instabilidade para o deslizamento, tombamento e afogamento definidos para crianças (linha espessa) e adultos (linha fina).



Figura 22: Limites de instabilidade ao deslizamento (a), tombamento (b) e afogamento (c) para crianças e adultos Fonte: MILANESI *et al.* (2015)

Simbologia: Y_a é a altura de adulto, e Y_c é a altura de criança, $\vartheta = 0^\circ$ e ρ =1,00 g/cm³.

• Recentemente, Arrighi *et al.* (2017) incluíram um parâmetro de mobilidade dimensional (θ_p), que define aspectos relacionados ao escoamento e às características físicas do sujeito, para pessoas que estão com parte do corpo submerso no escoamento da inundação tanto para o deslizamento quanto para o tombamento, e também apresenta um modelo numérico tridimensional que detalha a geometria do corpo humano relacionando com produtos críticos de velocidade e

profundidade da água referentes ao escoamento. A equação proposta é indicada a seguir:

$$\theta_p = \frac{2l}{H_p} \cdot \frac{H_p - h}{h} \tag{14}$$

 H_p é a altura de um prisma utilizado como referência, largura igual a l e profundidade da água h.

Os cálculos numéricos realizados foram efetuados inicialmente com três malhas 0,015; 0,01 e 0,005 m. Com a realização desses testes, constatou-se que os coeficientes calculados (como o coeficiente de arrasto) não apresentaram diferenças significativas e, por esse motivo, foi preferida a malha de 0,015 m, por ter um tempo de processamento menor. Um exemplo de refinamento da malha no corpo, usada no referido trabalho, é apresentado na Figura 23.



Figura 23: Malha computacional em torno do corpo humano para todo o corpo do ser humano (a), para a perna (b) e o para o pé (c) Fonte: ARRIGHI *et al.* (2017)

Uma das simulações numéricas realizadas foi para um teste de Jonkman e Penning-Rowsell (2008) para uma velocidade de escoamento de 2,4 m/s e profundidade da água de 0,35 m (Figura 24).



Figura 24: Efeito de um escoamento supercrítico num ser humano Fonte: ARRIGHI *et al.* (2017)

Entre os resultados encontrados, constatou-se que o parâmetro de mobilidade dimensional identifica adequadamente limites de instabilidade para o deslizamento e o tombamento em função da submersão parcial do corpo e do número de Froude.

Diante dos inúmeros trabalhos apresentados anteriormente, que descrevem a gradativa mudança das diferentes formulações de instabilidade de corpos em inundações, percebe-se que o estado da arte atual apresenta equações robustas, que consideram uma diversidade de parâmetros e variáveis que buscam descrever, de forma mais realista, as interações entre o corpo humano e escoamentos.

Mas, apesar da quantidade de trabalhos já desenvolvidos, são raros os que relacionam esses mecanismos com o zoneamento de risco, de maneira que os mecanismos físicos de instabilidade de corpo humano se tornem critérios incorporados às definições de zonas de riscos.

O trabalho de Milanesi *et al.* (2014) foi o mais atual encontrado na literatura com essa finalidade. Milanesi *et al.* (2014) abordou diferentes critérios de zoneamentos de risco para condição de escoamento de detritos em três bacias alpinas, por meio da elaboração de mapeamentos resultados da simulação numérica com auxílio da ferramenta computacional FLO-2D, em um MDE com malha de 5,0 m. Para isto foram utilizados mapas de riscos elaborados segundo orientações de legislações japonesas (baseiam-se na força específica do fluido, na altura de lâmina d'água e velocidade de escoamento), de legislações suíças (a definição de zonas de risco é baseada nos valores de altura de lâmina d'água, produtos críticos e deposição de detritos), de legislações austríacas (consideram a definição do risco basicamente

pela relação da energia específica e altura de lâmina d'água, desprezando parâmetros como a massa específica do fluido e a inclinação local), e por último, o mapa de risco considerando a instabilidade do corpo humano.

Para elaboração do último mapeamento, considerando a instabilidade do corpo humano, Milanesi *et al.* (2014) desenvolveram um modelo conceitual simples com um ser humano em posição ortogonal ao chão, representados por cilindros de diferentes tamanhos, com alturas e pesos medidos, para estudo de instabilidade em escoamento de detritos.

Foram contempladas em sua análise as forças de arrasto, atrito e empuxo e variáveis como coeficiente de arrasto, inclinação local, massa específica do fluido, volume submerso na água, peso do corpo e velocidade do escoamento.

Por fim, Milanesi *et al.* (2014) elaborou duas curvas de perigo relacionando a altura de lâmina d'água com a velocidade de escoamento de água e no escoamento de detritos e comparou os mapeamentos resultantes das inundações.

Alguns dos resultados apresentados por Milanesi *et al.* (2014), foi que o zoneamento segundo legislações japonesas são os oferecem menor fator de segurança e se apresenta pouco confiável para cenários que apresentarem baixa velocidade e altas profundidades, e o zoneamento de risco mais cauteloso é o zoneamento orientado pela legislação austríaca.

Quando esses mapeamentos de risco foram comparados com o mapeamento proposto considerando a instabilidade de corpo, este último se mostrou mais cauteloso, apresentando limites de risco inferiores aos apresentados pelos mapeamentos orientados pelas legislações dos países citados.

Apesar das simplificações, Milanesi *et al.* (2014) confirma a importância de se considerar a instabilidade de corpo em mapeamentos de áreas de risco em inundações, pois foi permitido avaliar as características gerais do processo de inundação e instabilidade de corpo, não sendo apenas de formulações de bases puramente físicas.

Embora o trabalho de Milanesi *et al.* (2014) tenha contemplado uma diversidade de zoneamentos, e ainda, considerado a instabilidade de corpo humano, não foram discutidos e quantificados os diferentes mecanismos que causam a instabilidade do corpo (tombamento e deslizamento).

3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ONDA DE CHEIA

Modelagens hidrodinâmicas de propagações de ondas de cheias são alternativas frequentemente utilizadas em estudos de ruptura de barragens, pois podem auxiliar a elaboração de mapas de inundações e contribuírem para a tomada de decisões relativas às ações de prevenção e emergência. Essas modelagens fornecem alguns resultados, entre eles as velocidades do escoamento enquanto ocorre a passagem das ondas de cheias no vale a jusante e valores de profundidades de lâminas d'água (HALTAS *et al.*, 2016).

Um modelo de simulação hidráulica consiste em um modelo matemático que representa processos físicos, especificamente hidráulicos, que acontecem durante as inundações. Tais processos podem ser descritos pela lei de conservação de massa e pela equação da quantidade de movimento linear (ou segunda lei de Newton), que juntas levam às equações de Saint-Venant (Eq. 15 e 16).

Equacionamento: Conservação de massa e segunda lei de Newton

As equações que modelam o escoamento em superfície livre em canais, em regime variável e variado, podem assumir diferentes formas em função das simplificações adotadas. Há as equações unidimensionais de Saint-Venant, que representam o princípio de conservação de massa e a segunda lei de Newton para condição de escoamento incompressível, distribuição de pressões hidrostática e distribuição de velocidades uniforme nas seções transversais. Em duas dimensões, as equações são obtidas a partir da integração da equação de conservação de massa ao longo da vertical, assim como da integração, também na vertical, das equações de Navier-Stokes. A equação 15, apresentada a seguir, é a forma diferencial, obtida dessa forma, para o escoamento bidimensional em um canal (CHAUDHRY, 2008, p.415). As equações 16a e 16b correspondem às equações resultantes da integração das equações de Navier-Stokes (cuja base é a 2ª Lei de Newton, uma equação vetorial, por isso as duas componentes). Para tanto, assume-se que a aceleração vertical é desprezível.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (yu)}{\partial x} + \frac{\partial (yv)}{\partial z} = 0$$
(15)

$$\frac{\partial(yu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(yu^2 + \frac{1}{2}gy^2 \right) + \frac{\partial(yuv)}{\partial z} = gy(I_{ox} - I_{fx})$$
(16a)

$$\frac{\partial(yv)}{\partial t} + \frac{\partial(yuv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(yv^2 + \frac{1}{2}gy^2 \right) = gy(I_{oz} - I_{fz})$$
(16b)

Nestas equações, u é a componente em x do vetor velocidade, v é a componente em z do vetor velocidade, no plano xz, y é a altura de escoamento, g a aceleração devido à gravidade, t o tempo, I_o a declividade de fundo e I_f a declividade da linha de energia.

De acordo com Pontes e Collischonn (2015) os cálculos de propagação de ondas de cheias em rios são complexos, mas por meio da modelagem hidrodinâmica, que utilizam técnicas numéricas para resolução das equações de Saint-Venant são obtidos resultados aproximados do real. Ainda para eles, esses modelos representam satisfatoriamente os efeitos de amortecimento da onda, a planície de inundação, a conservação dos volumes dos hidrogramas, e também, as vazões de pico. Entretanto, para executar tais funções, podem exigir altos custos computacionais, devido às altas rotinas de cálculo.

Nesse contexto, as ferramentas computacionais têm sido frequentemente empregadas como agentes que auxiliam à tomada de decisão pelos gestores e interessados no uso de recursos hídricos, por possibilitarem a modelagem de ondas de cheias e resolução das equações acima tratadas com técnicas numéricas (SILVA, 2014).

Viseu e Ramos (1999) revelam que existe uma grande quantidade de modelos capazes de simular o escoamento de uma onda de cheia decorrente da ruptura de barragens, e seus resultados variam em função de fatores como dados de entrada, condições iniciais e de contorno, hipóteses adotas e técnicas numéricas aplicadas. Dentre algumas classificações das modelagens hidrodinâmicas, estão os modelos uni e bidimensionais. Esses são frequentemente utilizados por fornecerem descrições detalhadas nas resoluções dos gradientes à jusante.

Os modelos unidimensionais geralmente são mais utilizados, principalmente por não demandarem altas durações de tempo de cálculo, pela simplicidade de uso e resultados coerentes (VISEU, 2006). Quando a opção for levar em consideração o escoamento unidimensional, com altura de água e velocidade constantes em toda seção transversal, a sua aplicação é facilitada (CESTARI JR., 2013). Ademais, a simulação unidimensional tem aproximações adequadas do sistema físico em vales

e topografias pouco complexas, em que o escoamento de água nas planícies de inundação segue a mesma direção do escoamento do rio (LAURIANO, 2009).

Os modelos bidimensionais são mais utilizados em áreas com topografias mais complexas, com cursos de águas de transições bruscas, tributários, presenças de obras hidráulicas como pontes, mas geralmente são aplicados em pequenas áreas devido à grande quantidade de dados necessários para caracterizar a área com detalhamento e às demandas de memórias computacionais (MORRIS e GALLAND, 2000).

Os modelos bidimensionais se destacam por serem mais realistas, se basearem no comportamento físico e representarem de forma mais adequada às grandes variações nos níveis das águas (MONTE *et al.*, 2016).

Ainda nesse contexto, Patel *et al.* (2017) afirmam que mesmo que as modelagens 1D sejam ainda muito úteis, principalmente para análises de escoamentos em canais artificiais, ela apresenta muitas limitações quando se refere ao excesso de escoamento, sendo assim mais aconselhado uma modelagem 2D.

Costabile *et al.* (2015) confirmam a eficácia da modelagem 2D declarando que atualmente os modelos totalmente dinâmicos 2D são os instrumentos mais confiáveis para estudos de inundação, principalmente em áreas de topografia complexas. Consideram também que as modelagens 1D são amplamente utilizadas devido ao reduzido tempo e custo envolvidos.

