



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESASTRES NATURAIS

Tiago Zanon da Silva

**Aplicação de Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de  
Barragem Integrada a Estimativa do Potencial de Perda de Vidas**

Florianópolis

2024

Tiago Zanon da Silva

**Aplicação de Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragem Integrada a Estimativa do Potencial de Perda de Vidas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Desastres Naturais.

Orientador: Prof. Roberto Fabris Goerl, Dr.

Florianópolis

2024

Silva, Tiago Zanon da

Aplicação de Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragem Integrada a Estimativa do Potencial de Perda de Vidas / Tiago Zanon da Silva ; orientador, Roberto Fabris Goerl, 2024.

223 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Desastres Naturais. 2. HEC-LifeSim. 3. McBreach. 4. Análise de Perda de Vida. 5. Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura . I. Goerl, Roberto Fabris. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais. III. Título.

Tiago Zanon da Silva

**Aplicação de Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragem Integrada a Estimativa do Potencial de Perda de Vidas**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 16 de abril de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Masato Kobiyama  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Desastres Naturais.

---

Prof.(a). Dr(a). Janete Josina de Abreu  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl.  
Orientador

Florianópolis, 2024.

Esta dissertação é dedicada à minha esposa, fonte de amor e inspiração. Sem o seu apoio incondicional, este trabalho não teria sido realizado. À ela, meu eterno amor, gratidão e admiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao universo por todas as experiências e aprendizados ao longo destes anos de estudo. Por todas as oportunidades que me foram dadas, por todos os amigos que encontrei ao longo desta jornada e também por todos os desafios vencidos.

Agradeço ao professor Roberto Fabris Goerl, pela orientação com que conduziu esse mestrado. Obrigado pela confiança, disponibilidade, objetividade e entusiasmo com o tema do trabalho.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais (PPGDN) pelos valiosos ensinamentos.

Agradeço a todos os colegas de mestrado, com os quais compartilhei momentos incríveis e experiências que levarei para a vida.

Agradeço a todos os colegas da Defesa Civil do Estado de Santa Catarina, por terem sido fundamentais nesta jornada de pesquisa e experiência profissional. A colaboração e o apoio oferecidos foram elementos cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha família, não só pelo apoio, amor e fé em mim depositados durante os anos de pesquisa, mas também pelos momentos de compreensão e paciência.

*“Our actions may be impeded...*

*But there can be no impeding our intentions or our dispositions. Because we can accommodate and adapt. The mind adapts and converts to its own purposes the obstacle to our acting.*

*The impeding to action advances action. What stands in the way becomes the way.”*

*(Marcus Aurelius)*

*"If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants."*

*(Sir Isaac Newton)*

## RESUMO

As barragens são estruturas que oferecem inúmeros benefícios, incluindo proteção contra enchentes, abastecimento de água, geração de energia hidrelétrica, irrigação e recreação. Todavia, estas estruturas criam também um risco potencial para pessoas e propriedades em caso de ocorrência de falhas, levando a uma liberação descontrolada da água reservada. Os efeitos potenciais desses acidentes precisam ser mensurados para que se possam estabelecer os impactos associados e as ações de preparação cabíveis, particularmente para os habitantes a jusante que seriam afetados. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a estimativa de perda de vida associada ao rompimento hipotético de uma barragem, empregando uma metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura, com vistas a avaliar a efetividade da preparação para o evento. A estrutura de estudo, a Barragem Sul, fica localizada na cidade de Ituporanga, na região do Vale do Itajaí no estado de Santa Catarina. A seleção da premissa de ruptura da barragem, por mecanismo de piping, partiu da execução da metodologia de APMR e representou o resultado de um entendimento coletivo da equipe da DCSC participante do processo. A avaliação probabilística das brechas de ruptura foi conduzida com o modelo McBreach, dotado da capacidade de amostragem aleatória dos parâmetros de brecha, sobre distribuições estatísticas predefinidas, através de simulações de Monte Carlo. Com base nos conjuntos dos parâmetros de brecha, foram construídos os eventos de propagação da onda de inundação associados as probabilidades de excedência, por meio de simulação hidráulica com o software HEC-RAS. A caracterização da população inserida no vale a jusante procedeu-se por meio de uma análise de vulnerabilidade e exposição na área de risco de inundação, com emprego de dados do censo demográfico do IBGE e utilização de técnicas de transferência de dados por desagregação. A avaliação das estimativas de perda de vida foi conduzida com o software HEC-LifeSim. Para cada evento de propagação da onda de inundação associado as principais probabilidades de excedência, adotou-se como condição de contorno a estratégia de evacuação do Plano de Ação de Emergência da barragem. Os resultados demonstraram que a diminuição da Probabilidade de Excedência (PE) dos eventos de rompimento estiveram associados ao aumento das vazões de pico de ruptura e da extensão das manchas de inundação e à diminuição dos tempos de chegada. Assim, para PE inferiores, menores foram os totais de população alertada e mobilizada e maiores foram os números de estruturas atingidas e de ocorrências de fatalidades. Entre as principais deficiências encontradas no processo de preparação do empreendedor da barragem, destaca-se a baixa capacidade de mobilização da população após o recebimento dos alertas. As principais causas identificadas para a deficiência estiveram relacionadas a problemas no conteúdo e padronização dos alertas, a falta de planejamento específico para alertar parcelas especiais da população e a falta de preparação e planejamento individualizado da população para o evento. A análise de sensibilidade demonstrou ainda que a variação da concentração populacional entre os períodos diurno e noturno desempenha importante fator na ocorrência de fatalidades no município. Indicou também que a melhoria na capacidade de mobilização da população é a ação com maior efetividade para redução do potencial de perdas de vidas. Por fim, foram indicadas sugestões de melhorias para o PAE da estrutura, como o aprimoramento no planejamento e no conteúdo previsto para as mensagens de alerta, a necessidade de instalação de um sistema de sirenes ao longo da região atingida pela mancha de inundação e a implementação dos principais instrumentos do PAE, tais como: pontos de encontro, rotas de fuga, sinalização de emergência e execução de treinamentos e simulados.

**Palavras-chave:** HEC-LifeSim, McBreach, Ruptura Hipotética de Barragem.

## ABSTRACT

Dams are structures that offer numerous benefits, including flood protection, water supply, hydroelectric power generation, irrigation, and recreation. However, these structures also pose a potential risk to people and properties in the event of failures, leading to an uncontrolled release of stored water. The potential effects of these accidents need to be measured to establish the associated impacts and appropriate preparatory actions, particularly for downstream inhabitants who could be affected. In this context, the present study aimed to analyze the estimated loss of life associated with the hypothetical failure of a dam, employing a probabilistic methodology for predicting breach formation. The focus of the study is the “Sul” Dam, located in the city of Ituporanga, in the Vale do Itajaí region of the state of Santa Catarina. The selection of the dam breach premise, through piping mechanisms, stemmed from the execution of the Potential Failure Mode Analysis (PFMA) methodology, representing a collective understanding of the participating Civil Defense of the State of Santa Catarina (DCSC) team. The probabilistic assessment of breach formations was conducted using the McBreach model, equipped with the capability of random sampling of breach parameter distributions through Monte Carlo simulations. Based on the sets of breach parameters, events of flood wave propagation associated with exceedance probabilities were constructed through hydraulic simulation using the HEC-RAS software. Characterization of the population in the downstream valley involved an analysis of vulnerability and exposure in the flood risk area, utilizing demographic census data from IBGE and employing data transfer techniques through disaggregation. Evaluation of life loss estimates was carried out using the HEC-LifeSim software. For each flood wave propagation event associated with exceedance probabilities, the evacuation strategy from the dam's Emergency Action Plan was adopted as a boundary condition. The results demonstrated that the reduction in the Probability of Exceedance (PE) of breach events was associated with increased peak rupture flows and expanded flood areas, along with reduced arrival times. Consequently, for lower PE values, there were fewer total alerted and mobilized populations and higher numbers of affected structures and occurrences of fatalities. Among the main deficiencies found in the entrepreneur's preparation process, the low capacity for population mobilization after receiving alerts stood out. Identified causes for this deficiency were related to issues in the content and standardization of alerts, the lack of specific planning to alert special population segments, and the absence of individual population preparation and planning for the event. Sensitivity analysis further demonstrated that variations in population concentration between daytime and nighttime periods play a significant role in the occurrence of fatalities in the municipality. It also indicated that improving population mobilization is the most effective action for reducing the potential for life losses compared to the current condition. Furthermore, it highlighted that the implementation of more efficient alert systems would have a significant impact on the effectiveness of dam preparation actions. Finally, suggestions for improvements to the dam's Emergency Action Plan were indicated, including enhancements to alert planning and content, the need for installing alert siren systems along the flood area, and the importance of implementing EAP instruments such as meeting points, escape routes, emergency signage, and conducting training and simulations.

**Keywords:** HEC-LifeSim, McBreach, Dam Break.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Principais acidentes ocorridos e marcos regulatórios na legislação federal brasileira de segurança de barragens.....	39
Figura 3.2 – Estágios de ruptura de uma barragem de terra devido ao mecanismo de galgamento .....	48
Figura 3.3 – Formato de progressão da brecha em casos de ruptura por galgamento .....	48
Figura 3.4 – Estágios de ruptura de uma barragem de terra devido ao mecanismo de <i>piping</i> . 50	
Figura 3.5 – Formato de progressão da brecha em casos de ruptura por <i>piping</i> .....	50
Figura 3.6 – Representação paramétrica da geometria da brecha de ruptura.....	51
Figura 3.7 – Modelo de mapa de probabilidade de excedência de inundação .....	60
Figura 3.8 – Ilustração das distribuições estatísticas disponíveis no software McBreach. ....	65
Figura 3.9 – Interface de acompanhamento estatístico dos resultados dos picos de vazão de ruptura .....	66
Figura 3.10 – Caracterização geral dos modelos de perda de vida.....	77
Figura 3.11 – Fluxograma lógico do modelo HEC-LifeSim.....	79
Figura 3.12 – Representação da abordagem metodológica do HEC-LifeSim para estimativa da perda de vida.....	80
Figura 3.13 – Esquema de vinculação entre os dados hidrodinâmicos e o modelo HEC-LifeSim .....	81
Figura 3.14 – Esquema de submersão a adotado no HEC-LifeSim .....	83
Figura 3.15 – Curvas padrões de estabilidade para os diferentes tipos de construção no HEC-LifeSim. A: Reforçadas em Aço; B: Ancoradas em Madeira; C: Pré-Fabricadas Alvenaria; D: Alvenaria; E: Madeira sem fundação.....	84
Figura 3.16 – Linha do tempo de alerta e evacuação adotada pelo HEC-LifeSim.....	85
Figura 3.17 – Curvas de distribuição de probabilidade de atraso na emissão do alerta em função da condição de planejamento.....	87

Figura 3.18 – Curvas de distribuição de probabilidade de difusão do alerta em função da condição de eficácia do sistema.....	89
Figura 3.19 – Curvas de mobilização da população em risco alertada.....	90
Figura 3.20 – Modelo modificado de Greenshields adotado no HEC-LifeSim .....	92
Figura 3.21 – Critérios padrão de estabilidade para humanos no HEC-LifeSim .....	93
Figura 3.22 – Distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade utilizados no HEC- LifeSim para cada zona de risco de inundação .....	94
Figura 4.1 – Localização da Barragem Sul no contexto da Bacia do Rio Itajaí-Açu (Vale do Itajaí) em Santa Catarina.....	101
Figura 4.2 – Arranjo geral da Barragem Sul .....	102
Figura 4.3 – Seção Transversal da Barragem Sul (A-A) .....	103
Figura 4.4 – Seção Longitudinal da Barragem Sul (B-B).....	103
Figura 4.5 – Registro fotográfico aéreo da Barragem Sul e indicação dos principais componentes da estrutura.....	103
Figura 5.1 – Ilustração do fluxograma metodológico adotado neste trabalho .....	106
Figura 5.2 – Arranjo geral da Barragem Sul – destaque das galerias dos descarregadores de fundo .....	108
Figura 5.3 – Comportas de fundo da Barragem Sul: A: vista de montante da seção de emboque das comportas; B: vista de jusante de saída das galerias de descarga .....	109
Figura 5.4 – Registro fotográfico da implementação das galerias de fundo concreto da Barragem Sul .....	109
Figura 5.5 – Vista de montante da seção de emboque das comportas de fundo – destaque aos danos nas grades de separação de detritos .....	110
Figura 5.6 – Visão interna das galerias de fundo de concreto. A: estrutura de concreto com rugosidades e exposição de armadura – canto superior direito da comporta 02; B: Danos na lateral esquerda da comporta 04 .....	110
Figura 5.7 – Arranjo geral da Barragem Sul – destaque da barragem “fusível” do tipo homogênea em terra na margem direita.....	111

Figura 5.8 – Visão da margem direita da Barragem Sul: A: crista do dique fusível e ombreira direita; B: talude de montante do “dique fusível”; C: talude de jusante do “dique fusível”..	112
Figura 5.9 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da brecha máxima de ruptura ...	114
Figura 5.10 – Corte em perfil da brecha de ruptura: A: Seção longitudinal da galeria; B: Seção transversal da barragem principal no local da galeria.....	114
Figura 5.11 – Localização da hidrografia principal e dos locais de entrada dos hidrogramas no modelo hidráulico .....	121
Figura 5.12 – Hidrograma de entrada no reservatório da Barragem Sul para cheia de TR 1.000 anos .....	121
Figura 5.13 – Hidrograma da Cheia de 1983 observado na estação Ituporanga (83250000)	122
Figura 5.14 – Hidrograma da Cheia de 2011 observado na estação Ituporanga (83250000)	122
Figura 5.15 – Cotagrama da Cheia de julho de 1983 observado na estação Ituporanga (83250000) .....	122
Figura 5.16 – Cotagrama da Cheia de setembro de 2011 observado na estação Ituporanga (83250000) .....	122
Figura 5.17 – Mapa de uso e ocupação do solo utilizado para atribuição dos valores de coeficiente de rugosidade de Manning.....	124
Figura 5.18 – Modelo digital de terreno processado adotado no estudo.....	125
Figura 5.19 – Curva cota-volume do reservatório da Barragem Sul .....	127
Figura 5.20 – Comparação dos cotogramas observado e simulado da cheia de 1983 na Estação Ituporanga (83250000).....	128
Figura 5.21 – Curva-chave do modelo hidráulico obtido na seção da estação Ituporanga (83250000) .....	128
Figura 5.22 – Comparação dos cotogramas observado e simulado da cheia de 2011 na Estação Ituporanga (83250000).....	129
Figura 5.23 – Domínio de simulação para o modelo truncado da Barragem Sul.....	131
Figura 5.24 – Fluxograma de manipulação dos dados para criação do inventário de estruturas e pessoas.....	138

Figura 5.25 – Curva de distribuição de probabilidade de atraso na emissão do alerta para a população em risco da Barragem Sul.....	142
Figura 5.26 – Curvas de distribuição de probabilidade de difusão do alerta para a população em risco da Barragem Sul.....	142
Figura 5.27 – Curvas de distribuição de probabilidade de início da mobilização da população em risco alertada para a população em risco da Barragem Sul.....	143
Figura 5.28 – Curvas de distribuição de probabilidade combinada das etapas de difusão do alerta e início da mobilização para a população em risco da Barragem Sul.....	143
Figura 5.29 – ZPE, rede viária e pontos de encontro adotados no modelo.....	144
Figura 5.30 – Esquema dos resultados gerados da modelagem de perda de vida.....	148
Figura 6.1 – Curva de frequência das vazões de pico dos hidrogramas resultantes do MCBreach, onde, P99%, P95%, P90%, P50%, P10%, P05%, P01%, P0.1% e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 95%, 90%, 50%, 10%, 5%, 1% e 0,1% e para o cenário determinístico, respectivamente.....	150
Figura 6.2 – Gráfico de dispersão entre os parâmetros de brecha e vazões de pico dos hidrogramas.....	152
Figura 6.3 – Histograma do índice ER/HW.....	152
Figura 6.4 – Hidrogramas de saída para o método probabilístico e para o método determinístico.....	153
Figura 6.5 – Localização das seções de referência.....	154
Figura 6.6 –Vazões máximas para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.....	155
Figura 6.7 – Tempo de chegada da frente de onda (0,30 m) para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.....	156
Figura 6.8 – Tempo para vazão máxima nas seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de	

excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente. .....	156
Figura 6.9 – Velocidade máxima do escoamento para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente. .....	157
Figura 6.10 – Profundidade máxima do escoamento para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente. ....	158
Figura 6.11 – Envoltória máxima da inundação associada a ruptura hipotética da Barragem Sul, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente .....	160
Figura 6.12 – Localização das estruturas residenciais na região atingida.....	166
Figura 6.13 – Localização dos agrupamentos e estabelecimentos na região atingida.....	166
Figura 6.14 – Concentração populacional nas estruturas às 14h.....	167
Figura 6.15 – Concentração populacional nas estruturas às 02h.....	168
Figura 6.16 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas do cenário Base Simulado (C0) com os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET) .....	169
Figura 6.17 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Simulação   Número de Iterações: Cenário C0 = 1.000 e Cenário C1 = 5.000 .....	172
Figura 6.18 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Simulação   Hora de ocorrência do evento: Cenário C0 = 14h e Cenário C2 = 02h.....	173

Figura 6.19 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Evacuação   Fração da população abaixo dos 65 anos com limitação de mobilidade: Cenário C0 = 5,1% e Cenário C3 = 10%   Fração da população acima dos 65 anos com limitação de mobilidade: Cenário C0 = 22,6% e Cenário C3 = 45% .....	175
Figura 6.20 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Evacuação   Fração da população que evacua em veículos vs a pé: Cenário C0 = 65%, Cenário C4 = 30% e Cenário C5 = 0% .....	176
Figura 6.21 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Alerta e Mobilização   Tempo de inicialização da mobilização: Cenário C0 = Curva Personalizada, Cenário C6 = Curva Padrão Tipo “D” (Percepção: Baixa / Preparação Baixa) e Cenário C7 = Curva Padrão Tipo “A” (Percepção: Alta / Preparação Alta).....	177
Figura 6.22 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Alerta e Mobilização   Tempo de difusão do alerta: Cenário C0 = Curva Personalizada; Cenário C8 = Curva Padrão de Difusão “Lenta” e Cenário C9 = Curva Padrão de Difusão “Rápida” .....	179
Figura 6.23 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Alerta e Mobilização   Tempo para emissão do alerta: Cenário C0 = Curva Personalizada; Cenário C10 = Curva Padrão Condição “Minimamente Preparado” e Cenário C11 = Curva Padrão Condição “Bem Preparado” .....	180
Figura 6.24 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET)   Parâmetros de Alerta e Mobilização   Tempo de identificação da ameaça: Cenário C0 = -30 a 0 min; Cenário C12 = 0 a +15 min; e Cenário C13 = -60 a -15 min   Tempo de comunicação da ameaça: Cenário C0 = 0 a +5 min; Cenário C12 = +5 a +10 min; e Cenário C13 = 0 a +1 min .....	182

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Resumo dos principais modos de falha de barragens .....	43
Quadro 3.2 – Níveis de esforço para avaliação de rompimento de barragens .....	45
Quadro 3.3 – Métodos para simulação da formação da brecha de ruptura de barragens.....	46
Quadro 3.4 – Parâmetros de brecha de rompimento para os mecanismos de galgamento e <i>piping</i> .....	64
Quadro 3.5 – Níveis gerais de previsão de perda de vida .....	69
Quadro 3.6 – Níveis de estimativa da população em risco .....	70
Quadro 3.7 – Estado da arte das diretrizes metodologias adotadas para análise de perda de vida em diferentes países .....	71
Quadro 3.8 – Visão geral dos parâmetros e mecanismos dos modelos de perda de vidas existentes, onde E = Empírico; e D = Dinâmico. ....	76
Quadro 3.9 – Atributos requeridos pelo inventário de estruturas do modelo HEC-LifeSim ...	81
Quadro 3.10 – Critérios de submersão.....	82
Quadro 4.1 – Ficha Técnica da Barragem Sul – Ituporanga/SC .....	104
Quadro 5.1 – Seções de Referência .....	132
Quadro 5.2 – Parâmetros de evacuação adotados no modelo para o Cenário Base .....	144
Quadro 5.3 – Parâmetros de simulação adotados no modelo para o cenário base .....	146
Quadro 5.4 – Cenários simulados para análise de sensibilidade do modelo HEC-LifeSim ..	147

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Número de Falha de Barragens entre nos anos de 1975 e 2011 nos Estados Unidos .....	42
Tabela 3.2 – Sugestões de coeficientes de descarga para rupturas de barragem por mecanismos de galgamento e <i>piping</i> .....	51
Tabela 3.3 – Faixas sugeridas por agências nacionais e internacionais para os parâmetros de formação de brecha de ruptura, onde H = altura da barragem; e L = comprimento da crista da barragem.....	52
Tabela 3.4 – Faixas de informações utilizadas para desenvolvimentos das equações de regressão de formação de brecha .....	53
Tabela 3.5 – Sugestão de valores para o parâmetro <i>Cb</i> em função de faixas de volume de reservatórios .....	58
Tabela 3.6 – Coeficientes utilizados nas curvas de atraso na emissão do alerta em função da condição de planejamento .....	87
Tabela 3.7 – Valores dos coeficientes de eficácia do alerta direto e indireto para cada tipo de curva de difusão de alerta proposta.....	88
Tabela 3.8 – Valores dos coeficientes de mobilização da população em risco alertada.....	90
Tabela 3.9 – Critério padrão de estabilidade de veículos no HEC-LifeSim .....	92
Tabela 5.1 – Parâmetros de brecha definidos para a Barragem Sul. Método Determinístico.	115
Tabela 5.2 – Parâmetros de entrada de formação da Brecha. Método probabilístico.....	116
Tabela 5.3 – Vazões médias diárias máximas e instantâneas máximas para a Barragem Sul	120
Tabela 5.4 – Vazões com tempo de recorrência de 2 anos para os principais afluentes da área de estudo.....	120
Tabela 5.5 – Parâmetros de rugosidade de Manning “n” .....	123
Tabela 6.1 – Resumo das vazões de pico e dos parâmetros de brecha associados aos hidrogramas resultantes do MCBreach .....	151