Os modelos 1D não calculam a direção que a água vai seguir, apenas sua profundidade, o que não é suficiente para estudos de inundações em planícies de inundações (ALZAHRANI, 2017).

Comumente são utilizados métodos numéricos diretos ou iterativos para resolução das funções matemáticas tratadas em cada modelagem, sejam elas lineares, não lineares, integrais numéricas, derivadas parciais etc. (TUCCI, 1998).

A escolha da técnica numérica mais indicada não é o bastante para afirmar que a solução encontrada é a correta segundo Tucci (1998), sendo imprescindível o conhecimento de condições do método usado que permitam soluções compatíveis.

Além disso, o erro sempre estará associado à solução analítica verdadeira, cabendo assim à verificação de convergência, estabilidade e precisão numérica.

Para Porto (2006), um método numérico é dito eficiente se o sistema for estável e preciso. Para o esquema numérico ser estável, o erro que surge no processo

computacional não evolui com o tempo de simulação; já para ser instável, o erro evolui rapidamente no tempo. A precisão numérica envolve a análise de critérios para escolhas de intervalos de tempos e intervalos de distância para que a solução numérica seja a mais próxima possível da solução verdadeira (TUCCI, 1998). Segundo Coutinho (2015) a estabilidade e a precisão numérica dependem substancialmente do intervalo de tempo de cálculo e do espaçamento das células da malha aplicada para simulação. Em sua pesquisa de avaliação de desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional o tempo máximo utilizado para computação foi de 60s, pois tempos maiores que esse causaram instabilidades numéricas em sua modelagem.

Exemplos de aplicações de modelos uni e bidimensionais para estudos de cheias e inundações:

 Dentre alguns estudos com a utilização de modelos hidrodinâmicos unidimensionais, Ribeiro *et al.* (2015) aplicaram o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) para auxiliar na simulação de eventos de cheias na bacia do Rio Una, no estado de Pernambuco, e descreveram alguns dados necessários para simulação, tais como: a precipitação, a vazão do rio e dos seus principais afluentes, geometria do vale e condições de contorno a jusante. Por fim, verificou-se que os resultados da modelagem foram coerentes com os níveis da água correspondentes medidos na cheia real, com abrangência da área inundada próximas às medidas em campo.

 Haltas *et al.* (2016) utilizaram modelagens uni (HEC-RAS 1D) e bidimensionais (Flo-2D) para prever e analisar ondas de cheias resultantes da ruptura de duas barragens em Istambul, na Turquia, e constataram que a modelagem de áreas mais densamente povoadas com edifícios, estradas e outras estruturas feitas pelo homem em uma área urbana pode exigir malhas mais finas, com maior detalhamento afim de reduzir a heterogeneidade da grade fornecida pela modelagem bidimensional.

 Coutinho (2015) avaliou o desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional com o HEC-RAS na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES. Segundo ele, as versões HEC-RAS 4.1 e HEC-RAS 2D 5.0 Beta utilizadas possuem bases teóricas e técnicas numéricas semelhantes, e
obtiveram resultados de simulações similares. Ainda, afirmou que modelo HEC-RAS 2D Beta necessita de menor passo de tempo de cálculo para convergência numérica de volumes finitos implícitos e o modelo HEC-RAS 4.1 permitiu selecionar áreas de escoamento ineficazes, ou seja, áreas em que não houve escoamento de água, o que torna a simulação mais simples, com mais rápida convergência numérica, mesmo com intervalos de tempos maiores, porque, para esses casos, a convergência numérica depende essencialmente do espaçamento entre as seções transversais.

Coutinho (2015) avaliou os resultados de ambas as modelagens através de um parâmetro chamado de medida F (percentual de área corretamente inundada pela simulação do modelo em relação à soma das áreas inundadas na simulação e observação). Com base na medida F, foi constatado que os dois modelos são capazes de representar satisfatoriamente as áreas inundáveis.

Devido a capacidade do HEC-RAS 2D construir para cada célula relações entre variáveis, como cota versus volume, áreas de face versus elevação, coeficientes de Manning versus elevação etc., tornou-se possível encontrar resultados de variáveis hidráulicas (velocidade, profundidade etc.) em locais específicos, como frente de escolas.

Apesar dos resultados de simulação da onda de cheia serem similares como citado acima, o HEC-RAS 1D calcula os calcula os valores de altura de lâmina d'água para cada seção transversal e varia com o comprimento do canal de forma linear, diferente do HEC-RAS 2D que os dados de geometria devem ser associados ao MDT do terreno.

Quanto a entrada de dados, o HEC-RAS 1D e o 2D possuem detalhamento também similares (estruturas hidráulicas, seções transversais, coeficiente de Manning etc.). Para Coutinho (2015) a visualização dos resultados na versão 2D possuem diferenciais, por permitir excelente visualização gráfica, por meio de animações que descrevem o comportamento da onda de cheia e utilizam bases de imagens também on-lines (Google Earth, bases SIG).

• Chiamulera *et al.* (2015) estudaram a calibração do modelo hidrodinâmico unidimensional e bidimensional SOBEK na bacia do Rio Grande em Minas Gerais.

• Souza (2017) utilizou o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0 (bidimensional) como ferramenta para simular manchas de inundações provenientes da ruptura

hipotética da UHE Santa Branca em São Paulo e avaliar os impactos associados com base nas variáveis relacionadas à arborização, domicílios permanentes com pavimentação e bueiros. Segundo a autora, a escolha pela versão 2D para criação das manchas de inundação ocorreu por ser de manuseio facilitado e por ser mais indicado para estudos com ocorrências de diferentes regimes de escoamento, geometrias de terreno e outros limitantes inerentes aos modelos 1D.

 Patel *et al.* (2017) confirmaram a capacidade do modelo HEC-RAS 5.0 para estudos de mapeamento e gerenciamento de inundações por meio da simulação de escoamentos liberados pela barragem de Ukai, que inundou diversas áreas, dentre elas a cidade de Surai, localizada a 100km a jusante do barramento.

 Alzahrani (2017) reitera em sua tese a aplicabilidade do modelo bidimensional do HEC-RAS 5.0 em descrever com maior precisão o comportamento do escoamento no escoamento no Miami River e Bear Creek, em Ohio. Em seu estudo ele comparou resultados da simulação em escoamento instável nos modelos unidimensional e bidimensional.

O modelo HEC-RAS 2D detalha com maior precisão o canal e a planície de inundação através de uma representação do terreno em grades e células. Através do processador de escoamento 2D, é estabelecida uma relação de volume, elevação e área molhada detalhada.

Essa malha discretiza o rio e a planície de inundação em células individuais (cada célula contém dados de elevação e rugosidade). O modelo HEC RAS 5.0 utiliza uma abordagem de batimetria de sub-grade (utilizada para melhorar o tempo de computação e, além disso, a utilização também é justificada devido aos termos derivados de segunda ordem e a natureza diferencial da relação entre as variáveis), em que uma célula é composta por outras células (BRUNNER, 2016).

Esse software oferece a opção para o usuário escolher o método de cálculo 2D por meio das equações completas ou simplificada de Saint-Venant, o que oferece maior flexibilidade. Segundo seu manual, as equações completas de Saint-Venant resolvem uma gama maior de problemas; em contrapartida, as equações simplificadas de Saint-Venant oferecem maior rapidez e estabilidade ao sistema.

No sistema modelado dessa pesquisa, o rio e as áreas propensas ao escoamento estão contidas em um mesmo domínio computacional, e o fenômeno do escoamento é modelado em sua totalidade. As relações de elevação hidráulica são calculadas para cada célula que já contém informações, como raio hidráulico, volume e área da seção transversal previamente calculada pela grade fina (Figura 25) (BRUNNER, 2016).



Figura 25: Esquema de sub-grade utilizado pelo modelo HEC-RAS Fonte: Brunner (2016)

O método numérico utilizado para a solução das equações não lineares pelo HEC-RAS é o de discretizações híbridas (aproximam as equações diferenciais parciais em algébricas no tempo e no espaço), que combina o método de diferenças finitas com volumes finitos por conta da ortogonalidade das grades, com técnica de solução das equações do método de Newton.

A orientação da derivada é importante. Caso a direção das derivadas entre as células da grade não seja perfeita o método dos volumes finitos é utilizado (é dito não localmente ortogonal (Figura 26)). Caso ocorra o contrário, o método das diferenças finitas é usado. Se a direção entre as faces da célula for perfeita, a grade é dita localmente ortogonal nesta face (BRUNNER, 2016) (Figura 27).



Figura 26: Direção das derivadas das células utilizadas nas formulações numéricas de diferenças finitas Fonte: Brunner (2016)



Figura 27: Representação da direção não ortogonal das células utilizadas nas formulações numéricas de volumes finitos Fonte: Brunner (2016)

Sendo H_1 e H_2 a elevação das superfícies de água, n' a direção da derivada, Δ n' a distância entre os centros celulares, k'_1 e k'_2 são faces da célula, l_k é o comprimento da face da célula, $n_{k'}$ é o vetor normal da face e j é o centro celular.

Para discretização da equação de quantidade de movimento são feitas aproximações de volumes finitos também com o método de Crank-Nicolson.

No Quadro 8 apresenta-se um resumo de alguns modelos disponíveis em uma e duas dimensões.

	Modelo	Organização / Suporte			
	HEC-RAS	USACE			
	MIKE 11	DHI			
	DAMBRK	NWS			
	SMPDBK	NWS			
	FLDWAV	NWS			
	Hydro1D	Mott MacDonald			
	Info Works RS	Wallingford Software			
	ISIS	Wallingford Software			
	BOSS DAMBRK	Boss International			
	SOBEK	WL/Delft Hydraulics			
	DBK 1	IWHR, China			
1D	Cliv PLUS	EPUSP			
	HAESTED DAMBRK	HAESTED METHODS			
	LATIS	Tams			
	TVDDAM	Royal Institute of Technology			
	CASTOR	CASTOR Cemagref			
	SOBEK	Delft Hydraulics			
	DYNET - ANUFLOOD	ANU –Reiter Ltd			
	RECAS	ENEL - Centro diRicerca, Idraulica e Strutturale			
	STREAM	ENEL - Centro diRicerca, Idraulica e Strutturale			
	FLORIS	ETHZ			
	RUPTURE	EDF – Laboratoire National de Hydraulique			
	DAMBRK-UK	Binnie & Partners			
	MIKE 21	DHI			
	JFLOW	Jeremy Benn Associates			
	Hydro2D	Mott MacDonald			
	DIVAST	Cardiff University			
2D	DelftFLS	Delft Hydraulics			
	SMS	USACE, EMRL e FHWA			
	DBK 2	IWHR, China			
	FLOOD 2D	ENEL - Centro diRicerca, Idraulica e Strutturale			
	2D-MB	ETHZ			
	RUBAR 20	Cemagref			
	DYX. 10	Consulting Engineers Reiter Ltd			
	TELEMAC-2D	EDF – Laboratoire National de Hydraulique			

Quadro 8: Resumo de algumas modelagens uni e bidimensionais

Fonte: Adaptado LAURIANO (2009)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se encontra a jusante da barragem de Santa Helena (Figura 28), localizada no município de Camaçari, região metropolitana de Salvador. Em dezembro de 1979 a barragem foi construída no rio Jacuípe com principal finalidade de abastecimento humano e atualmente atende municípios como Salvador, Lauro de Freitas, Simões Filho, Candeias, São Francisco do Conde e Madre de Deus (EMBASA, 2012).