Tabela 6.2 – Resultados da modelagem hidráulica para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente .....	159
Tabela 6.3 – Resultados da modelagem hidráulica para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente .....	159
Tabela 6.4 – Quantitativo por tipologia de ocupação das estruturas identificadas no município e na região de impacto da onda de ruptura.....	162
Tabela 6.5 – Quantitativo e distribuição populacional em função das tipologias de ocupação das estruturas no município de Ituporanga/SC.....	163
Tabela 6.6 – Quantitativo e distribuição populacional na região atingida pela inundação de ruptura da Barragem Sul .....	164
Tabela 6.7 – Quantitativo e distribuição populacional em função das tipologias de ocupação das estruturas na região atingida pela inundação de ruptura da Barragem Sul .....	165
Tabela 6.8 – Quartis e médias de estimativa de perda de vidas para o Cenário Base (C0) com os eventos de probabilidades de excedência ( $P_E$ ) de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET) .....	168
Tabela 6.9 – Valores médios de população em risco alertada e mobilizada e de ocorrência de fatalidades para o Cenário Base (C0) com os eventos de probabilidades de excedência (PE) de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET) .....	170

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APMR	Análise de Potenciais Modos de Ruptura
AS BUILT	Como Construído
BM	Banco Mundial
CBDB	Comitê Brasileira de Barragens
CDWR	Divisão de Recursos Hídricos do Estado do Colorado ( <i>Department of Natural Resources Division of Water Resources</i> )
CNEFE	Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COMPDEC	Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civi
CMA	Comissão do Meio Ambiente
CTSB	Câmara Técnica de Segurança de Barragens
CWC	Central Water Commission
DAMBRK	Modelo de Previsão de Rompimento de Barragem ( <i>Dam Break Forecasting Model</i> )
DCSC	Defesa Civil do Estado de Santa Catarina
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ELETRORÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ER	Taxa de Erosão Linear do Corpo do Barramento
EUA	Estados Unidos da América

FEMA	Agência Federal de Gestão de Emergências ( <i>Federal Emergency Management Agency</i> )
FERC	Comissão Reguladora Federal de Energia ( <i>Federal Energy Regulatory Commission</i> )
FLO-2D	Software “Escoamento Bidimensional” ( <i>Flow Two-Dimensional</i> )
GPS	Sistema de Posicionamento Global ( <i>Global Positioning System</i> )
HEC-1	Centro de Engenharia Hidrológica “Um” ( <i>Hydrologic Engineering Center One</i> )
HEC-FIA	Análise de Impacto de Inundação do Centro de Engenharia Hidrológica ( <i>Hydrologic Engineering Center's Flood Impact Analysis</i> )
HEC-HMS	Sistema de Modelagem Hidrológica do Centro de Engenharia Hidrológica ( <i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System</i> )
HEC-LIFESIM	
HEC-RAS	Sistema de Análises de Rios do Centro de Engenharia Hidrológica ( <i>Hydrologic Engineering Center's River Analysis System</i> )
HW	Carga Hidráulica Acima do Fundo da Brecha
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	Comitê Internacional de Grandes Barragens ( <i>International Commission on Large Dams</i> )
IDAP	Interface de Divulgação de Alertas Públicos
IDF	Intensidade x Duração x Frequência
ISR	Inspeção de Segurança Regular
ISE	Inspeção de Segurança Especial
JICA	Agência de Cooperação Internacional do Japão ( <i>Japan International Cooperation Agency</i> )
LSM	Modelo de Segurança de Vida ( <i>Life Safety Model</i> )
MCI	Método da Comparação de Inundação

MDT	Modelo Digital de Terreno
MIKE 21	Mike 21 DHI Software
N.A.	Nível d'água
OMNR	<i>Ministério de Recursos Naturais de Ontário - Canadá (Ontario Ministry Of Natural Resources)</i>
PAE	Plano de Ação de Emergência
PAEBM	Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração
PE	Probabilidade de Excedência
PL	Proposta de Lei
PLANCON	Plano de Contingência de Defesa Civil
PLC	Proposta de Lei da Câmara
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragem
RCEM	Metodologia de Estimativa de Consequências ( <i>Reclamation's Consequence Estimating Methodology</i> )
RESCDAM	Desenvolvimento de Ações de Resgate com Base em Análise de Inundação de Ruptura de Barragem ( <i>Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis</i> )
RPSB	Revisão Periódica de Segurança de Barragem
SC	Santa Catarina
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina
SF	Senado Federal
SITES	Programa de Computador para Análise de Recursos Hídricos ( <i>Water Resource Site Analysis Computer Program</i> )

SMPDBK	Método Simplificado de Rompimento de Barragem ( <i>Simplified Dam Break Method</i> )
SMS	Serviço de Mensagens Curtas ( <i>Short Message Service</i> )
SQL	Linguagem de Consulta Estruturada ( <i>Standard Query Language</i> )
SUFRI	Estratégias Sustentáveis de Gestão do Risco de Inundação Urbana com Medidas Não Estruturais para Enfrentar o Risco Residual ( <i>Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management with Non Structural Measures to Cope with the Residual Risk</i> )
SUV	Veículo Utilitário Esportivo ( <i>Sport Utility Vehicle</i> )
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos ( <i>United States Army Corps of Engineers</i> )
USDHS	Departamento de Segurança Interna dos Estados Unidos ( <i>United States Department Of Homeland Security</i> )
WINDAM	Módulo de Análise de Barragens do Windows ( <i>Windows Dam Analysis Modules</i> )
ZAS	Zona de Autossalvamento
ZPE	Zona de Planejamento de Emergência
ZSS	Zona de Segurança Secundária

## LISTA DE SIMBOLOS

$\alpha$	Coeficiente relacionado à velocidade da mobilização
a	Coeficiente específico para ajuste dos dados empíricos
AGR1	Estabelecimentos Agropecuários
$\beta$	Coeficiente relacionado ao tempo médio para mobilização
b	Coeficiente específico para ajuste dos dados empíricos
$B_m$	Largura média da brecha
$B_t$	Coeficiente relacionado à eficácia do sistema de alerta direto
C0	Cenário Base
C1	Cenário 1 de análise de sensibilidade
C2	Cenário 2 de análise de sensibilidade
C3	Cenário 3 de análise de sensibilidade
C4	Cenário 4 de análise de sensibilidade
C5	Cenário 5 de análise de sensibilidade
C6	Cenário 6 de análise de sensibilidade
C7	Cenário 7 de análise de sensibilidade
C8	Cenário 8 de análise de sensibilidade
C9	Cenário 9 de análise de sensibilidade
C10	Cenário 10 de análise de sensibilidade
C11	Cenário 11 de análise de sensibilidade
C12	Cenário 12 de análise de sensibilidade
C13	Cenário 13 de análise de sensibilidade
C	Largura da crista da barragem
$C_A$	Curvas padrão de mobilização do tipo “A”
$C_{BP}$	Curva padrão de atraso na emissão do alerta de condição “bem preparado”

$C_d$	Coeficiente de descarga da brecha de ruptura
$C_D$	Curva padrão de mobilização do tipo “D”
$C_L$	Curva padrão de difusão do alerta do tipo “Lenta”
$C_{MP}$	Curva padrão de atraso na emissão do alerta de condição “minimamente preparado”
COM1	Estabelecimentos Comerciais
COM2	Estabelecimentos de Saúde
CP	Curva Personalizada
$C_{pipe}$	Coeficiente de descarga do orifício gerado pelo <i>piping</i>
$C_R$	Curva padrão de difusão do alerta do tipo “rápida”
$C_t$	Coeficiente relacionado à eficácia do alerta indireto
DET	Evento associado a brecha de ruptura determinística
EDU1	Estabelecimentos de Ensino
$EI_{pipe}$	Elevação inicial de ocorrência do <i>piping</i>
ER	Taxa de erosão linear do corpo do barramento
$\phi$	Coeficiente potencial de <i>Greenshields</i>
$F_{M65}$	Fração da população acima dos 65 anos com limitação de mobilidade
$F_M$	Fração da população abaixo dos 65 anos com limitação de mobilidade
$F_{VP}$	Fração da população que evacua em veículos vs a pé
$g$	Aceleração da gravidade
H	Altura da barragem
h	hora
$h_b$	Altura final da brecha de ruptura
$H_E$	Hora de ocorrência do evento
$h_w$	Profundidade de água acima da geratriz inferior da brecha
$hm^3$	Hectômetro cúbico

H:V	Declividade lateral
Init.	Elevação da superfície de água para gatilho de início da ruptura
Inv.	Elevação inferior final do fundo
$k_{bp}$	Densidade limite para ocorrência da velocidade livre de fluxo
$k_i$	Densidade de veículos no trecho
$k_{jam}$	Densidade de engarrafamento no trecho
$K_o$	Coefficiente relacionado aos modos de falha por <i>piping</i> e galgamento
L	Comprimento da crista da barragem
LSS	Inclinação do lado esquerdo da brecha de ruptura
n	Coefficiente de rugosidade de <i>Manning</i>
$N_i$	Número de Iterações
NSE	Coefficiente de <i>Nash</i>
P01%	Evento associado a brecha de ruptura com probabilidade de excedência de 1%
P10%	Evento associado a brecha de ruptura com probabilidade de excedência de 10%
P50%	Evento associado a brecha de ruptura com probabilidade de excedência de 50%
P90%	Evento associado a brecha de ruptura com probabilidade de excedência de 90%
P99%	Evento associado a brecha de ruptura com probabilidade de excedência de 99%
Prog.	Progressão de desenvolvimento da brecha
$P_t$	Probabilidade Acumulativa de ser mobilizado
$PU_t$	População que não foi alertada
$\mu$	Média do conjunto amostral
$P_t$	Probabilidade de atraso na emissão do alerta
RES1	Código do tipo de ocupação de residências unifamiliares
RES3	Código do tipo de ocupação de residências multifamiliares
RSS	Inclinação do lado direito da brecha de ruptura

$\sigma$	Desvio padrão do conjunto amostral
$t$	Tempo de evacuação disponível
$T_C$	Tempo de comunicação da ameaça
$T_D$	Tempo de difusão do alerta
$T_E$	Tempo para emissão do alerta
$t_f$	Tempo total de formação da brecha
$T_I$	Tempo de identificação da ameaça
$T_M$	Tempo de inicialização da mobilização
$u_f$	Velocidade livre de fluxo no trecho
$V_{erod}$	Volume de material erodido do corpo do barramento
$v_0$	Velocidade de congestionamento no trecho
$v_i$	Velocidade no trecho
$v_f$	Velocidade máxima de interceptação
$V_s$	Volume de água que passa pela brecha
$V_w$	Volume do reservatório no momento do rompimento
$W$	População alertada
$W_b$	Largura da base da brecha
$Z_1$	Declividade horizontal da face de montante do corpo do barramento
$Z_2$	Declividade horizontal da face de montante do corpo do barramento
$Z_b$	Inclinação lateral da brecha

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>34</b>
2.1	Objetivo Geral .....	34
2.2	Objetivos Específicos.....	34
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>35</b>
3.1	Política Nacional de Segurança de Barragens.....	35
3.2	Modelagem de Rompimento de Barragens.....	41
<b>3.2.1</b>	<b>Avaliação do Modo de Falha e dos Cenários de Ruptura Hipotética .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Análise de Formação da Brecha de Ruptura .....</b>	<b>45</b>
3.2.2.1	<i>Método para Simulação da Formação da Brecha .....</i>	<i>46</i>
3.2.2.2	<i>Definição dos Parâmetros de Formação da Brecha para o Método Paramétrico</i>	<i>51</i>
3.3	Análise Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens.....	59
<b>3.3.1</b>	<b>Análise de Potenciais Modos de Ruptura.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Modelo McBreach.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Interface com o Modelo HEC-RAS.....</b>	<b>66</b>
3.4	Avaliação de Perda de Vida .....	67
<b>3.4.1</b>	<b>Diretrizes Internacionais para Análise de Perda de Vida .....</b>	<b>68</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Revisão e Estado da Arte da Análise de Perda de Vida.....</b>	<b>73</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Modelo HEC-LifeSim .....</b>	<b>77</b>
3.4.3.1	<i>Módulo de Propagação.....</i>	<i>80</i>
3.4.3.2	<i>Módulo de Perda de Abrigo.....</i>	<i>81</i>
3.4.3.3	<i>Módulo de Alerta e Evacuação .....</i>	<i>85</i>
3.4.3.4	<i>Módulo de Perda de Vida .....</i>	<i>93</i>
3.5	Estudos Anteriores Desenvolvidas no Cenário Nacional e Internacional .....	94

<b>4</b>	<b>AREA DE ESTUDO E CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM .....</b>	<b>101</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>106</b>
5.1	Análise Probabilística de Previsão de Brecha .....	107
<b>5.1.1</b>	<b>Análise de Potenciais Modos de Ruptura.....</b>	<b>107</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Avaliação Probabilística de Brecha de Ruptura.....</b>	<b>113</b>
5.1.2.1	<i>Definição dos Parâmetros de Formação de Brecha para o Método Determinístico</i>	<i>114</i>
5.1.2.2	<i>Definição dos Parâmetros de Formação de Brecha para o Método Probabilístico</i>	<i>116</i>
5.2	Modelagem Hidráulica Computacional .....	118
<b>5.2.1</b>	<b>Caracterização Hidrológica.....</b>	<b>119</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Definição dos Parâmetros de Resistência.....</b>	<b>123</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Seleção do Modelo Digital de Terreno do Vale a Jusante .....</b>	<b>124</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Desenvolvimento da Modelagem Hidráulica .....</b>	<b>125</b>
5.2.4.1	<i>Modelo Hidráulico Completo.....</i>	<i>126</i>
5.2.4.2	<i>Modelo Hidráulico Truncado.....</i>	<i>130</i>
<b>5.2.5</b>	<b>Pós Processamento da Modelagem Hidráulica e Mapeamento dos Parâmetros da Inundação Potencial.....</b>	<b>132</b>
5.3	Modelagem de Perda de Vida .....	133
<b>5.3.1</b>	<b>Análise de Vulnerabilidade e Exposição .....</b>	<b>134</b>
5.3.1.1	<i>Seleção da Base de Dados Populacionais e Domiciliais.....</i>	<i>134</i>
5.3.1.2	<i>Metodologia de Processamento e Integração dos Dados no Inventário de Estruturas e Pessoas .....</i>	<i>137</i>
<b>5.3.2</b>	<b>Desenvolvimento da Modelagem de Perda de Vida.....</b>	<b>140</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Análise de Sensibilidade .....</b>	<b>146</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Manipulação dos Cenários .....</b>	<b>148</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>150</b>

6.1	Parâmetros de Brechas Associados a Probabilidade de Excedência .....	150
<b>6.1.1</b>	<b>Resultados das Vazões de Pico associados as Probabilidades de Excedência</b>	<b>150</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Relação entre os Parâmetros de Brecha de Ruptura, Vazão de Pico dos</b>	
	<b>Hidrogramas e Avaliação do Índice ER/Hw .....</b>	<b>151</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Hidrogramas Completos.....</b>	<b>153</b>
6.2	Modelagem Hidráulica Computacional .....	154
6.3	Análise de Vulnerabilidade e Exposição .....	161
6.4	Modelagem de Perda de Vida .....	168
6.5	Análise de Sensibilidade .....	172
6.6	Discussão dos Resultados .....	183
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>192</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>194</b>
	<b>APÊNDICE A – Resumo de Resultados da APRM Conduzida para a Barragem Sul..</b>	<b>210</b>
	<b>APÊNDICE B – Variáveis Seleccionadas das Amostragens de Domicílios e Pessoas dos</b>	
	<b>Microdados do Censo Demográfico.....</b>	<b>213</b>
	<b>APÊNDICE C – Tipos de Ocupação adotados no Modelo HEC-LifeSim.....</b>	<b>216</b>
	<b>APÊNDICE D – Curvas de Emissão do Alerta, Difusão do Alerta e Iniciação da</b>	
	<b>Mobilização .....</b>	<b>218</b>
	<b>APÊNDICE E – Quartis e Médias de Estimativa de Fatalidades para os Cenários de</b>	
	<b>Ruptura Simulados .....</b>	<b>222</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens oferecem inúmeros benefícios, incluindo proteção contra enchentes, abastecimento de água, geração de energia hidrelétrica, irrigação e recreação. Todavia, estas estruturas criam também um risco potencial para pessoas e propriedades em caso de ocorrência de falhas, levando a uma liberação descontrolada da água reservada. Os efeitos potenciais desses acidentes precisam ser mensurados para que se possam estabelecer os impactos associados e as ações de reposta cabíveis, particularmente para os habitantes a jusante que seriam afetados (FROEHLICH; DIAZ, 2022).

Apesar dos avanços legais desenvolvidos no país pela Lei nº 12.334/2010 de concepção da Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010) e por sua recente atualização prevista pela Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020), ainda há uma significativa defasagem na implementação de seus instrumentos. A elaboração dos Planos de Segurança da Barragem e seus componentes, tais como o mapeamento da inundação potencial e o Plano de Ação de Emergência (PAE), encontram barreiras de natureza financeira e técnica que dificultam sua execução (ANA, 2022). Em vista a redução desse hiato no país, pesquisas na área de segurança de barragens apresentam-se como um dos fatores catalizadores. A busca pela difusão de metodologias mais informativas e confiáveis possibilita a obtenção de resultados de maior qualidade sem, necessariamente, implicar no aumento de investimentos financeiros.

O PAE é um requisito obrigatório para barragens com dano potencial associado médio e alto em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas e firma o compromisso de ação do empreendedor para com a proteção civil e a minimização do potencial de risco associado a barragem (BRASIL, 2010). No entanto, a busca de muitos empreendimentos pelo simples atendimento quantitativo aos itens previstos pela lei implica em um perigo real de que os planos desenvolvidos não descrevam cenários factíveis ou, então, não indiquem soluções eficazes para as respostas ao evento.

Segundo Clarke (1999), muitas vezes no processo de construção dos planos de emergência, torna-se mais simples a construção de documentos simbólicos do que a admissão dos riscos e das incertezas associadas aos eventos de desastres. Comumente, estes documentos frequentemente caracterizam-se por: (i) realizarem declarações ou promessas que não podem ser cumpridas; (ii) afirmarem que os eventos prognosticados são compreendidos e podem ser controlados; (iii) não examinarem como os fatores humanos (vulnerabilidades) afetam a reposta

da população às emergências; (iv) não analisarem, de forma satisfatória, os riscos existentes; (v) superestimarem a coordenação organizacional para gestão da emergência e suas implicações na sociedade; e (vi) descreverem uma sequência racional de eventos durante um desastre que não reflete, necessariamente, as incertezas que poderão ocorrer. No Brasil, casos como as rupturas da barragem de Fundão, em Mariana/MG, e da barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG, evidenciam a geração de documentação com algumas destas deficiências (BRASIL, 2016; 2019a; CASTRO, 2020; OLIVEIRA, 2021; TEIXEIRA; 2023) e demonstram um passivo técnico a ser vencido na geração dos PAEs.

Um dos principais focos dentro da construção do PAE é a utilização de ferramentas de modelagem hidráulica para caracterização dos riscos associados com o rompimento da barragem e das inundações decorrentes a jusante. Numerosas pesquisas envolvendo o tema já foram desenvolvidos sob os mais diversos aspectos e objetivos. A título de exemplo, tanto no cenário nacional (COLLISCHONN; TUCCI, 1997; BRASIL, 2005; MACHADO, 2017) quanto a nível internacional (HUOKUNA, 2001; ALVAREZ et al., 2017; SHAHRIM; ROS, 2020) softwares de modelagem hidráulica vêm sendo utilizados como peça chave dentro da metodologia desses estudos.

Os métodos até então adotados, no entanto, encontram-se desatualizados ou, ao menos, excessivamente conservadores quanto a estimativa dos perigos a jusante (GOODELL, *et al* 2018). À medida que as metodologias são de natureza determinística, seus produtos resultam na delimitação de uma única área de inundação, dentre as inúmeras possibilidades existentes, de modo a não se proceder uma clara comunicação dos riscos e incertezas quantificadas. Ainda que os estudos tradicionais adotem cenários de ruptura mais desfavoráveis ou extremos, seus resultados podem acabar induzindo a conclusões equivocadas ou derivando-se em produtos menos informativos quando comparados com estudos cuja análise de uma grande variedade de condições de ruptura foi realizada e uma gama maior de cenários de inundação e efeitos correlacionados pode ser avaliada (GOODELL, 2013; FERC, 2014a).

Além da incerteza associada ao cenário de inundação, é importante que os estudos também incorporem a previsão sobre a natureza mutante do risco à população a jusante, facilitando a tomada de ações baseadas em evidências, antes que os eventos efetivamente ocorram. Nesse contexto, são diversos os modelos existentes que podem ser empregados para estimar as consequências para a população a jusante de um barramento, tanto em termos econômicos quanto em termos de perdas de vida. Dentro do contexto da estimativa do potencial

de perda de vidas, os modelos podem ser resumidos em duas grandes categorias: (i) empíricos, quando os resultados de fatalidade são correlacionados exclusivamente com características de eventos passados; e (ii) dinâmicos, quando permitem simulações mais detalhadas do comportamento dos indivíduos e das causas de fatalidade (JONKMAN, 2007). Os modelos dinâmicos, portanto, fornecem a capacidade de simular cada pessoa, edifício e veículo em risco e sua interação com o escoamento da inundação.

A produção de estimativas precisas de fatalidades, dado as incertezas inerentes de todas variáveis envolvidas, representa um desafio. Todavia, o valor da utilização de modelos complexos de perda de vidas não deve ser entendido como a possibilidade de estimar com exatidão do número de mortes, mas sim como a capacidade de avaliar se intervenções nos processos de gerenciamento de emergência podem trazer uma diferença significativa na redução das prováveis fatalidades (LUMBROSO *et al.*, 2021). Assim, a informação gerada por estes modelos pode ser incorporada na construção de PAEs mais eficazes.

No presente contexto, o trabalho propõe a obtenção, através de técnicas estatísticas, do conjunto dos principais parâmetros geométricos de formação da brecha de ruptura, uma das maiores fontes de incertezas nos estudos de rompimento de barragens (WAHL, 2010; TSCHIEDEL; PAIVA, 2018). Através dessa metodologia, será possível calcular o risco de uma determinada cota de inundação ocorrer em cada região de interesse do vale à jusante, permitindo uma análise de resultados mais significativos com demanda similar de informação dos estudos tradicionais de ruptura. Tal metodologia está fundamentada na utilização de modelos numéricos probabilísticos e simulações com o uso do Método de Monte Carlo, de modo a conceber inúmeras amostragens do cenário de ruptura da barragem, dada a ocorrência eminente da catástrofe, associando probabilidades de excedência aos hidrogramas de saída (GOODELL, 2012; LARA, 2016; KLEINSCHMIDT, 2019a).