Figura 28: Localização da área e vista aérea da barragem de Santa Helena Fonte: Menezes (2016)

Santa Helena é uma barragem de terra homogênea com dreno vertical de areia, com comprimento do coroamento de 260m; possui duas comportas, tem largura de vertedor igual a 21,5 m e sua defluência máxima do vertedor é de 1.750 m³/s a uma cota máxima de 20m (AMORIM, 2008).

Em 1985 a barragem rompeu (Figura 29) e, segundo consultores especializados, isso ocorreu devido a elevações do nível do rio a jusante do barramento, que superaram as condições previstas em projeto, tendo provocado subpressão na laje do canal sangradouro e consequentemente o seu deslocamento ou destruição (SSRH, 1985 *apud* Menezes, 2016).



Figura 29: Vista da ombreira esquerda da barragem após sua ruptura Fonte: SSRH (1985) *apud* Menezes (2016)

Todo vale a jusante até a foz foi inundado, atingindo os municípios de Arembepe, Barra do Jacuípe e Lagoa Grande, provocando prejuízos ambientais, econômicos e sociais incontáveis. Entretanto, mesmo com vasta área inundada, não foram registradas vítimas fatais e o sistema de alerta e evacuação foi iniciado horas antes do rompimento da barragem por comandos da Marinha, Exército, Aeronáutica e Prefeitura local (A TARDE, 1985).

Imediatamente a jusante da barragem (Figura 30), o vale é caracterizado por conter intensa vegetação de médio e grande portes, e bancos de areia, paisagem que se estende por grande parte da calha do rio. À medida que se aproxima da foz do rio,

em zonas litorâneas, as áreas se tornam mais urbanizadas e populosas, apresentando comércios, quadras, residências etc., e têm o turismo como uma de suas principais atividades financeiras.

Entre 2001 e 2005 a barragem foi reconstruída e voltou a operar como reservatório auxiliar no abastecimento de água para toda região metropolitana de Salvador, inclusive o Pólo Petroquímico de Camaçari (Lima *et al.*, 2010).



Figura 30: Localização do trecho e seções de estudo Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

Foi dado destaque ao rio Jacuípe (cortorno em cor azul) e a três seções transversais que foram avaliadas, em amarelo, à primeira localizada imediatamente a jusante da barragem de Santa Helena, a segunda no povoado de Emboracica e a última no município de Jacuípe. As seções de Emboracica e Jacuípe estão presentes em áreas passíveis a ocupação urbana.

Algumas informações apresentadas por Menezes (2016) em seu trabalho para caracterizar a ruptura da barragem de Santa Helena foram utlizadas nessa pesquisa, são elas:

• Informações técnicas da barragem e do acidente (Quadro 9):

Informações			
Altura da barragem sobre o leito do rio	20,5 m		
Comprimento do coroamento	20,3 m		
Cota do nível máximo operacional	20 m		
Volume do reservatório no nível máximo operacional	241 hm³		
Cota do nível d'água do reservatório no momento da ruptura de 1985	20,03 m		
Largura da parte superior da brecha registrada em 1985	100 m		
Tempo de ruptura registrado para o evento ocorrido em 1985			
Fonte: Adaptado de Menezes (2016)			

Quadro 9: Informações técnicas da barragem de Santa Helena e sobre seu rompimento

• Caracterização geomética da brecha de ruptura da barragem (Figura 31).



Figura 31: Caracterização das larguras de base e superior da brecha Fonte: Menezes, 2016

• Tempo de pico, vazão de pico e volume do reservatório (Quadro 10).

Quadro 10: Valores de variáveis para definição do hidrograma de ruptura da barragem de Santa Helena

Tempo de pico (h)	Vazão de pico (m³/s)	Volume do reservatório (hm³)	Coeficiente de ponderação
0,9	15.156,02	341	0,23

Fonte: Adaptado de Menezes (2016)

• Hidrograma de ruptura

A partir das informações relativas às vazões de pico e tempo de pico determinadas por Menezes (2016), foi criado um hidrograma de ruptura em decaimento parabólico (Figura 32).





Para definição do hidrograma de ruptura da Figura 32, Menezes (2016) comparou o hidrograma triangular simplificado com o hidrograma com decaimento parabólico. Para isso, foram encontradas vazões e tempos de picos por meio de diferentes equacionamentos presentes na literatura. Nas equações de estimativas das vazões de ruptura foi realizado o teste de sensibilidade, segundo a proposta de Wahl (2004). Os valores encontrados pelo hidrograma em decaimento parabólico foram considerados adequados para a presente pesquisa, já que apresentou maior estabilidade na discretização das vazões ao longo do tempo quando comparado aos valores resultantes do hidrograma triangular simplificado, e, além disso, no hidrograma triangular simplificado os valores de cotas e vazões máximas não apresentaram tendência definida.

4.2 MÉTODOS

A metodologia do presente estudo está estruturada em duas grandes etapas: (i) simulação da onda de cheia no vale a jusante da barragem de Santa Helena, no modelo hidrodinâmico bidimensional Hec-Ras 5.0; (ii) geração de mapas de risco contra inundações; (iii) determinação das zonas de inundações com base nos

critérios apresentados pela USBR (1988), pela legislação brasileira e pela consideração de mecanismos físicos que causam a instabilidade no corpo humano. Apresenta-se na Figura 33 o resumo do procedimento metodológico realizado nesse trabalho.



Figura 33: Resumo do procedimento metodológico da pesquisa Fonte: Próprio autor

4.2.1 Simulação da onda de cheia no modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0

a) Coleta e tratamento de dados

Nessa etapa, inicialmente foram levantadas informações acerca do sistema barramento-vale a jusante (brecha, topobatimetria, declividade, coeficiente de Manning, vazões e níveis operacionais), necessárias para simulação numérica da propagação da onda de cheia e análise da planície de inundação.

A topografia do terreno foi fornecida pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – CONDER, em curvas de nível, em formato CAD, na escala de 1:10000.

A batimetria foi disponibilizada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A – EMBASA, por meio de 41 seções transversais da calha do rio, também em escala 1:10000. A Figura 34 apesenta os perfis transversais das seções de Emboracica e da seção de Jacuípe.



Figura 34: Perfis transversais da seção de Emboracica e Jacuípe Fonte: Próprio autor

De posse desses resultados, procedeu-se a elaboração do modelo digital de terreno – MDT, elaborado a partir da união da topografia e batimetria da área, em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) da ESRI, o ArcGis, com referência espacial UTM WGS, zona 24 (Figura 35).



Figura 35: MDT (a) e MDT com delimitação da malha a ser modelada (b) Fonte: Próprio autor

A partir da Figura 35, percebe-se que grande parte da superfície é acidentada, com altitudes elevadas, superiores a 28,36 m ao redor do trecho do rio Jacuípe. Na planície de inundação a superfície é predominantemente plana, principalmente nas áreas urbanas.

A definição do coeficiente de Manning seguiu a proposta de Menezes (2016), com faixas de valores determinados a partir de observações de campo e recomendações da literatura de acordo com o descrito a seguir.

- Canal principal: 0,03-0,065 (quanto maior o coeficiente, a geometria se torna mais sinuosa e a vegetação mais intensa);
- Planície de inundação: 0,1-0,15 (quanto maior, mais urbanizada é a área).

Os valores dos coeficientes de Manning adotados para criação do MDT seguiram os limites apresentadas por Menezes (2016) e foram empregados conforme o Quadro 11.

Planície de inundação com predomínio de áreas urbanas	0,15
Planície de inundação com predomínio de áreas rurais	0,1
Áreas mais sinuosas do canal principal	0,05
Áreas menos sinuosas do canal principal	0,03
Fonte: Próprio autor	

Os dados relativos à caracterização da brecha foram levantados por Menezes (2016) e apresentados na Figura 31 e no Quadro 10.

A partir do Hidrograma proposto por Menezes (2016), constatou-se que o tempo de esvaziamento do reservatório a partir das 22h é muito próximo de zero, e o hidrograma se comportava de forma muito parecida a uma assíntota, e em quase 44h o reservatório se esvazia totalmente.

b) Modelagem em escoamento instável 2D

A modelagem do sistema foi realizada com auxílio do software gratuito HEC-RAS 5.0 (Hydrologic Engineering Center River Analysis System), para a simulação matemática da propagação de ondas de cheias.

Nesta pesquisa, a avaliação do comportamento da onda de cheia na planície de inundação é de grande importância, pois, através de uma modelagem detalhada foi possível à obtenção dos valores dos parâmetros de profundidade e velocidade (hxv) na planície de inundação.

O modelo HEC-RAS 5.0 lançado em 2016 executa a modelagem em escoamento instáveis 1D e 2D separadamente ou combinados. Ele é um modelo gratuito, livremente disponível e auxilia estudos de gestão hídrica, especialmente os associados a riscos de inundações.

Na criação da geometria para o HEC-RAS 5.0 é requerida a definição de uma malha 2D a ser modelada, gerada a partir de um polígono pelo usuário. A malha englobou toda superfície a jusante da barragem, num domínio que contém 568.305 células, numa média de 20x20 m cada célula, tendo a maior célula uma área de 723,69 m² e a menor uma área de 304,02 m².

O método de cálculo utilizado pelo software HEC-RAS 5.0 na modelagem do sistema são as equações completas de Saint-Venant, mais indicado para situações de ruptura de barragens. Na modelagem, foram requeridos dados de entrada e condições de contorno. Como dados de entrada, foram utilizados o MDT do terreno (Figura 35) e os coeficientes de Manning estabelecidos (Quadro 11).

Se tratando das condições de contorno, o modelo HEC-RAS 5.0 oferece cinco opções ao usuário, são: *flow hydrograph* (hidrograma), *stage hydrograph* (cotagrama), *rating curve* (curva chave), *normal depth* (declividade) e *precipitation* (precipitação). Segundo Brunner (2016), a declividade poderá ser utilizada sempre que o usuário necessitar extrair o escoamento negativo da área 2D, ou seja, ela deverá ser utilizada sempre em locais em que o escoamento deixará o domínio delimitado.

Assim como a declividade, o hidrograma também poderá ser utilizado para extrair água, mas apenas se suas vazões forem negativas, caso contrário essa condição de contorno irá colocar escoamento na área 2D. De forma similar ocorre com o cotagrama (relação de cotas de água num tempo definido). Caso a elevação da superfície da água indicada no cotagrama supere a altura de água na célula, o escoamento entrará; caso seja inferior o escoamento sairá da área 2D. Na curva chave o usuário insere uma relação de níveis d'água de e vazões, e só pode ser utilizada para retirar água da superfície 2D. Por último, a precipitação é utilizada quando há excesso de precipitação na área 2D (BRUNNER, 2016).

Dentre as cinco opções de escolha de condições de contorno que o software oferece, foram adotadas duas nessa pesquisa. A primeira (seção 1 da Figura 30), na posição logo a jusante da barragem de Santa Helena, a condição de contorno inserida foi o hidrograma de ruptura da barragem em decaimento parabólico (proposto por Menezes (2016)); já a segunda (seção 2), na foz do rio Jacuípe, a declividade foi adotada como condição de contorno, com valor igual a 0,00018m/m (valor também adotado por Menezes (2016)).

A modelagem do sistema consistiu em simular a propagação da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem de Santa Helena. A simulação desse cenário ocorreu em um tempo total de 16h 45min 32s, a partir do dia 09 de maio de 1985.