Para a avaliação dos impactos relativos entre os resultados que demonstrarem maior relevância no estudo probabilístico e o resultado do estudo determinístico de condição mais desfavorável, serão realizadas avaliações do risco da perda de vidas para cada um dos eventos. Por meio da utilização do modelo dinâmico HEC-LifeSim (USACE, 2020b), será possível modelar explicitamente o processo de aviso e evacuação da população potencialmente exposta ao perigo, prevendo a distribuição espacial de fatalidades dentro das construções e junto a infraestrutura de ruas e estradas do local de ocorrência do impacto (ABOELATA; BOWLES, 2005; USACE, 2020b). Com base nas análises dos principais produtos do modelo, tais como o

potencial de perdas de vidas, efetividade de notificação e capacidade de mobilização, será realizado o mapeamento das vantagens do emprego da metodologia probabilística de rompimento, bem como também serão avaliadas as vantagens da utilização de modelos de perda de vida na gestão de riscos e desastres associados ao evento de ruptura.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe a condução da metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura de barragem integrada a estimativa do potencial de perda de vidas para a Barragem Sul, localizada na cidade de Ituporanga, na região do Vale do Itajaí no estado de Santa Catarina. A barragem é classificada como de alto potencial de dano associado e estudos anteriores conduzidos para estrutura indicam uma elevada população em risco (COLFERAI, 2018; DCSC, 2019b).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral da pesquisa é analisar a estimativa de perda de vida associada ao rompimento hipotético de uma barragem, empregando uma metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Construir cenários de propagação da onda de inundação associados as probabilidades de excedência dos parâmetros de brecha, determinando as regiões afetadas e os parâmetros hidráulicos dos eventos analisados;
- Realizar a avaliação das estimativas de perda de vida para cada cenário de propagação, avaliando como os eventos de inundação associados as probabilidades de excedência relacionam-se com as estratégias de alerta e mobilização do Plano de Ação de Emergência.
- Identificar, através de uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de perda de vida, as principais deficiências e oportunidades de melhoria nas ações de preparação da barragem.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o intuito de apresentar o embasamento técnico-científico necessário para que os objetivos anteriormente citados possam ser alcançados. Desse modo, é dividido em: (i) Política Nacional de Segurança de Barragens; (ii) Modelagem Hidrodinâmica de Rompimento de Barragens; (iii) Análise Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens; e (iv) Avaliação de Perda de Vida.

#### 3.1 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

O histórico de Segurança de Barragens no mundo remonta a diversas décadas atrás. Em nível internacional, a preocupação com os riscos associados ao rompimento de barragens data das décadas de 1970 e 1980, quando o ICOLD (International Commission on Large Dams), autoridade reconhecida internacionalmente no assunto, iniciou a investir em programas de segurança de barragens em nível mundial (ICOLD, 1974; ICOLD, 1987). Neste contexto, diversos países de destaque na economia instauraram suas políticas de segurança de barragens antes dos anos 2000, como é o caso dos EUA (1978), Austrália (1978), Portugal (1990) e Espanha (1992), entre outros exemplos (CBDB, 2011). Ainda, conforme Veról (2010), até o ano de 2010 haviam ao menos 29 países com legislações específicas quanto à segurança de barragens, diferença temporal histórica que deixa claro a importância da questão e evidencia o atraso do Brasil no tratamento do assunto.

Em relação ao histórico nacional, existiram tentativas de se obter uma legislação adequada desde a década de 70, exemplificado pela emissão do Decreto Lei nº 10.752/77, no estado de São Paulo, após os acidentes ocorridos com as barragens de Euclides da Cunha e Armando de Salles Oliveira em 1977, e que, por falta de regulamentação, nunca fora implementado (CBDB, 2001). O instrumento que contribuiu para tornar realidade a atual legislação de segurança de barragem foi o Projeto de Lei nº 1.181/03 (BRASIL, 2003), incitado pela ocorrência do rompimento da Barragem de Cataguazes – MG, em 2003. Sua aprovação ocorreu após 7 anos de tramitação na Câmara dos Deputados, incentivado, novamente, pela resposta a um evento de desastre: o rompimento da Barragem de Algodões – PI, em 2009. A aprovação da proposta no Senado Federal, designada como PLC nº 168, ocorreu de forma célere, resultando na publicação da Lei nº 12.334/2010 de estabelecimento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), representando um marco na gestão da segurança de barragens no país (NEVES, 2018).

É importante destacar que ao longo dos mais de 30 anos desde as primeiras iniciativas de obtenção da legislação e dos 7 anos de tramitação na Câmara dos Deputados, diversos acidentes e incidentes graves foram observados, sendo importante destacar, além dos anteriormente já citados, os seguintes: Camará – PB (2004), Campos Novos – SC (2006), Mirai – MG (2007), Apertadinho – RO (2008), Espora – GO (2008) e Bocaiuva – PR (2010) (MEDEIROS, 2020). Mesmo após a implementação da lei e dos diversos regulamentos subsequentes emitidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), órgãos fiscalizadores nacionais: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); e órgãos fiscalizadores estaduais, dois desastres de grande magnitudes ocorreram no país: Mariana – MG, em novembro de 2015 (BRASIL, 2016), e Brumadinho – MG, em janeiro de 2019 (BRASIL, 2019a), constatando o passivo ainda existente na segurança de barragens em nível federal (ANA, 2020).

Nesse contexto, a recorrência dos eventos catastróficos culminou em debates e articulações que, paulatinamente, mobilizaram o poder público a aperfeiçoar a PNSB por meio da atualização da Lei nº 12.334/10. Decorrente do acidente de Mariana em 2015, foi criado pelo Senado Federal uma Comissão Temporária para avaliação da PNSB, que apontou pontos de carência dos órgãos fiscalizadores e lacunas dos instrumentos da política como a causa de impedimento do pleno atingimento dos objetivos da política. Os desdobramentos levaram a construção de dois principais projetos de lei: a PLS nº 224, em 2016, que acabou arquivada devido a não apreciação do material pela Comissão de Meio Ambiente (CMA), e a PLS nº 550, em 2019, procedente dos desdobramentos do evento de rompimento em Brumadinho/MG, que culminou na promulgação da Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020 (SF, 2019; BRASIL, 2020). A referida lei promoveu alterações significativas nos processos de classificação de barragens, elaboração dos planos de segurança e de ação de emergência e definição de infrações administrativas e penalidades, indicando um cunho de caráter mais rigoroso e punitivo frente aos empreendedores de barragens e responsáveis técnicos da área. Conforme Andretta (2020), a Lei nº 14.006/20 permitiu alguns avanços positivos e necessários na legislação, contudo, caso não seja celeremente regulamentada pelas entidades fiscalizadoras, poderá trazer significativos retrocessos para a segurança de barragens no país.

Quanto a regulamentação da PNSB, é importante destacar os avanços atingidos na década de 2010 pelas entidades fiscalizadoras federais e estaduais e CNRH, incumbidos de

elaborar resoluções e portarias para regulamentação de alguns artigos da citada lei federal. As primeiras publicações realizadas foram elaboradas pela ANA, entre os anos de 2011 e 2012, por meio da Resolução nº 742/11 e Resolução nº 91/12, que estabeleceram, respectivamente, os critérios mínimos para execução das Inspeções Regulares (IR) e para elaboração dos Planos de Segurança de Barragens (PSB) e Revisões Periódicas de Segurança de Barragens (RPSB) das estruturas fiscalizados pelo órgão (ANA, 2011; ANA 2012). Ainda no ano de 2012, o CNRH emitiu a Resolução nº 143, regulamentando os critérios gerais de classificação de barragens, e a Resolução nº 144, estabelecendo diretrizes para implementação da PNSB, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (CNRH, 2012a; CNRH 2012b). O DNPM, decorrendo-se dos esforços para regulamentação da lei para barragens de mineração, emitiu em 2012 a Portaria nº 416/2012, referente aos critérios mínimos do PSB, RPSB, ISR e Inspeções de Segurança Especiais (ISE), e em 2013 a Portaria nº 526, estabelecendo a periodicidade de atualização e o conteúdo mínimo dos Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM) (DNPM, 2012; DNPM, 2013). A ANEEL, em complementação a regulamentação das barragens do setor elétrico, publicou no ano de 2015 a Resolução nº 696, determinando critérios para classificação, formulação do PSB e realização da RPSB em barragens fiscalizadas pelo órgão (ANEEL, 2015).

Estabelecida uma fase inicial de regulamentação dos principais órgãos federais de fiscalização de barragens e frente aos desdobramentos do desastre de Mariana – MG (2015) associado a experiência adquirida e aos desafios observados após os primeiros anos de implementação da Lei 12.334/10, uma sequência de atualizações e complementações ocorreram (NAVA, 2018). Dentre as principais publicações é importante destacar: a Resolução CNRH nº 178/2016, que alterou a Resolução CNRH nº 144/2012, e os documentos de regulamentação completa dos dispositivos legais imputados as barragens de usos múltiplos de água (em nível federal) e de mineração, representados pela Resolução ANA nº 236/2017 e Portaria DNPM nº 70.389/2017, respectivamente (CNRH, 2016; ANA, 2017a; DNPM, 2017). Ainda, frente aos acontecimentos do desastre de Brumadinho – MG (2019), a Agência Nacional de Mineração (ANM), sucessora do extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), através de um conjunto de resoluções estabeleceu importantes critérios para elaboração dos estudos de rompimentos de barragens, identificação de vulnerabilidades da população e avaliação da conformidade e operacionalidade dos Planos de Ação de Emergência para Barragens de

Mineração (PAEBM) (ANM, 2020a; 2020b). Este conjunto de alterações, por fim, foi absorvido pela Resolução ANM nº 95/2022, documento que atualiza e consolida a Portaria DNPM nº 70.389/2017 (ANM, 2022) e as demais resoluções emitidas pela agência.

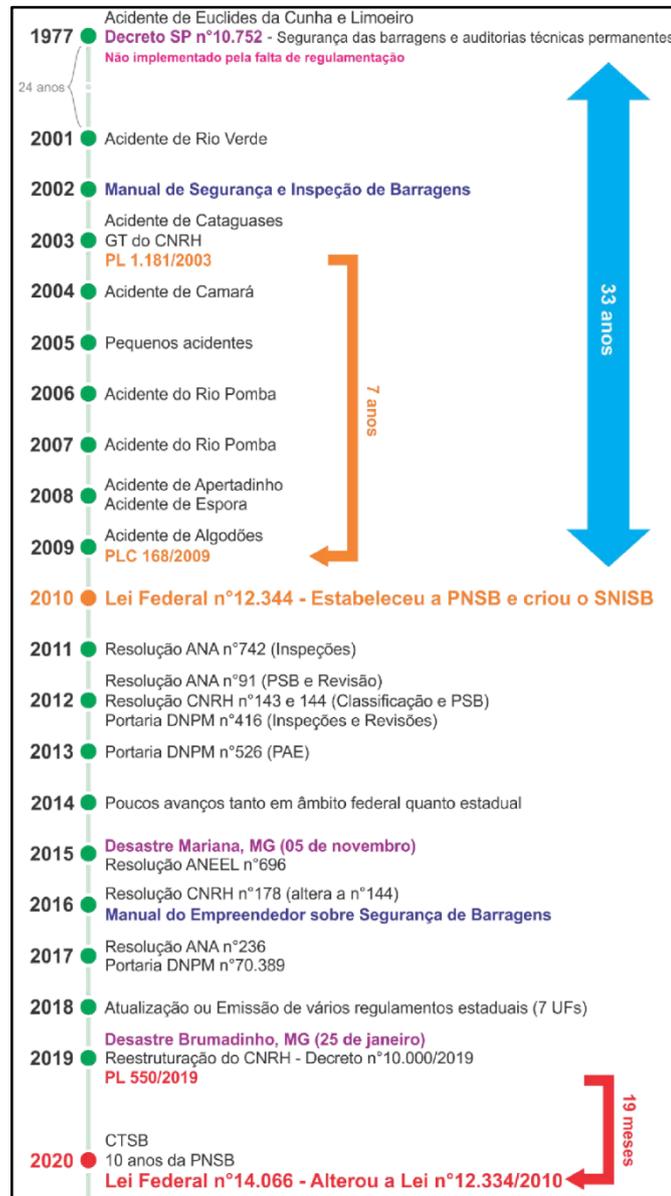
Complementarmente as regulamentações supracitadas, no contexto do avanço da segurança de barragens no país, é válido também destacar as ações de capacitação e criação de documentação técnica executadas pela ANA, com ênfase na criação dos Manuais do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, na reestruturação do CNRH, por meio do Decreto Nº 10.000/2019, que dentre diversas medidas criou a Câmara Técnica de Segurança de Barragens (CTSB), e na regulamentação da Lei nº 12.334/2010 pelos órgãos estaduais fiscalizadores de barragens de usos múltiplos (BRASIL, 2019b; ANDREETTA, 2020).