O cálculo computacional do sistema considerado foi em escoamento não permanente, através da resolução das equações completas de conservação de massa e momento, num intervalo computacional de 20 s, para satisfazer a condição CFL (Courant - Friedrichs – Lewy).

O método utilizado nessa pesquisa para garantir maior estabilidade e precisão numérica na simulação numérica foi orientado por Brunner (2016). Brunner (2016) recomenda intervalos de tempos pequenos (menores que 60s) para cálculos computacionais com processamentos numéricos em situações de ruptura de barragens, por não levar em consideração acelerações locais e convectivas.

O método aplicado para definição do intervalo de tempo computacional foi a condição CFL (Courant - Friedrichs – Lewy). O CFL é um parâmetro numérico que representa a relação entre o tamanho da malha, o intervalo de tempo computacional e a velocidade de entrada do fluido garantindo estabilidade e precisão do cálculo na posição analisada do domínio.

A condição CFL é satisfeita sempre que for menor que 1, ou seja:

 $(CFL < 1) \rightarrow Co < 1 \ \forall \ \vec{r} \in domínio$

Onde \vec{r} é o vetor posição e *Co* é o número de Courant.

O número de Courant representa o escoamento advectivo em cada volume finito da malha, sendo que para equações hidrodinâmicas ele é definido como:

$$Co = \frac{v\Delta t}{\Delta x} \tag{17}$$

Em que v é a velocidade da onda na posição analisada (m/s); Δt é o intervalo de tempo computacional (s) e Δx o tamanho médio da célula - largura (m).

4.2.2 Teste da influência do coeficiente de Manning

Com a finalidade de analisar a influência do coeficiente de Manning nos resultados (velocidade e altura de escoamento) da simulação da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura da barragem de Santa Helena, foram provocadas variações no valor do coeficiente de Manning adotado no Quadro 11 e averiguada sua influência. Não houve nenhum critério específico para estabelecimento dos valores adotados.

A análise de sensibilidade foi realizada para o cenário de simulação de ruptura da barragem de Santa Helena, com valores máximos de escoamento (todas as condições iniciais e de contorno foram mantidas, assim como, o intervalo

computacional e o tamanho médio das células na área 2D). O Quadro 12 apresenta os valores dos Coeficientes de Manning utilizados para o teste.

Simulação		Teste 1	Teste 2	Teste 3
	Leito do rio	0,05	0,03	0,01
Coeficiente de Manning (II)	Área rural	0,1	0,1	0,1
Manning (µ)	Área urbana	0,15	0,15	0,15
Fonte: Próprio autor				

Quadro 12: Coeficientes de Manning utilizados para teste de influência

Embora os valores dos coeficientes de Manning variem de acordo com inúmeros fatores, tais como forma do canal, presença de vegetação, presença de irregularidades, influência de obstruções e material constituinte, nessa pesquisa optou-se por adotar os valores do Quadro 12 por representarem valores de referência, mínimo e máximo presentes na literatura consultada.

Depois da simulação de cada teste foram coletadas informações de 20 pontos em posições distintas da planície de inundação no trecho de estudo. Segue na Figura 36, um recorte da planície de inundação com a amostra dos 20 pontos em que foram analisadas as variáveis hidráulicas de velocidades e alturas de escoamento máximas para o teste de sensibilidade.



Planície inundada Localização dos pontos utilizados P



Os valores de alturas e velocidades de escoamento do teste 1, obtidos com a simulação da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura da barragem, foram comparados aos valores de alturas e velocidades de escoamento dos testes 2 e 3, para cada ponto analisado na Figura 36, por meio de quadros e gráficos de dispersão.

Afim de avaliar a influência da variação dos coeficientes de Manning na definição das zonas de risco na planície de inundação, considerando os critérios de instabilidade de corpo humano, foram comparados zoneamentos de risco considerando a ocorrência de deslizamento para um adulto, segundo os coeficientes de Manning orientados pelo teste 1 (mínimo) e pelo teste 3 (máximo) do Quadro 12. A equação de instabilidade de corpo humano para o deslizamento utilizada nessa etapa foi a de Jonkman e Penning-Rowsell (2008), por ser uma equação

relativamente simples e que forneceu resultados satisfatórios, quando comparada às demais equações de instabilidade de corpo humano por deslizamento tratadas nessa pesquisa.

4.2.3 Geração de mapas de inundações para diferentes zoneamentos de risco

Como já descrito, o mapeamento de riscos de inundações torna-se essencial, pois, com o conhecimento das áreas passíveis de serem atingidas, é possível a execução de alternativas que minimizem os prejuízos oriundos do desastre associadas às ações da defesa civil, a definição de rotas de evacuação etc., ou ainda, como forma de prevenção, com a definição de sistemas de alertas adequados nessas áreas, contribuindo na gestão do risco e nos Planos de Emergência.

Nessa pesquisa, foram desenvolvidos mapas de inundações zoneados por diferentes abordagens para o cenário de escoamento máximo na planície de inundação, buscando apresentar zonas de risco de inundações decorrentes da ruptura da barragem de Santa Helena, são:

- A USBR (1988);
- A legislação brasileira;
- A consideração de mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano.

O zoneamento orientado pela USBR (1988) seguiu a classificação do risco para adultos, em baixo, alto risco e a zona de julgamento conforme os limiares apresentados na Figura 9. O zoneamento estabelecido com base na legislação brasileira teve como base a ZAS E ZSS elaboradas a partir da barragem de Santa Helena, e por fim, para definição das zonas de risco que consideravam os mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano foram utilizadas equações de instabilidade por deslizamento e por tombamento, apresentadas por Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013), Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.* (2015).

As equações de instabilidades de corpos humanos propostas por Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013), Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.* (2015) foram encontradas por meio de revisões de literatura. Os autores Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013), Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.*

(2015) foram os únicos encontrados até o presente momento que descreveram esses mecanismos quantitativamente, relacionando-os a variáveis hidráulicas.

Para melhor ajustar as equações de instabilidade de corpos humanos aos dados experimentais, Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013), Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.* (2015) incluíram diferentes parâmetros e critérios à suas formulações. Dessa forma, nesse trabalho foram utilizadas todas as equações propostas por esses autores (quatro equações de instabilidade de corpo por tombamento e três equações de deslizamento), a fim de avaliar a sensibilidade das zonas de risco e a influência de parâmetros hidráulicos na definição das zonas para um adulto. O Quadro 13 traz as características relativas aos seus atributos físicos do corpo humano adulto adotado em todas as análises dessa pesquisa:

Massa (kg)	60,0
Altura (Y)	1,71
Largura média do corpo - D (m)	0,26
Diâmetro da perna - d (m)	0,13
Fonte: Próprio autor	

Quadro 13:	Parâmetros	de atributos	físicos	assumidos	para	a um	adulto

Depois de identificadas, às equações de instabilidade de corpo humano foram relacionadas aos resultados de velocidades e alturas de escoamento decorrentes da simulação matemática da propagação da onda de cheia, para a determinação de valores de limites de instabilidade de corpos humanos em inundações.

De posse dos valores de limites de instabilidade para o deslizamento e para o tombamento do ser humano, foram delimitadas zonas de risco na planície de inundação, indicando as possíveis áreas que o sujeito estava passível a deslizar e tombar. Todas as zonas de risco foram elaboradas por meio de relações entre a altura e velocidade de escoamento máximas nas diferentes posições da área inundada, ou seja, os diferentes zoneamentos de risco foram gerados para o cenário mais crítico do escoamento da onda de cheia.

4.2.4 Avaliação dos resultados de zoneamentos de risco

A avaliação dos resultados ocorreu após definidos todos os zoneamentos de risco na planície inundada, segundo critérios da USBR, 1988; legislação brasileira e com a consideração de mecanismos físicos de instabilidade de corpo. Para isso, foram comparados os diferentes zoneamentos de risco e analisados os resultados da área inundada, da extensão dos diferentes zoneamentos e da ocorrência do deslizamento e tombamento em cada mapeamento.

Embora existam inúmeras incertezas associadas ao estudo de rupturas de barragens, aos mecanismos físicos de instabilidade de corpos humanos e a definição das zonas de risco, esse trabalho visa fornecer uma visão geral de todo processo, de maneira a contribuir para uma maior compreensão sobre as temáticas, não comprometendo assim, o alcance dos objetivos propostos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SIMULAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA DA BARRAGEM

Simulado o processo de propagação da onda de cheia decorrente da ruptura da barragem de Santa Helena, foi obtida a planície inundada apresentada na Figura 37, para resultados de altura (a) e velocidade de escoamentos máximos (b).



Figura 37 (a): Resultados de velocidade de escoamento máximos da simulação da onda de ruptura da barragem de Santa Helena Fonte: Próprio autor



Figura 37 (b): Resultados de altura de escoamento máximos da simulação da onda de ruptura da barragem de Santa Helena Fonte: Próprio autor

Como esperado, observa-se que as maiores alturas e velocidades de escoamento ocorreram no leito do rio. Os limites de alturas de escoamento máximas na área mais urbanizada (litoral) ficam em torno de 0,80 m e 5,40 m, numa média de 1,40 m na maior parte da área. Os limites de velocidades máximas variam aproximadamente entre 0,20 m/s e 1,20 m/s, numa média de 0,60 m/s.

O intervalo de tempo computacional igual a 5 s e a malha de 20 m foi definida de modo que a condição de Courant fosse satisfeita. Em praticamente todo o domínio da malha isso ocorreu, exceto em células muito próximas da barragem, em decorrência das grandes velocidades de propagação da cheia.

Com finalidade de analisar algumas características da propagação da onda de ruptura da barragem, foram analisados alguns resultados da simulação referente a variáveis hidráulicas relativas a três seções (a primeira logo à jusante da barragem de Santa Helena, a segunda seção no povoado de Emboracica e a terceira seção na área urbana do município de Jacuípe).

O Quadro 14 apresenta os resultados da simulação da propagação de onda relativos a velocidades máximas de escoamento, cotas máximas de escoamento e produtos críticos das seções representadas na Figura 33. As Figuras 38 e 39 representam o as velocidades e altura de escoamento da seção de Jacuípe em função do tempo.

Velocidade de escoamento (m/s)					
Seção 1	Seção de Emboracica	Seção 2			
9,40	5,84	2,16			
	Altura de escoamento (m)				
Seção 1	eção 1 Seção de Emboracica				
27,39	16,75	4,4			
H.V (m²/s)					
Seção 1	Seção de Emboracica	Seção 2			
257,46	97,82	9,50			

Quadro 14: Resultados de velocidades e cotas máximas nas três seções de análises

Fonte: Próprio autor



Figura 38: Comportamento da altura de escoamento durante a propagação da onda de cheia na seção de Jacuípe Fonte: Próprio autor



Figura 39: Comportamento da velocidade de escoamento durante a propagação da onda de cheia na seção de Jacuípe Fonte: Próprio autor

Em cerca de 57% do tempo simulado para este cenário de máximos, as alturas de escoamento ficaram acima de 2 m de altura, com velocidades acima de 0,21 m/s, oferecendo risco à população, quando levado em consideração os critérios de classificação de risco e estimativas de dados da Tabela 1 e Quadro 3.

5.2 TESTE DE SENSIBILIDADE DO COEFICIENTE DE MANNING

Com auxílio do software HEC-RAS 5.0 foram realizadas simulações de três testes de propagação da onda de cheia para a ruptura hipotética da barragem de Santa Helena para três coeficientes de Manning diferentes (tendo o teste 1 como referência), a fim de avaliar sua sensibilidade na simulação.

Os resultados na simulação são apresentados nas Figuras 40 e 41.



Figura 40: Velocidades máximas de escoamento atingidas para os pontos analisados Fonte: Próprio autor

Verifica-se que a velocidade de escoamento máxima para os diferentes pontos da amostra em cada teste simulado possuem uma variação significativa, ou seja, as mudanças dos coeficientes de Manning influenciaram nos resultados de velocidades de escoamento. No teste com maior coeficiente de Manning no leito do rio (teste 1), foram registradas as menores velocidades de escoamento, e no teste com menor coeficiente de Manning (teste 3) foram observadas as maiores velocidades de escoamento.

Em 6 dos 20 pontos analisados a velocidade de escoamento do teste 2 superou o teste 1 com velocidades acima ou iguais a 0,5 m/s. No ponto P6 essa velocidade chegou a ser 2,978 m/s maior que no teste 1.

Quando comparado os resultados do teste 3 aos do teste 1 (referência), percebeuse que que dos 20 pontos analisados, 11 apresentaram velocidades superiores que 0,5 m/s e 4 pontos apresentaram velocidades superiores a 2,0 m/s. No P6 a velocidade teve um acréscimo de aproximadamente 4,13 m/s em relação ao teste 1.



Figura 41: Alturas máximas de escoamento atingidas para os pontos analisados Fonte: Próprio autor

Observa-se pela Figura 41 que os resultados de alturas máximas de escoamento apresentam variações inferiores quando comparadas as variações de velocidade de escoamento, mas ainda sim, não menos importantes para estudos de zoneamento de risco de inundações decorrentes de propagação de cheias de rupturas de barragens.

O teste 1 apresentou em alturas de escoamento superiores as do teste 2 em 17 pontos, sendo que em 4 pontos as alturas superaram 1 m de água. Os resultados do teste 3 apresentaram 18 pontos com alturas de escoamento inferiores ao do teste 1, e desses 18 pontos, 10 pontos também apresentaram alturas de escoamento inferiores que 1 m de água. No ponto P8 a altura reduziu aproximadamente 2,8 m em relação a do teste 1.

As Figuras 42 e 43 apresentam a definição de zonas de risco considerando a instabilidade de corpo humano por deslizamento para um adulto, orientados pela utilização dos coeficientes de Manning do teste 1 e do teste 3 respectivamente.



Figura 42: Zoneamentos de risco para deslizamento segundo o teste 1 Fonte: Próprio autor



Figura 43: Zoneamentos de risco para deslizamento segundo o teste 3 Fonte: Próprio autor

Através das áreas das Figuras 42 e 43 contata-se que o coeficiente de Manning exerce grande influência no zoneamento de risco para ocorrência de deslizamento por adultos. O aumento do coeficiente de Manning reduziu as áreas de risco ao deslizamento. Os resultados das velocidades de escoamento do teste 3 foram superiores aos resultados de velocidade de escoamento do teste 1, gerando assim, produtos hxv^2 maiores que o do teste 1 na planície de inundação (Figura 43), e consequentemente, maiores áreas de risco do ser humano deslizar.

5.3 GERAÇÃO DE MAPAS DE INUNDAÇÕES ZONEADOS COM DIFERENTES CRITÉRIOS

Os resultados das diferentes propostas de zoneamentos de risco desenvolvidos nesse trabalho, USBR (1988), legislação brasileira - Lei 12.334/2010 e PAE, e zonas que levam em consideração os mecanismos físicos que causam a instabilidade humana em inundações são apresentadas a seguir.

• USBR (1988):

Os primeiros mapas de inundações criados foram elaborados com base nos critérios de zoneamento da USBR (1988), que classificam as zonas em baixo risco, alto risco e zonas de julgamento, por meio de valores de velocidades e alturas de lâminas d'água. A Figura 44 representa o zoneamento de risco para adultos e a Figura 45 o zoneamento de risco para crianças.



Figura 44: Mapeamento de risco considerando proposta da USBR (1988) para adultos Fonte: Próprio autor



Figura 45: Mapeamento de risco considerando proposta da USBR (1988) para crianças Fonte: Próprio autor

Um mapeamento mais simplificado com a classificação da USBR (1988) para os mesmos mapas é apresentado na Figura 46.



Figura 46: Mapeamento simplificado de zonas de risco considerando proposta da USBR (1988) para adultos Fonte: Próprio autor

Tais mapas relacionam produtos críticos para adultos e crianças segundo métodos já descritos pelos autores. Observa-se que, em ambos os mapas, as zonas de alto risco predominam (41,22 km² de área inundada), mas como já esperado, as zonas de alto risco para crianças são maiores que para adultos. Isso se deve a inúmeras características, como atributos físicos do corpo (peso, altura), estado emocional frente a situações adversas, o indivíduo saber nadar, experiências vividas etc.

Na Figura 46 são perceptíveis às áreas em tons de rosa, correspondentes às zonas de julgamento (7,14 km²). O nível de risco associado a essas zonas é determinado a partir de decisões do engenheiro responsável, podendo assim haver conflitos de interesses, infringências de alguns critérios e, em situações de emergência, e julgamentos inadequados.

As manchas de inundações abrangem grandes áreas dos municípios, inundando muitos espaços urbanos (principalmente nas áreas litorâneas) e associados a altos riscos de vida.

Produtos críticos a partir de 0,3 m²/s em adultos já provocam instabilidade e podem ser considerados de alto risco, caso o engenheiro julgue necessário (visto que essa zona é maior quando comparado ao mapeamento para crianças e necessita de atenção, pois se trata da vida humana).

O Art. 2º da Lei Nº8.069 de 1990, que dispõe sobre o Estatuto da Criança e do adolescente, declara que até os 12 anos de idade um indivíduo ainda é considerando criança e seus atributos físicos do corpo variam consideravelmente nessa fase da vida, independente do gênero. Tal afirmação é confirmada numa pesquisa do IBGE sobre estimativas populacionais de grupos amostrais considerando medianas de idade, sexo, altura e peso para o estado da Bahia no período 2008-2009 (Tabela 2, em anexo).

Dessa forma, percebe-se que a classificação das zonas de risco segundo a USBR (1988), tanto para adultos quanto para crianças, estabelece limites de risco que podem orientar atitudes e medidas associadas à prevenção de desastres decorrentes de ruptura de barragens e minimização de seus impactos. Mas, tais limites não levam em consideração outros fatores importantes que causam risco ao ser humano, como os mecanismos que causam a perda de sua estabilidade do corpo. Além disso, a zona de julgamento é uma área difícil de estimar o risco, porque depende do julgamento do engenheiro responsável no momento, não sendo assim uma zona "segura".

• Zoneamento segundo as legislações brasileiras (Lei 12.334/2010):

A legislação brasileira orienta que no mapeamento de inundações decorrentes de ruptura de barragens devem ser diferenciado as ZAS e ZSS, para melhor gestão no momento do desastre.

Segue o zoneamento de risco indicando as ZAS e ZSS (Figura 47).



Figura 47: Mapeamento de risco considerando critérios da legislação brasileira Fonte: Próprio autor
Nesse mapeamento de risco é apresentada a zona de autossalvamento (ZAS), referente a uma distância de 10 km a jusante do pé da barragem. Na região contida no interior dessa circunferência a Defesa Civil nem adentra, sendo de responsabilidade do empreendedor da barragem. Além dessa área, nas ZSS, o nível de risco deve ser realizado considerando os impactos à população e ao meio ambiente das áreas atingidas, cabendo assim estudos mais aprofundados das funcionalidades de cada espaço urbano dos municípios atingidos.

Quando comparado com zoneamentos de risco da USBR (1988), percebe-se que na área que abrange as ZAS a legislação brasileira é mais a favor da segurança, classificando como zonas mais perigosas toda área compreendida pelas ZAS, enquanto que, segundo a USBR, nessa mesma área referente às ZAS, tem extensões de baixo risco e julgamento. O conhecimento dessas informações pode contribuir na definição de rotas de evacuações e abrigo para os indivíduos nas ZAS. Da mesma forma, existem áreas classificadas como de alto risco associado nas ZSS, cabendo assim a defesa civil atuar com mais atenção e cuidado nesses espaços.

 Zoneamento considerando mecanismos físicos de instabilidade do corpo humano:

O terceiro e último critério de zoneamento utilizado nessa pesquisa se refere à consideração de mecanismos físicos que causam a instabilidade do corpo humano na definição de zonas de risco. Foram aplicadas formulações de instabilidade por deslizamento e tombamento do corpo, descritas por quatro autores, são eles: Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013), Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.* (2015).

Jonkman e Penning-Rowsell (2008)

Os mecanismos físicos de instabilidade por deslizamento e momento foram descritos por relações de velocidade e alturas de lâminas d'água. A relação hxv^2 representou a instabilidade por atrito e hv a instabilidade por momento. Para essa pesquisa, a gravidade local foi definida como 9,81m/s², a massa específica do fluido

como 1000 kg/m³, o coeficiente de arrasto do escoamento foi igual a 1,1 e a inclinação do corpo em relação ao solo de 75º. Os resultados da simulação zoneados segundo os critérios de Jonkman e Penning-Rowsell (2008) são apresentados na Figura 48 e 49.



Figura 48: Mapeamento de risco considerando limites de instabilidade para adulto segundo Jonkman e Penning-Rowsell (2008) Fonte: Próprio autor



Figura 49: Mapeamento de risco considerando limites de instabilidade para adulto segundo Jonkman e Penning-Rowsell (2008) Fonte: Próprio autor

Observa-se na figura que quanto mais vermelha for à área, mais instável o indivíduo se encontra, podendo ser carregado pela inundação.

Segundo formulações desenvolvidas por Jonkman e Penning-Rowsell (2008), o corpo vai sofrer tombamento quando o produto crítico for igual a 1,34 m²/s, e vai deslizar quando o valor de hxv^2 igual a 0,61 m³/s².

Tais mecanismos físicos podem contribuir na tomada de decisão dos engenheiros responsáveis, pois na medida em que um corpo está instável, já possui risco associado e esse nível de risco se torna melhor avaliado, prevendo o comportamento da instabilidade.

Com base nas Figuras 48 e 46, percebe-se que em uma grande extensão de zonas consideradas de julgamento para USBR (cor azul escuro) os indivíduos podem deslizar, e, além disso, as zonas de risco classificadas como de julgamento e alto

riso pela USBR (1988) consideram também as áreas em que o individuo pode deslizar em maior parte do mapeamento, sendo assim, mais a favor da segurança quando comparadas.

Rotava et al. (2013):

Diferentemente de Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Rotava *et al.* (2013) incluíram o empuxo no equilíbrio de forças e momentos para definir a instabilidade por atrito, e, ao considerar essa força, que tem como principal efeito empurrar o corpo para cima, a relação hxv^2 foi reduzida. A curva da Figura 50 relaciona valores de profundidade de água com seus respectivos hxv^2 e a Figura 51 apresenta o resultado do zoneamento de risco para instabilidade do corpo para deslizamento. O corpo foi considerado com massa específica constante e igual a 1.000 kg/m³, a massa específica do fluido também teve valor igual a 1.000 kg/m³, e o coeficiente de arrasto do fluido com valor igual a 1,1.