Conforme elucidado, uma representação da linha do tempo com os principais acidentes ocorridos e marcos regulatórios na legislação federal brasileira de segurança de barragens é ilustrado na Figura 3.1.

Com base nas informações apresentadas, verifica-se que tanto a lei federal quanto as resoluções das agências reguladoras apresentam de forma clara o conteúdo mínimo necessário para elaboração dos instrumentos constantes nos planos de segurança de barragens. A maior lacuna, entretanto, reside na falta de detalhamento de normas e metodologias mínimas, em especial em relação a construção dos estudos de ruptura hipotética e verificação das consequências associadas a inundação. Um primeiro avanço na solução do tema foi alcançado após a publicação do “Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE” (ANA, 2016). Nesse contexto, ANA (2016) sugere a utilização de modelos hidrodinâmicos internacionalmente reconhecidos para a aplicação, como o modelo HEC-RAS e o modelo DAMBRK. Quanto a simulação do processo de formação de brechas, o guia indica a adoção de valores característicos conservadores, com dimensões geométricas significativas e célere tempo de formação, conforme recomendações de USBR (1989) para barragens de diferentes materiais.

Frente as referidas diretrizes, Lara (2016) destaca que a utilização de aproximações determinísticas dos parâmetros associados à formação da brecha pode incorrer em problemas práticos de engenharia. Parâmetros conservadores de formação de brecha de ruptura podem impactar de maneira importante o custo da infraestrutura necessária durante situações de emergência.

Figura 3.1 – Principais acidentes ocorridos e marcos regulatórios na legislação federal brasileira de segurança de barragens



Fonte: Andretta (2020), adaptado pelo autor

Este conservadorismo em excesso pode levar ao fechamento de importantes rotas de fuga e até a emissão desnecessária de alertas. Da mesma forma, uma análise conservadora pode incorrer em conclusões equivocadas, como a indicação de projeto para aumento da capacidade de descarga das estruturas hidráulicas e até mesmo o alteamento do barramento. Tal conservadorismo pode também induzir a tomadas de decisão pouco efetivas por parte de gestores e fiscalizadores. Nesse mesmo contexto, Goodell (2012) aponta que a execução de análises de sensibilidade sobre os parâmetros de formação da brecha de ruptura possibilita o entendimento e a representação de uma faixa inundável mais realista e provável sobre o vale à

jusante da barragem. Como exemplo, estudos de Goodell & Froehlich (2012) indicaram diferenças de até 190%, na extensão da área inundada, entre estudos determinísticos, gerados pelo emprego direto de equações empíricas e recomendações de engenharia, e estudos embasados na abordagem probabilística.

Quanto ao processo de identificação dos pontos vulneráveis a jusante (edificações e infraestruturas) e de verificação das consequências de interação com a onda de ruptura, ANA (2016) traz como recomendações um conjunto de diretrizes para caracterização geral do vale a jusante, confecção dos mapas de inundação e delimitação e descrição da zona de Autossalvamento (ZAS). O documento, todavia, não apresenta elementos com referência a análises da expectativa de perda de vida dos cenários simulados.

Assim, para desenvolvimento do presente item, torna-se necessário retomar a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Em seu Artigo 3º, a política indica que seu objetivo é assegurar a manutenção dos padrões de segurança, regulamentar ações e padrões e promover o monitoramento e acompanhamento das ações desenvolvidas pelos empreendedores de barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, especialmente junto à população potencialmente afetada. Para execução das ações previstas, a referida legislação prevê em seu Artigo 6º a existência de diferentes instrumentos.

Visto ser o item cuja avaliação do potencial de perda vidas apresenta-se de forma mais explícita, o instrumento de Sistema de Classificação de Barragens merece especial atenção. Conforme artigo 7º da PNSB (BRASIL, 2010), as barragens deverão ser classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Assim, conforme discriminado na Resolução CNRH nº 143/2012 (CNRH, 2012), a classificação por Categoria de Risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Da mesma forma, a classificação por categoria de Dano Potencial Associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perda de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

Relativamente ao Dano Potencial Associado (DPA), CNRH (2012) define como o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau

funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência. A respectiva avaliação é baseada na pontuação de parâmetros associados ao volume do reservatório, potencial de perda de vida, impactos socioeconômicos e impactos ambientais decorrentes de um evento de rompimento de barragem.

Avaliando o sistema brasileiro de classificação de barragem, BM (2021a) destaca que a metodologia adotada, embora forneça indicações dos níveis potenciais de risco que podem estar associados ao rompimento, não quantifica o risco das consequências de falha. Comumente denominada de Indexação de Riscos, a presente abordagem deve ser compreendida como uma ferramenta básica de análise preliminar de risco em um portfólio de barragens, que pode necessitar de complementações por métodos mais avançados, a depender do tipo e do risco potencial associado dos barramentos avaliados.

Assim, embora as informações geradas pela indexação de riscos (ou “Sistema de Classificação”) sejam de grande utilidade para uma triagem preliminar ou para classificação de barragens de maior risco em um grande portfólio, é recomendável que as estruturas críticas identificadas sejam sujeitas a avaliações mais detalhadas, permitindo a obtenção de informações que levam a adoção de ações corretivas e mitigadores (BM, 2021a). Neste contexto, metodologias de previsão probabilísticas de brecha de ruptura e de estimativa de perda de vidas humanas podem desempenhar fundamental papel na avaliação quantitativa dos riscos associados a ruptura dos barramentos.

### 3.2 MODELAGEM DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Em termos gerais, o processo de modelagem de rompimento de barragens possui um conjunto de etapas consolidadas (FERC, 2014a). Primeiramente, deve-se realizar uma análise dos possíveis modos de falha da estrutura, definindo-se os cenários hipotéticos factíveis de ocorrência da ruptura. Posteriormente, realiza-se uma previsão dos processos de formação e desenvolvimento da brecha no maciço da barragem, levando a determinação do hidrograma de rompimento. Por fim, calcula-se a propagação da onda de cheia pelo vale a jusante da barragem.

Nos subcapítulos seguintes será apresentada uma revisão bibliográfica das principais diretrizes consideradas em cada uma das etapas de construção de um estudo de rompimento hipotético de barragem.

### 3.2.1 Avaliação do Modo de Falha e dos Cenários de Ruptura Hipotética

Se por um lado as etapas para realização da modelagem de rompimento de barragens são bem definidas, verifica-se que as principais incertezas se assentam na definição dos cenários de ruptura. Dependendo do tipo de barragem e das condições específicas do local, uma barragem pode ser suscetível a rompimento por várias causas. Também, a forma da ruptura e o momento de rompimento estão associados ao tipo de material de construção do barramento. Conforme CDA (2007), barragens de gravidade de concreto tendem a ter uma ruptura parcial, a medida em que normalmente ocorre a falha de uma ou mais seções do monólito formadas durante a construção, enquanto barragens em arco tendem a falhar repentina e completamente. As barragens de aterro, por outro lado, geralmente não apresentam uma ruptura completa ou repentina, tendendo a romper até o ponto onde o reservatório se esgota ou até a localização onde os materiais rompidos resistem à erosão.

Nos Estados Unidos, de forma a ilustrar numericamente, cerca de 656 barragens romperam entre os anos de 1975 e 2011 (NPDM, 2011). As causas mais recorrentes de falha foram devido a eventos de galgamento (70,9%), seguido por ocorrências de *piping* (14,3%), conforme dados apresentados na Tabela 3.1. Mundialmente, ICOLD (2019) relata que as principais causas de acidentes em barragens são devidas a insuficiência da capacidade dos órgãos de descarga (vertedouro e descarregador de fundo), seguidas por problemas estruturais ou de erosão das fundações, dados que se alinham as estatísticas observadas nos EUA. Em escala nacional, Tschiedel *et al.* (2019) apontam a falta de esclarecimento quanto ao histórico de rompimentos, havendo apenas esforços individuais de pesquisadores na integração dos dados dos eventos já catalogados. Quantitativamente, desde 1950 foram documentados 39 casos de rompimentos de barragens brasileiras, dos quais 20 (51%) foram observados somente na década de 2010.

Tabela 3.1 – Número de Falha de Barragens entre nos anos de 1975 e 2011 nos Estados Unidos

<b>Modo de Falha</b>	<b>Número de Barragens</b>	<b>Porcentagem</b>
Galgamento	465	70,9%
<i>Piping</i>	94	14,3%
Estrutural	12	1,8%
Humano	4	0,6%
Ação animal	7	1,1%
Vertedouro	11	1,7%
Erosão / Escorregamento / Instabilidade	13	2,0%
Desconhecido	32	4,9%
Outros	18	2,7%
<b>Total</b>	<b>656</b>	<b>100%</b>

Fonte: NPDM (2011), adaptado pelo autor

FEMA (2013) sugere que as diversas causas existentes podem ser resumidas em cinco principais de modos de falha: (i) hidrológico; (ii) geológico; (iii) estrutural; (iv) sísmico; e (v) humano. Um resumo e exemplificação dos principais modos de falha é apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Resumo dos principais modos de falha de barragens

<b>Modo de Falha</b>	<b>Exemplos de Falhas de Barragens</b>
<b>Hidrológico</b>	Galgamento devido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto inadequado das estruturas de vertimento</li> <li>• Obstrução das estruturas extravasoras</li> <li>• Perda de borda livre</li> <li>• Sobretensão estrutural dos componentes da barragem</li> </ul>
	Erosão superficial devido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidade da água</li> <li>• Ação de ondas</li> </ul>
<b>Geológico</b>	<i>Piping</i> e erosão interna causados por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rachaduras internas, fraturas hidráulicas ou assentamento diferencial;</li> <li>• Filtros inadequados;</li> <li>• Falha dos drenos;</li> <li>• Orifícios no corpo do aterro formados por raízes ou tocas de animais / insetos.</li> </ul>
	Instabilidade dos taludes e fraturamento hidráulico: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excedência da resistência ao deslizamento na base ou nas juntas da estrutura devido ao carregamento.</li> </ul>
<b>Estrutural</b>	Barragem de concreto: Falha de componentes estruturais críticos. Barragem de aterro: Falha da face de montante ou jusante.
<b>Sísmico</b>	Terremotos e/ou movimento do solo; Liquefação da fundação ou dos materiais do aterro.
<b>Humano</b>	Falhas de operação: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento repentino no nível do reservatório;</li> <li>• Incidentes, incluindo falhas das estruturas extravasoras, interrupção de energia, etc.</li> </ul>
	Ações Terroristas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação indevida proposital da barragem;</li> <li>• Impacto de objetos que removam parte da crista da barragem</li> </ul>