Figura 50: Relações de hxv² para diferentes profundidades de água Fonte: Próprio autor



Figura 51: Zoneamento de risco para instabilidade por deslizamento para adultos segundo Rotava *et al.* (2013) Fonte: Próprio autor

Através da curva apresentada na Figura 50, observa-se que quanto maior for à profundidade da água, a relação hxv^2 é reduzida. Caso sejam considerados corpos com atributos físicos inferiores ao dessa pesquisa, os valores de hxv^2 provavelmente serão ainda menores.

Os valores de hxv^2 que já causam risco de deslizamento de um corpo de 60 kg ficam em torno de 0,51 m³/s² para uma profundidade de 0,3 m e de 0,07 m³/s² para uma profundidade de 1,5 m.

Por meio na análise do zoneamento de risco da Figura 51, percebe-se que os critérios de instabilidade para deslizamento de Rotava *et al.* (2013) são a favor da segurança quando comparado aos critérios de zoneamentos anteriores por deixar os corpos mais "leves".

Xia et al. (2014):

A proposta de análise dos mecanismos físicos realizadas por esses autores foi mais complexa que os anteriores. De forma similar, tanto a instabilidade por tombamento quanto ao deslizamento são feitas também por equilíbrios de forças e momentos, mas são considerados diversos parâmetros relacionados aos atributos físicos do corpo e sua a vestimenta na área molhada.

Nessa pesquisa, os parâmetros α e β presentes nas equações representam coeficientes empíricos calibrados no laboratório de Pesquisa de sedimentos da Universidade de Wuhan, na China, relativos ao tipo de corpo considerado no Quadro 13, a força de atrito e a força de arrasto. Para a situação que o corpo esteja susceptível a deslizar, α e β são iguais a 7,975 $m^{0.5}s^{-1}$, 0,018, e para condições em que o corpo tombe, iguais a 3,472 $m^{0.5}s^{-1}$ e 0,188.

Os valores de a1, b1, a2 e b2 também presentes nos equacionamentos das instabilidades por momento e deslizamento, referentes aos atributos físicos do corpo humano foram iguais a 0,633; 0,367; 1,015. $10^{-3}m^3kg^{-1}e - 4,927. 10^{-3}m^3$, respectivamente para ambos mecanismos de instabilidade..

No Figura 52 é apresentada as curvas que relacionam valores de velocidades e profundidades de água suficientes para que o corpo deslize e tombe.



Figura 52: Relações de hxv para instabilidade por deslizamento e tombamento Fonte: Próprio autor

O zoneamento de risco segundo critérios de instabilidade propostos por Xia *et al.* (2014) é retratado da Figura 53.



Figura 53: Zoneamento de risco para deslizamento e tombamento segundo Xia *et al.* (2014) Fonte: Próprio autor

Com base no número de Froude (Fr) calculado a partir da Figura 52, a instabilidade por deslizamento se inicia em regimes de escoamento supercríticos com altura de até 0,3 m, em que apresentam maior velocidade e menor profundidade de água. A partir de 0,3 m o regime de escoamento subcrítico predomina. A instabilidade por tombamento foi registrada em regimes de escoamento subcrítico para todo período analisado, em que a velocidade de escoamento é menor e a profundidade de água é maior, havendo assim, maior probabilidade de o corpo tombar.

Por meio da Figura 53, nota-se que as zonas de risco em que o indivíduo pode deslizar abrange maior área, quando comparada as zonas de instabilidade por atrito estabelecidas por Rotava *et al.* (2013) (cerca de 5,73 km² a mais). Isso pode ser consequência da influência dos diversos parâmetros considerados em sua análise,

que contribuem para a redução do produto crítico, como a força de empuxo, coeficiente de Manning, atributos físicos do corpo etc.

Na maior parte da área inundada o indivíduo está susceptível a deslizar ou a tombar, podendo assim ser o método de classificação de risco mais a favor da segurança, quando comparadas com a USBR (1988), Jonkman e Penning-Rowsell (2008), Xia *et al.* (2014), e a definição de zonas preconizadas pela legislação brasileira.

Milanesi et al. (2015):

A proposta desenvolvida por Milanesi *et al.* (2015) para analisar mecanismos de instabilidade de corpo humano foi estabelecida por meio da análise de inúmeros parâmetros, o que acarretou numa maior complexidade na solução.

Na análise de equilíbrio de momentos e forças, para satisfazer as condições de instabilidade por deslizamento e tombamento, foi considerada a inclinação do corpo com a superfície, a inclinação da superfície em relação a um eixo na direção horizontal, foram analisados diferentes centros de gravidade (para todo volume do corpo e para o volume do corpo submerso), além da consideração da força de empuxo e de diferentes diâmetros que representavam partes do corpo

Foi adotado o diâmetro de cada perna igual a 0,13 m, o ângulo referente à inclinação do corpo com a superfície igual a $\pi/2$, o ângulo da superfície em relação a um eixo horizontal igual a 0º.

Seguem nas Figuras 54 e 55 as diferentes relações de hxv que satisfizeram as condições de instabilidade por tombamento e deslizamento estabelecidas.



Figura 54: Relações de hxv para que sofra instabilidade por deslizamento segundo Milanesi *et al.* (2015) Fonte: Próprio autor





Os Fr calculados a partir das Figuras 54 e 55 para os diferentes mecanismos de instabilidade de corpo humano indicam que o corpo sujeito a altas velocidades de escoamento em profundidades menores (Fr>1) vai tender a deslizar para toda altura de escoamento resultante, diferente do tombamento, que ocorre geralmente em altas profundidades e à baixa velocidade (Fr<1), sendo identificado com maior frequência a partir de uma altura de lâmina d'água de 1 m. Nota-se que as curvas

produzidas são essencialmente decrescentes e foram produzidas de acordo com resultados que satisfizeram as condições de instabilidade proposto para cada mecanismo físico, o que confirma as informações disponibilizadas na literatura, acerca de velocidades e profundidades suficientes para fazer o corpo tombar ou deslizar em determinados regimes de escoamento. A velocidade máxima de escoamento tende a zero à medida que as profundidades ficam muito altas. Na análise da Figura 54, mais uma vez, percebe-se que o corpo sujeito a altas velocidades de escoamento (Figura 55), mecanismo que ocorre geralmente em altas profundidades associados à baixa velocidade. O zoneamento considerando esses mecanismos físicos são apresentados na Figura 56.



Figura 56: Zoneamento de risco para tombamento e deslizamento segundo Milanesi *et al.* (2015) Fonte: Próprio autor

Na comparação desses zoneamentos, observa-se que a força de empuxo atuante no corpo contribuiu para maiores área de risco a instabilidade por deslizamento e que as zoas de risco de instabilidade para tombamento ficaram menores. Isso provavelmente ocorreu pela consideração do ângulo entre a pessoa e a superfície nas equações, que se refere à capacidade do corpo se adaptar ao escoamento e tentar se permanecer em pé, reduzindo o risco.

Por fim, quando comparadas as Figuras 48, 49, 51 e 53 e 56 ao mapeamento de risco elaborado com critérios propostos pela USBR (1988) apresentado na Figura 46, percebe-se que as relações de velocidade e profundidade classificadas em baixo, alto risco e zona de julgamento ainda que não considerem a análise de mecanismos físicos do corpo que causam sua instabilidade, pode ser um método satisfatório. Mas, a inclusão da análise de mecanismos físicos de instabilidade de corpo pode contribuir fortemente na prevenção e minimização dos impactos e vítimas, por fornecer um estudo mais detalhado, que oriente o gestor de risco e a defesa civil principalmente nas áreas classificadas como de julgamento, na qual na maioria dos casos o corpo correu risco de deslizar e tombar.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O enfoque desse trabalho foi analisar a influência dos mecanismos físicos que causam a instabilidade de corpos em inundações, decorrentes de rupturas de barragens, por meio de diferentes zoneamentos de risco. Os resultados aqui apresentados confirmaram que a consideração da instabilidade por tombamento e deslizamento, na definição das zonas de risco, contribui para gestão do risco, na minimização dos impactos e prevenção de catástrofes.

Visto que a Lei 12.334/10 instrumentaliza o Plano de Segurança de barragens, onde deve estar contido o PAE, e por consequência, um mapeamento de risco zoneado satisfatório, a consideração dos diferentes riscos ao ser humano numa inundação, inclusive a perda do equilíbrio humano, pode garantir maior segurança à vida da população.

Os dois principais mecanismos físicos que causam a instabilidade humana são o tombamento e o deslizamento. Suas análises se tornaram possíveis devido à existência de formulações matemáticas presentes na literatura, desenvolvidas por diversos autores através de diferentes critérios e métodos.

Após a simulação hipotética da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura da barragem de Santa Helena, no modelo hidrodinâmico bidimensional HEC-RAS 5.0, foi constatada uma grande mancha de inundação no vale a jusante do barramento, que caso fosse zoneada levando em consideração apenas os critérios técnicos recomendados pela Lei 12.334/2010 ou a USBR (1988), como variáveis hidráulicas (velocidade e profundidade d'água), aspectos socioeconômicos ou ZAS e ZSS, podem colocar em risco a vida de diferentes pessoas, principalmente pelo fato que cada indivíduo possuir atributos físicos (massa, altura, etc.) diferentes, e assim, se comportarem de forma diferente frente a inundações, tombando ou deslizando em diferentes posições.

Quando analisada a influência da rugosidade da superfície durante a simulação do escoamento da água na da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem de Santa Helena, por meio do teste sensibilidade do coeficiente de Manning, notou-se que o coeficiente de Manning tem influência significativa nos resultados das variáveis hidráulicas de velocidades e alturas de escoamento na simulação. Na maior parte dos pontos analisados, quanto maior foi o

valor do coeficiente de Manning adotado na simulação, menor foi à velocidade de escoamento e maior foi à altura de água. Além disso, a variação do coeficiente de Manning também produziu mudanças significativas na definição do zoneamento de risco considerando a instabilidade de corpo humano. Verificou-se que o aumento do coeficiente de Manning utilizado na simulação da onda de cheia reduziu as áreas passíveis ao indivíduo deslizar na planície de inundação. Assim, diante das alterações significativas produzidas pelas variações do coeficiente de Manning nos resultados das variáveis hidráulicas e zoneamento de risco, percebeu-se que a escolha criteriosa e adequada desse parâmetro tem grande importância para o mapeamento de inundações constantes nos PAE's.

Foram comparados quatro métodos quantitativos de instabilidade por deslizamento e tombamento para análise de sensibilidade dos zoneamentos de risco estabelecidos, e contatou-se que dos quatro, as equações que incluíram a força de empuxo e o ângulo entre a pessoa e a superfície (decorrente da sua tentativa de se manter em pé na inundação) foram as que resultaram em maiores extensões de zonas de risco. Além disso, a adoção dos diversos critérios e parâmetros utilizados nas formulações mais complexas como as de Xia *et al.* (2014) e Milanesi *et al.* (2015) não geraram zonas de risco com grandes variações, quando comparadas as mais simplificadas, como as de Jonkman e Penning-Rowsell (2008) e Rotava *et al.* (2013), que incluem basicamente parâmetros de mais fácil obtenção, como massa e altura do corpo, coeficiente de arrasto do escoamento e o coeficiente de Manning, e dessa forma, podem dificultar aplicações mais práticas e ser um fator limitador para elaborações de PAE's.

Os quatro métodos geraram zoneamentos semelhantes para ambos os mecanismos de instabilidade tratados (tombamento e deslizamento), e confirmaram sua capacidade de orientar o zoneamento de risco. Dos quatro, o zoneamento orientado pelas equações de Milanesi *et al.* (2015), é o que pode ser considerado o mais parecido com os outros três, sendo uma espécie de média. O método orientado pelas equações de instabilidade por Jonkman e Penning-Rowsell (2008) foi o que apresentou mais zonas de estabilidade para o corpo, ao contrário das zonas estabelecidas pelos métodos de Rotava *et al.* (2013) e Xia *et al.* (2014), que mostraram mais áreas em que o ser humano pode deslizar ou tombar.

Por meio dos gráficos e análises de zoneamentos de risco, confirmou-se que o tombamento geralmente ocorre em regimes de escoamento subcríticos, com baixa velocidade de escoamento e altas alturas de lâmina d'água, diferentemente do deslizamento, que são mais susceptíveis em regimes de escoamento supercríticos, que apresentam altas velocidades de escoamento e baixas profundidades de água. As zonas de risco decorrentes da classificação da USBR (1988) não apresentaram grandes variações quando comparadas as zonas que consideraram os mecanismos de instabilidade do corpo, mas ainda assim, as aplicações dos critérios que consideram a perda do equilíbrio humano reduzem as incertezas associadas ao risco na zona de julgamento, por meio da especialização de áreas passíveis à ocorrência de deslizamento e tombamento.

Verificou-se ainda que, caso a barragem de Santa Helena venha a falhar novamente e romper, grande parte do município de Jacuípe vai sofrer impactos, e em áreas densamente urbanas em que estão presentes escolas, creches e hospitais, adultos correm grande risco de sofrer instabilidade por deslizamento e tombamento, podendo até ser arrastados. Caso crianças e idosos estejam nessas áreas, o cenário pode ser muito mais crítico devido a suas capacidades limitadas de adaptação ao escoamento e tributos físicos do corpo.

Recomenda-se estudos mais aprofundados com fins de minimização das incertezas associadas à caracterização de brechas de barragens, a propagação de ondas de cheias e as diferentes variáveis que influenciam na perda do equilíbrio humano, para melhor entendimento desses processos.

Conclui-se assim, que o conhecimento de possíveis áreas em que o corpo humano pode vir a tombar ou deslizar, é uma importante informação para conhecimento de gestores de risco e defesa civil, pois, por meio dessa, poderão subsidiar uma melhor gestão de riscos e salvamento.

7 REFERÊNCIAS

ABT, S. R., R. J.; WITTLER, A. Taylor; D. J. LOVE. *Human stability in a high flood hazard zone*. Water Resources. v. 25, n. 4, p. 881-890,1989.

Agência Nacional de águas - ANA. Manual do empreendedor - *Guia de orientação e formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE*, v. 4. Brasília, 70 p., 2015.

Agência Nacional de águas- ANA. *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - Instruções para Apresentação do Plano de Segurança da Barragem*, v. 1. Brasília, 130 p., 2016.

Agência Nacional de Águas – ANA. Minuta – Resolução n ° XXX, de XXX de 2012 Estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência (PAE), conforme art. 8°, 11 e 12 da Lei n° 12.334 de 20 de setembro de 2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Disponível em: <http://audienciapublica.ana.gov.br/arquivos/Aud_37_ANEXO1_NT_024_GESER_21 _12_2012_Resolucao_PAE.pdf >. Acesso em: 05 jul. 2017.

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, p. 107-124, 1999.

ALMEIDA, A.B. Emergências e gestão do risco. 1º Curso de Segurança e Exploração de Barragens, INAG, Lisboa, 1999 apud VISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos risco. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 482p., 2006.

ALEXANDER, D. Modelos de vulnerabilidade social a desastres. Revista Crítica de Ciências Sociais, n. 93, p. 09-29, 2011.

AMORIM, J. L. R. Barragem de Santa Helena, p. 1-73, 2008.

ARRIGHI, C.; OUMERACI, H.; CASTELLI, F.. Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters. Hydrology and Earth System Sciences, v. 21, n. 1, p. 515, 2017.

A TARDE. Santa Helena inunda vale do Jacuípe. Salvador, 10 mai. 1985. p. 2-5. 1985.

BALBI, D. A. F. *Metodologias para elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens, estudo de caso: Barragem de Peti – MG.* Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Pós Graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2008.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. *Fundamentos de engenharia hidráulica*. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 473p., 2010.

BARBOSA, F. A. R. Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB. João Pessoa, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 416 de 03 de setembro de 2012. *Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.* Diário oficial. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2012.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 526 de 09 de dezembro de 2013. Estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), conforme art. 8°, 11 e 12 da Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e art. 8° da Portaria nº 416, de 3 de setembro de 2012. Diário oficial. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2013.

BRASIL. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Portaria nº 4672 de 28 de março de 2013. Estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem de Acumulação de Água e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem de acumulação de água, conforme art. 8°, 10 e 19 da Lei Federal n° 12.334 de 20 de setembro de 2010. Diário oficial. Secretaria do Meio Ambiente, Salvador, 2013.

BRASIL. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Portaria nº 4673 de 28 de março de 2013. Estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança regulares de barragens de acumulação de água, conforme art. 9° da Lei Federal n° 12.334 de 20 de setembro de 2010. Diário oficial. Secretaria do Meio Ambiente, Salvador, 2013.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, 08 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, 21 set. 2010.

BRASIL, L. S. S. Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso: Barragem do Rio de Pedras – MG. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005, 222 p.

BROWN, A. E. P. *Análise de risco.* Boletim Técnico do GSI/NUTAU/USP, Ano III, n. 01, 1998.

BRUNNER, G. W. HEC-RAS *River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0.* Davis, CA: US Army Corps of Engineers, 2016. 171 p. Disponível em: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>. Acesso em: 04 de janeiro de 2018.

CAMPOS, J. N. B. A gestão integrada dos recursos hídricos: uma perspectiva histórica. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, v. 1, n. 1, p. 111-121, 2013.

CASTRO, L. A. *Glossário de Defesa Civil: estudos de riscos e medicina de desastres*. 2.ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento/Departamento de Defesa Civil, 1998.

CESTARI JR., E. Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens - UHE Três irmãos estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013. 224 p.

CHAUDHRY, M.H. Open-channel flow. 2 ed. Springer, 2008.

CHAUHAN, S. S., BOWLES, D. S., ANDERSON, L. R. *Do current breach parameter estimation techniques provide reasonable estimates for use in breach modeling.* Proceedings of the Annual Conference of the Association of State Dam Safety Officials. Phoenix, setembro de 2004, 15 p.

CHIAMULERA, I.; GIBERTONI, R. F. C.; PINHO, J. L.; LIPSKI, B. DARU, R. L.; REIS, A. A. *Aplicação de modelos hidrodinâmicos uni e bidimensional na bacia do Rio Grande-MG*. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-8, 2015.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 1980.

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

Comitê Brasileiro de Segurança de Barragens – CBDB. Comissão Regional de Segurança de Barragens - *Guia Básico de Segurança de Barragens*, São Paulo, SP, NRSP-CBDB, 1999, 77 p.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de

risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7° da Lei n° 12.334 de 20 de setembro de 2010. Disponível em: <www.cnrh.gov.br>. Acesso em: 04 jul. 2017.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. Resolução nº 144 de 10 de julho de 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 em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Disponível em: <www.cnrh.gov.br>. Acesso em: 04 jul. 2017.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. Resolução nº 91 de 02 de abril de 2012. Estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem, conforme art. 8, 10 e 19 da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Disponível em: <www.cnrh.gov.br>. Acesso em: 04 jul. 2017.

CORDERO, A.; SILVA, H. S.; SEVERO, D. L. Análise da capacidade de armazenamento das ondas de cheia pela barragem Norte e suas implicações nas comunidades do Vale do Itajaí (SC). Anais: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, p. 1542-1551, 2000.

COSTA, R. S. S. Riscos socioambientais e ocupação irregular em áreas de enchentes nos bairros: Olarias, Poti Velho, Alto Alegre, São Francisco e Mocambinho-Teresina (PI). Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 175p., 2010.

COSTABILE, P.; MACHIONNE, F.; NATALE, L.; PETACCIA, G. Flood mapping using LIDAR DEM. Limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach. Natural Hazards. v. 77, n. 1, p. 181-204, 2015.

COUTINHO, M. M. Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Pós Graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2015.

DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS. DEFRA. *Engineering guide to emergency planning for UK reservoirs*. London, 2006. Disponível em: http://www.dep.state.pa.us/. Acesso em 03 de abril de 2017.

DRIE V. R.; SIMON M.; SCHYMITZEK, I. *HAZARD: Is there a better definition? And impact of not accounting for buildings.* In: IPWEA Annual Conference NSW. Australia, p. 13, 2013.

Empresa Baiana de Águas e Saneamento – Embasa. Sistema de abastecimento de água de Salvador e RMS: Diretoria de Operação e Expansão, 23 p., 2012.

ENDOH, K.; TAKAHASHI, S. *Numerically modeling personnel danger on a promenade breakwater due to overtopping waves*. In: Coastal Engineering, p. 1016-1029, 1994.

FREITAS, C. M.; XIMENES, E. F. Enchentes e saúde pública: uma questão na literatura científica recente das causas, consequências e respostas para prevenção e mitigação. Cien Saude Colet, v. 17, n. 6, p. 1601-1616, 2012.

FOSTER, D. N.; COX, R. J. *Stability of children on roads used as floodways*. Water Research Laboratory of the University of New South Wales, Manly Vale, Technical Report n.73/13, Australia. 1973.

FOX, R.W; MCDONALD, A.T. *Introdução à mecânica dos fluídos*, Guanabara, p. 393, 1988.

Governo do Estado de Minas Gerais. *Relatório: Avaliação dos efeitos e dobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana – MG*, decreto nº 46.892/2015, 287 p., 2016.

GUIDELINES FOR DAM BREACH ANALYSIS. Department of Natural Resources. Division of water resources, Colorado, 2010. Disponível em:< http://water.state.co.us/DWRIPub/Documents/GuidelinesForDamBreachAnalysis.pd. Acesso em: 03 abril, 2017.

GREGORETTI, C.; MALTAURO, A.; LANZONI, S. Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed. Journal of hydraulic engineering, v. 136, n. 11, p. 868-879, 2010.

HALTAS, I.; ELÇI, S. TAYFUR, G. Numerical Simulation of Flood Wave Propagation in Two-Dimensions in Densely Populated Urban Areas due to Dam Break. Water Resources Management, p. 1-23, 2016.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. *Mapping and risk evaluation of Cachoeira River flodding in some urban areas of Itabuna City, Brazil.* Sociedade & Natureza, v. 21, n. 2, p. 57-75, 2009.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Laudo Técnico Preliminar - Impactos Ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Brasília, 38 p., 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Pesquisa de Orçamentos Familiares – Antropometria e Estado Nutricional de Crianças, adolescentes e adultos no Brasil. Rio de Janeiro, 2010.* Disponível em: < https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45419.pdf>. Acesso em 10 de janeiro de 2018.

International Comission on Large Dams - ICOLD. *Dam break flood analysis: review and recommendations*. Bulletin 111, Paris, 301 p., 1998.

JÓNATAS, R. J. L. *Rotura de barragens de aterro por galgamento: ensaios experimentais com aterros homogéneos.* Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, 2013.

JONKMAN S.N., PENNING-ROWSELL E. *Human instability in flood flows*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), v. 44, n.4, p. 1–11, 2008.