Fonte: FEMA (2013), adaptado pelo autor

Uma vez avaliados os modos de falha, torna-se necessário a definição das condições hidrológicas, tanto no reservatório da barragem, como no vale situado a jusante. São diversas as recomendações de cenários representativos para estudos de ruptura existentes na literatura. ANA (2016), como exemplo, recomenda a construção do menor número possível de cenários, devendo-se dar prioridade para três principais condições:

1. **Cenário de Operação Hidráulica Extrema:** Consideração de um evento de cheia que leva o sistema extravasor da barragem a um funcionamento em condições críticas, sem, entretanto, ocorrer o colapso da estrutura. Este cenário pode dar origem a descargas importantes e, de igual forma, colocar em risco pessoas e bens no vale a jusante;
2. **Cenário de Ruptura mais Provável:** Construído pelo estabelecimento de critérios em função da causa mais provável de ruptura, podendo-se admitir:
  - a. Cenário de ruptura em “dia de sol”, definido pela ocorrência de uma ruptura por mecanismos estruturais ou por percolação, onde a onda de cheia é proveniente somente do volume liberado pela ruptura da barragem, desconsiderando-se o hidrograma natural afluente ao reservatório;
  - b. Cenário de ruptura por galgamento, definido por uma ruptura por mecanismo hidráulico onde a cota do reservatório ultrapassa o nível máximo *maximorum*, conduzindo ao colapso de parte da estrutura do barramento.
3. **Cenário de Ruptura Extremo:** Concebido por meio do agravamento das condições de formação da brecha de ruptura e de maximização das aflúências ao reservatório. Comumente, é o cenário que define as envoltórias máximas esperadas para as áreas de risco a jusante, sendo utilizado para a construção dos sistemas de alerta e dos planos de ação de emergência

Buscando uma melhor compreensão dos modos de falha e definição dos cenários de ruptura, USACE (2014) indica a realização de uma Análise de Potenciais Modos de Ruptura (APMR). Conforme WB (2021), o APRM é um processo utilizado para identificar, descrever e avaliar sistematicamente as maneiras pelas quais uma barragem e suas estruturas adjacentes podem falhar sob condições de carregamento postuladas. Este método vem sendo recomendado desde 2002 pela Comissão Reguladora de Energia Federal dos EUA (U.S. Federal Energy Regulatory Commission – FERC) para barragens hidrelétricas de empreendimentos privados nos Estados Unidos. Uma descrição mais detalhada do processo é realizada no Capítulo 3.3.

FERC (2014a) prescreve que o grau de avaliação necessário para definição dos impactos do rompimento da barragem dos cenários identificados deve variar conforme: (i) potencial de risco a jusante; (ii) tamanho do reservatório; (iii) tipo de barragem; e (iv) propósito do estudo. A extensão dos cálculos e da avaliação das áreas impactadas deve prosseguir até que sejam geradas informações suficientes para se chegar a uma decisão acertada ou que, ao menos,

haja um suficiente entendimento das consequências da ruptura. Uma abordagem em níveis de esforço, conforme ilustrado no Quadro 3.2, é adotada pelo órgão. A medida em que as consequências previstas ditam o nível de avaliação necessário, os níveis de esforço devem ser ajustados conforme propósito do estudo.

Quadro 3.2 – Níveis de esforço para avaliação de rompimento de barragens

<b>Nível de Esforço</b>	<b>Estimativa dos Parâmetros de Brecha e do Hidrograma de Ruptura</b>	<b>Modelos Numéricos</b>	<b>Regime de Simulação Numérica</b>	<b>Produto Resultante da Avaliação</b>
Simplificado	Equações empíricas	SMPDBRK, HEC-1, HEC- HMS, SITES/WinDamB, HEC-RAS	Permanente ou Propagação Hidrológica	Tabela de seções transversais críticas
Típico	Equações empíricas ou modelos fisicamente embasados	HEC-RAS, SITES/WinDamB	Não-Permanente	Tabela de seções transversais críticas, manchas de inundação com mapa de base em SIG
Avançado	Equações empíricas, modelos fisicamente embasados ou aproximações por modelos probabilísticos, usando Monte Carlo na determinação dos parâmetros da brecha	FLO2D, Mike 21, HEC-RAS, Riverflow2D	Não-Permanente	Manchas de inundação com mapas de base de alta resolução em SIG, produzidos a partir de levantamentos de alta resolução

Fonte: FERC (2014a), adaptado pelo autor

Assim, para a estimativa de consequências em um nível simplificado, em barragens com pequenas incertezas dos possíveis impactos, admite-se razoável a utilização de equações empíricas de ruptura. Contudo, para cenários de maior complexidade, modelos fisicamente embasados e análises probabilísticas necessitarão ser executadas para verificação dos possíveis modos de falha.

### 3.2.2 Análise de Formação da Brecha de Ruptura

As incertezas associadas à precisão dos dados de entrada nos estudos de rompimento de barragens podem gerar significativas variações nos resultados obtidos ao final das simulações. Segundo resultados e argumentações levantados por Zagonjulli (2007), Wahl (2010) e Goodell (2012), a configuração da brecha de ruptura é uma das principais variáveis determinantes da forma e intensidade do hidrograma formado a jusante. Complementarmente, Souza (2016), Kuhlkamp (2016) e Tschiedel (2017) afirmam que embora os hidrogramas gerados a partir de diferentes configurações de brecha tendam a convergir para valores

semelhantes no vale a jusante, as diferenças são significativamente maiores nas seções próximas à barragem.

Para condução da análise de formação da brecha de ruptura, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos métodos disponíveis para simulação (Seção 3.2.2.1) e das diretrizes existentes para definição dos parâmetros de formação (Seção 3.2.2.2).

### 3.2.2.1 Método para Simulação da Formação da Brecha

Um processo de análise de brecha de ruptura pode desprender diferentes níveis de esforço, com base nas informações existentes, tempo disponível e complexidade técnica. Collischonn e Tucci (1997) definem 5 principais métodos que podem ser utilizados para simulação da formação da brecha, conforme apresentado no Quadro 3.3. De modo geral, as metodologias alternam de aplicações simplificadas, com a utilização de equações de regressão de eventos passados para definição de vazões de pico ou para caracterização paramétrica da brecha, até a aplicações de maior complexidade, com a avaliação do processo de erosão do barramento.

Quadro 3.3 – Métodos para simulação da formação da brecha de ruptura de barragens.

Método	Descrição
Hidrograma de Ruptura Estimado	Método mais simplificado onde obtém-se um hidrograma de ruptura a partir de estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório.
Evolução Pré-Determinada de uma Brecha (Método Paramétrico)	Método amplamente utilizado onde simula-se a evolução de uma brecha de forma pré-determinada com base nos parâmetros de tempo de formação e dimensões máximas.
Evolução por Erosão Simplificada	Técnica utilizada especialmente em barragens de terra onde leva-se em consideração a erosão do material da barragem por meio do emprego de uma expressão de descarga sólida associada a aspectos hidráulicos simplificados, geralmente por meio da utilização de uma equação de vertedor de soleira espessa.
Evolução por Erosão Completa	Metodologia mais robusta, onde combinam-se as equações hidrodinâmicas com as equações de descarga sólida.

Fonte: Collischonn & Tucci (1997), adaptado pelo autor

Embora sejam diversas as metodologias envolvendo a formação e evolução da brecha em um barramento, no âmbito deste trabalho será dado enfoque para a metodologia de “Evolução Pré-Determinada” (ou método paramétrico) existente no HEC-RAS, modelo hidrodinâmico escolhido para ser empregado no estudo. Conforme USACE (2014), as seguintes informações são necessárias para descrição da brecha no HEC-RAS:

- **Posição:** posicionamento do centroide da brecha ao longo do eixo longitudinal da estrutura do barramento;

- **Modo de Ruptura:** definição do mecanismo de ruptura por galgamento ou *piping*;
- **Formato:** cota, largura da base e declividade do prisma que representa a brecha de ruptura;
- **Tempo:** intervalo estimado para desenvolvimento completo da brecha;
- **Gatilho de Ruptura:** indicação do parâmetro a ser observado pelo modelo que estabelecerá o início da ruptura. Este parâmetro pode ser definido a partir de um tempo específico, uma determinada cota do reservatório ou uma combinação dos dois fatores;
- **Coefficientes de Descarga:** definição do coeficiente de descarga associado à brecha. Nos mecanismos de ruptura por galgamento e *piping*, coeficientes hidráulicos associados ao corpo da barragem e ao orifício formado devem ser indicados para cálculo das descargas.

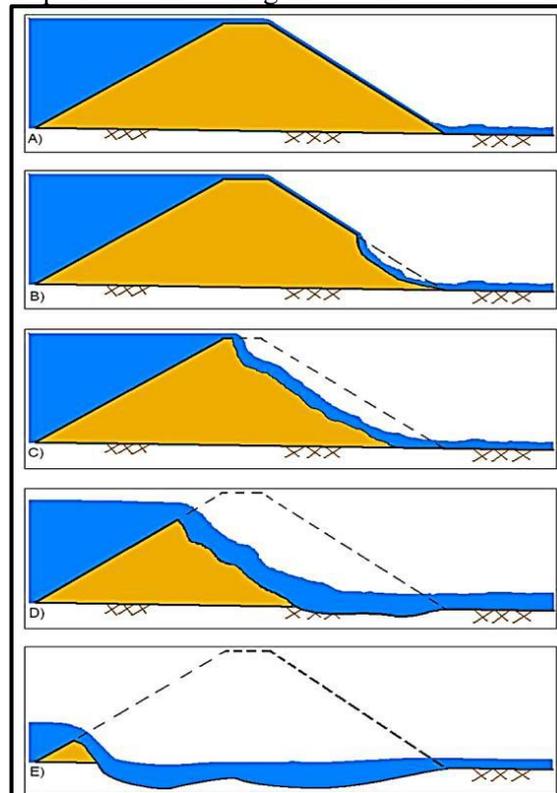
Nota-se que apenas dois modos de ruptura podem ser definidos no HEC-RAS: (i) galgamento; ou (ii) *piping*, devendo os demais modos serem simulados com base nesses dois mecanismos. Lara (2016) expõe que tal conceitualização numérica não impede que outras formas de ruptura sejam representadas pelo modelo, sendo importante que o engenheiro responsável pelo desenvolvimento do estudo tenha esclarecimento que as possibilidades numéricas de representação de um determinado fenômeno são mais versáteis do que o preconizado pelo arranjo matemático de determinada formulação.

Em relação as incertezas associadas aos parâmetros de representação do processo de formação da brecha, USACE (2014) destaca que os coeficientes hidráulicos de descarga associados ao corpo da barragem e ao orifício formado pelo processo de *piping* afetam diretamente a magnitude dos hidrograma de ruptura. Como não há um entendimento exato do valor destes parâmetros ao longo da ocorrência de uma ruptura, torna-se necessária a compreensão dos processos básicos de falha (galgamento e *piping*) para determinação destes coeficientes.

FEMA (2013) coloca que as rupturas por galgamento podem ocorrer por diversas maneiras, a depender da composição do barramento. Para um caso de ruptura em uma barragem de terra, o processo inicia-se pela erosão do pé de talude de jusante e avança regressivamente em direção ao centro da barragem, alargando-se com o tempo (Figura 3.2). Numericamente, o início da ruptura é definido quando a erosão alcança a crista do barramento e, a partir disso, aumenta até sua extensão final em um formato trapezoidal (Figura 3.3).