Karvonen, R. A.; Hepojoki, A.; Huhta, H.K.; Louhio, A. *The Use of Physical Models in Dam-Break Analysis.* RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2000.

KREIBICH, H.; PIROTH, K.; SEIFERT, I.; MAIWALD, H.; KUNERT, U.; SCHWARZ, J.; MERZ, B.; THIEKEN, A. H. *Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? Natural Hazards and Earth System. Sciences*, v. 9, p. 1679-1692., 2009 *apud* RIBEIRO N., A.; BATISTA, Larissa F. D. R.; COUTINHO, R. Q. *Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.

KOBIYAMA, M.; Mendonça M.; Moreno D. A. *et al. Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.* Curitiba: Ed. Organic Trading, p.109, 2006.

LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG, 261 p., 2009.

LIMA, G. M. P.; LESSA, G. C.; FRANKLIN, T. S. Avaliação dos impactos da barragem de Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia-Brasil. Quaternay and Enviromental Geosciences, n.2, p. 40-54, 2010.

LIND, N.; HARTFORD, D.; ASSAF, H. *Hydrodynamic models of human stability in a flood.* JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 40, n. 1, p. 89-96, 2004.

MAIA, D. C. Impactos pluviais na área urbana de Ribeirão Preto-SP. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 169 p., 2007.

MATOS, A. J. S.; PIOLTINE, A.; MAUAD, F. F. et al. *Metodologia para a caracterização do coeficiente de Manning variando na seção transversal e ao longo do canal estudo de caso bacia do Alto Sapucaí-MG.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 21-28, 2011.

MEDEIROS, C. H. Segurança de barragens: O que fazer para convergir teoria e prática? In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia. Anais Goiânia: CBDB, 13 p., 2005.

MENEZES, D. S. A. B. Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água: estudo de caso com a barragem de Santa Helena – BA. Dissertação (Mestrado em Águas, Meio Ambiente e Saneamento) - Universidade Federal da Bahia, 158 p., 2016.

MENEZES, D. J. Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, 137 p., 2014.

MILANESI, L.; PILOTTI, M.; RANZI, R. VALERIO, G. Methodologies for hydraulic hazard mapping in alluvial fan areas. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, v. 364, p. 267-272, 2014.

MILANESI, L.; PILOTTI, M.; RANZI, R. *A conceptual model of people's vulnerability to floods*. Water Resources Research, v. 51, n. 1, p. 182-197, 2015.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. V. *Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 152-167, 2016.

MORRIS, M. W.; GALLAND, J. C. *Dambreak Modeling Guidelines and Best Practice. CADAM Project.* Reino Unido, 32 p., 2000.

New South Wales Government. - NSW. Government Department of Infrastructure Planning and Natural Resources, Floodplain Development Manual – The management of flood liable land. Appendix L: Hydraulic and hazard categorisation, 2005.

OFFICE FEDERAL DE L'ECONOMIE DES EAUX. Sécurité des barrages. Principe de l'alarme-eau. Suisse, 1993 apud VISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos risco. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 482p., 2006.

PAIVA, R. C. D.; PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. Revista brasileira de recursos hídricos, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.

PAQUIER, A. Présentation des méthodes de calcul de l'onde de rupture. Sécurité des barrages en service, Cemagref et Engref, Montpellier, May, p. 53-65, 1993 apud VISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos risco. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 482p., 2006.

PATEL, D. P.; RAMIREZ, J. A.; SRIVASTAVA, P. K.; BRAY, M.; HAN, D. Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. Natural Hazards, v. 89, n. 1, p. 93-130, 2017.

PENG, M.; ZHANG, L. M. *Dynamic decision making for dam-break emergency management-Part 1: Theoretical framework.* Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 13, n. 2, p. 425, 2013.

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

PISANIELLO, J. D.; DAM, T. T.; TINGEY-HOLYOAK, J. L. International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries. Journal of Hydrology, v. 531, p. 1141-1153, 2015.

PORTO, R.M. Hidráulica básica. Projeto Reenge, 4ª ed. EESC-USP, 2006.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. *O modelo Muskingum-Cunge-Todini em rios com planície de inundação*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 2 p. 298-309, 2015.

QUIROGA, V. M. KURE, S.; UDO, K.; MANO, A. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. RIBAGUA, Revista Iberoamericana del Agua, 2016.

RIBEIRO N., A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica – hidrodinâmica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 394-203, 2015.

RIBEIRO N., A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. *Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of lpojuca/PE.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.

ROCHA, F., Considerações e orientações para o planeamento de emergência externo das barragens abrangidas pelo regulamento de segurança de barragens. Jornadas Técnicas de Protecção Civil sobre "Planeamento de emergência em barragens", Lisboa, Junho, 2002.

ROTAVA, J.; MENDIONDO, E. M.; SOUZA, V. C. B. Simulação de instabilidade humana em inundações: primeiras considerações. XX. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-8, 2013.

SAMPAIO, J. A. L. As deficiências do plano de ação emergencial das barragens no Brasil. Revista Brasileira de Direito, v. 12, n. 2, p. 7-17, 2016.

SECRETARIA DO SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA - SSRH. *Acidente com a barragem de Santa Helena*. Salvador: LYRA et al. (Junta de consultores), 1985.

SECRETARIA DO SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA - SSRH. Acidente com a barragem de Santa Helena. Salvador: LYRA et al. (Junta de consultores), 1985 apud MENEZES, D. S. A. B. Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água: estudo de caso com a barragem de Santa Helena – BA. Dissertação (Mestrado em Águas, Meio Ambiente e Saneamento) - Universidade Federal da Bahia, 158 p., 2016.

SILVA, T. R. Análises hidrodinâmicas no trecho fluvioestuarino do Rio Paraguaçu, em consequência da operação da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo. Dissertação (Mestrado em Águas, Meio Ambiente e Saneamento) - Universidade Federal da Bahia, 104 p., 2014.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; LUZ, L. D. *Dimensionless formulation for human stability in open flows*. RBRH, n. AHEAD, 2016.

SOARES, L. L.; VIANA, M. R. A luta depois da "catástrofe": mobilização dos atingidos pelo rompimento da Barragem Algodões no Piauí (The fight after the" catastrophe": mobilization of the achievements by the breakdown of the Algodões Dams in the Piauí). Emancipação, v. 17, n. 2, p. 233-245, 2017.

SOLIMAN, M.M. Engenharia hidrológica das regiões áridas e semiáridas. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SOUZA, C. A. Uso do geoprocessamento como subsídio à análise de danos ambientais e urbanos: geração dos mapas de potencial de impacto de inundação em caso de rompimento da UHE Santa Branca Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 99p. 2017.

SYNAVEN, K. The pilot Project Kyrkojarvi dam and reservoir, Seinajoki, Finland. In: INTERNACIONAL SEMINAL AND WORKSJOP RISK ASSESMENT, DAM-BREAK FLOOD ANÁLISIS AND EMERGENCY ACTION PLANNING. Seinajnoki: Finnish Environment Institute, 2000 apud BALBI, D. A. F. Metodologias para elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens, estudo de caso: Barragem de Peti – MG. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Pós Graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2008.

TRENTIN, R.; ROBAINA L. E. S.; SILVEIRA, V. S. Zoneamento do risco de inundação do Rio Vacacai no município de São Gabriel, RS. Geo Uerj, v. 1, n. 24, p. 161-180, 2013.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. Ed. da Universidade, UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

United States Bureau of Reclamation – USBR. *Emergency planning and exercise guidelines*. Volume II: technical handbook, Technical Service Center, Department of the Interior, Denver, USA, 1995 *apud* VISEU, T. *Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos risco*. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 482p., 2006.

United States Bureau of Reclamation – USBR. United States Department of the Interior. *Downstream Hazard Classification Guidelines*. Denver: U.S. Department of the Interior, 1988.

USCOLD. Lessons from dam incidents, USA. Committee on Dam Safety of the United States Committee on Large Dams, New York: American Society of Civil Engineering, 1975 apud ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: A database approach. Georisk, v. 3, n. 3, p. 184-189, 2009.

VISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos risco. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 482 p., 2006.

VISEU, T.; MARTINS, R. *Safety Risks of Small Dams*. In L. Berga (ed.), Dam Safety, v. 1. Rotterdam: Balkema, p. 283-288, 1998.

VISEU, T.; RAMOS, C. Zoneamento Territorial e Critérios para Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos, SEPREM, Madri, 1999.

VOGEL, A. *Bibliography of the history of dam failures*. Risk Assessment International, Vienna, Austria, 1980 *apud* ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: A database approach. Georisk, v. 3, n. 3, p. 184-189, 2009.

XIA, J.; FALCONER, J. A.; WANG, Y.; XIAO, X. *New criterion for the stability of a human body in floodwaters*. Journal of Hydraulic Research, v. 52, n. 1, p. 93-104, 2014.

XIONG, Y. A dam break analysis using HEC-RAS. Journal of Water Resource and Protection, Mississippi, p. 370-379, 2011.

WAHL, T.L. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. Journal of hydraulic engineering: ASCE, 9p., 2004 apud MENEZES, D. S. A. B. Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água: estudo de caso com a barragem de Santa Helena – BA. Dissertação (Mestrado em Águas, Meio Ambiente e Saneamento) - Universidade Federal da Bahia, 2016. 158 p.

WIELAND, M. Safety aspects of sustainable storage dams and earthquake safety of existing dams. Elsevier Science. v. 2, n. 3, p. 325-331, 2016.

WRIGHT, J. M. *Floodplain Management: Principles and Current Practices.* Knoxville: The University of Tennessee, 2008 *apud* RIBEIRO N., A.; BATISTA, Larissa F. D. R.; COUTINHO, R. Q. *Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: A database approach. Georisk, v. 3, n. 3, p. 184-189, 2009.

ZUFFO, M. S. R. *Metodologia para avaliação da segurança de barragens*. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

ANEXOS

Idade e grupos de idade	Dados amostrais		Estimativas populacionais					
	Masculino	Feminino	Masculino			Feminino		
			População	Mediana		População	Mediana	
				Altura	Peso	ropulação	Altura	Peso
Menos de 1 ano	83	71	108 390	68,0	7,9	83 495	68,0	7,5
1 ano	79	83	110 976	80,5	11,1	113 320	81,2	10,7
2 anos	72	73	94 983	92,0	13,5	91 081	90,1	13,0
3 anos	86	81	120 288	99,0	15,0	102 001	99,0	15,0
4 anos	106	93	144 639	106,2	17,3	124 937	104,2	16,8
5 anos	97	72	130 632	112,3	19,3	99 740	112,0	18,9
6 anos	100	78	139 495	117,1	21,2	107 451	119,0	20,9
7 anos	106	85	140 238	125,2	24,0	114 117	122,8	23,4
8 anos	95	117	137 667	128,9	26,0	156 784	127,5	26,8
9 anos	110	96	158 262	133,1	29,4	124 576	134,8	29,9
10 anos	94	88	121 186	139,2	31,7	120 366	140,3	33,0

Tabela 2: Dados amostrais e estimativos populacionais das medianas de altura e peso da população por sexo e idade - Bahia (2008-2009)

Fonte: IBGE (2010)

Autorização para reprodução/divulgação do documento

Autorizo a reprodução total e/ou parcial deste trabalho (por qualquer meio existente ou que venha a ser criado) desde que citada à fonte.

Vieira han White n

Luan Marcos da Silva Vieira E-mail: luan.msv@gmail.com

> 26 de julho de 2018 Salvador – BA