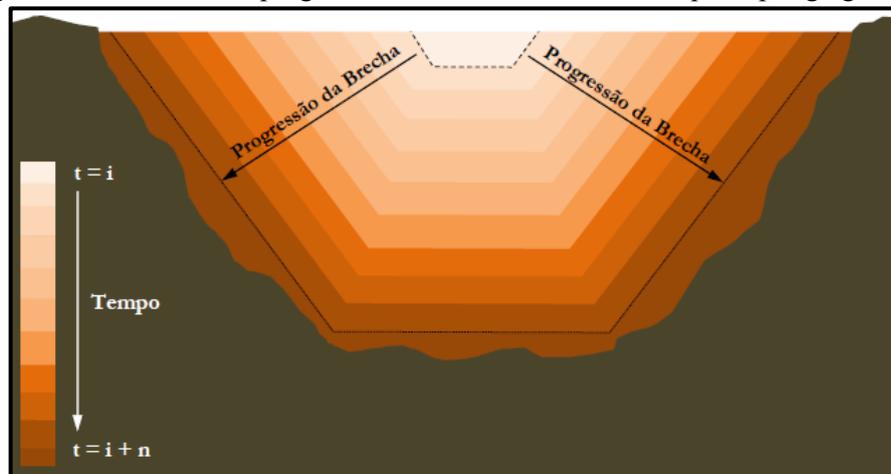
USACE (2014) descreve que no modelo o fluxo de água passando sobre a crista é inicialmente representado como um escoamento em vertedouro de soleira espessa. A medida em que a erosão atinge o topo do barramento, há um encurtamento do comprimento da crista, levando a coeficientes de descarga hidráulico de escoamento em soleiras delgadas. Ao passo em que a erosão progride a montante do barramento e alarga-se, o coeficiente de descarga tende a retornar para faixa de escoamento em vertedouro de soleira espessa.

Figura 3.2 – Estágios de ruptura de uma barragem de terra devido ao mecanismo de galgamento



Fonte: USACE (2014), adaptado pelo autor

Figura 3.3 – Formato de progressão da brecha em casos de ruptura por galgamento



Fonte: CWC (2018), adaptado pelo autor

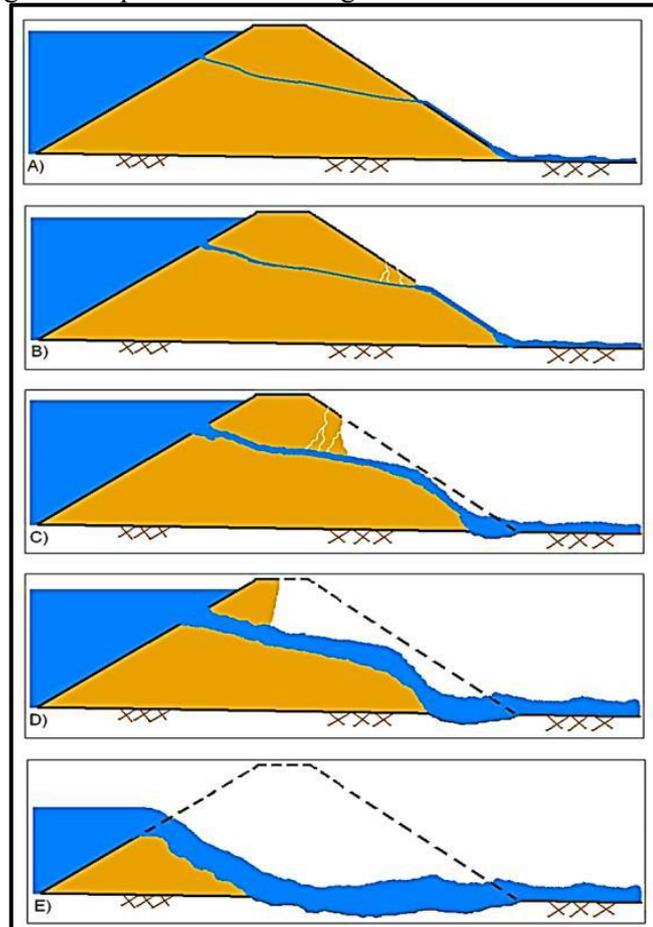
Segundo Gee (2009), a progressão de crescimento da brecha tende a cessar a medida em que ocorre o esvaziamento do reservatório ou em que o processo erosivo tenha consumido o barramento até a sua base ou atingido o leito rochoso. Em termos numéricos, há duas formas disponíveis para modelar a progressão da brecha no HEC-RAS: (i) progressão linear, onde a taxa de erosão permanece a mesma durante o desenvolvimento da brecha; e (ii) progressão senoidal, onde a brecha cresce lentamente no início e no final do desenvolvimento e rapidamente no meio do processo.

Os casos de ruptura por formação de *piping*, por sua vez, ocorrem quando há o desenvolvimento de um processo de infiltração concentrada no interior de uma barragem de aterro. Conforme FEMA (2013), a infiltração erode lentamente o maciço do barramento, deixando grandes vazios no solo. O fenômeno de *piping* normalmente inicia-se junto ao pé do talude de jusante e segue em direção ao reservatório. À medida em que os vazios se tornam maiores, a vazão e o transporte de material aumentam. Uma vez que o processo erosivo atinge o reservatório, o caminho preferencial criado pelo *piping* pode aumentar e causar o colapso da crista da barragem (Figura 3.4).

Numericamente, as falhas por mecanismo de *piping* são normalmente modeladas em duas fases: antes e depois do colapso da crista. A vazão através do *piping* é modelada por meio de equações de orifício pressurizado, antes do colapso, e através de equações de vertedouro de soleira livre após o colapso da crista da barragem (USACE, 2014). Geometricamente, CWC (2018) descreve que a ruptura por *piping* expande-se gradualmente como uma abertura circular e, à medida em que atinge o topo do barramento, converte-se para um formato trapezoidal (Figura 3.5).

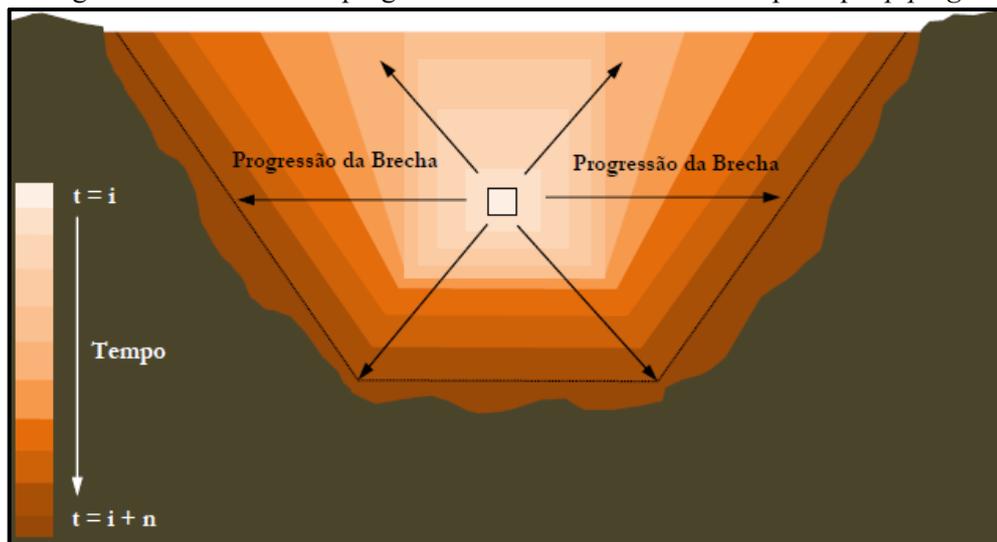
Quanto a representação paramétrica da geometria da brecha no modelo HEC-RAS, três principais variáveis são consideradas: (i) largura da base; (ii) altura; e (iii) inclinação lateral (Figura 3.6). É importante atentar que as dimensões a serem indicadas devem ser referentes ao tamanho final da brecha. Ainda, em virtude da dificuldade de descrição dos processos ruptura, USACE (2014) sugere que sejam adotados valores médios de coeficientes de descargas associados ao corpo do barramento (galgamento) e ao *piping* que representem o evento. Para tanto, é indicado que seja avaliado o material construtivo do barramento e a fase de desenvolvimento da brecha em que se espera a maior ocorrência de escoamento (Tabela 3.2).

Figura 3.4 – Estágios de ruptura de uma barragem de terra devido ao mecanismo de *piping*



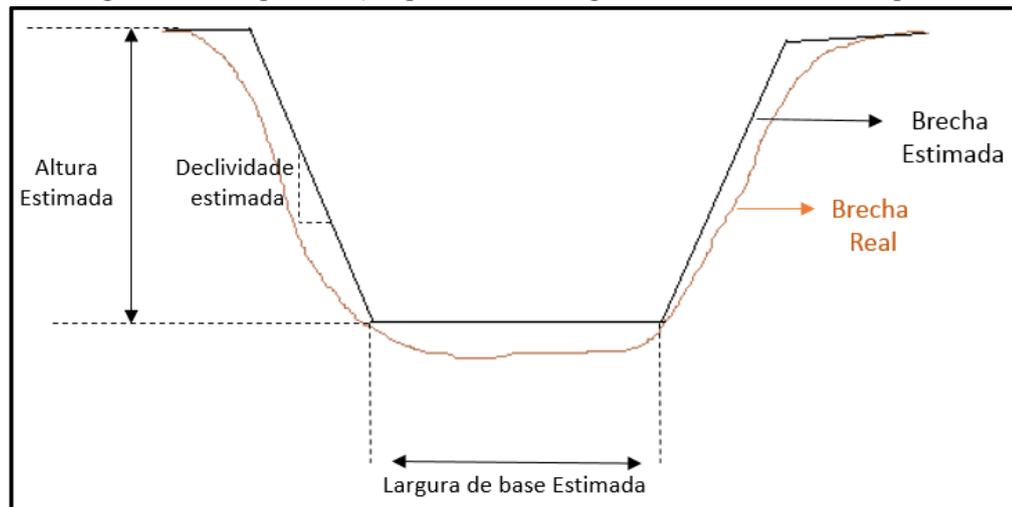
Fonte: USACE (2014), adaptado pelo autor

Figura 3.5 – Formato de progressão da brecha em casos de ruptura por *piping*



Fonte: CWC (2018), adaptado pelo autor

Figura 3.6 – Representação paramétrica da geometria da brecha de ruptura



Fonte: Tschiedel (2017), adaptado pelo autor

Tabela 3.2 – Sugestões de coeficientes de descarga para rupturas de barragem por mecanismos de galgamento e *piping*

<b>Tipo de Barragem</b>	<b>Coefficiente de Descarga para Galgamento</b>	<b>Coefficiente de Descarga para <i>Piping</i></b>
Barragem de Terra Homogênea ou com Núcleo de Argila	1,1 – 1,8	0,5 – 0,6
Barragem de Enrocamento	1,1 – 1,6	0,5 – 0,6
Barragem de Concreto em Arco	1,7 – 1,8	0,5 – 0,6
Barragem de Concreto de Gravidade	1,1 – 1,6	0,5 – 0,6

Fonte: USACE (2014), adaptado pelo autor

### 3.2.2.2 Definição dos Parâmetros de Formação da Brecha para o Método Paramétrico

As dimensões da brecha de ruptura e o respectivo tempo de formação devem ser estimados fora do software HEC-RAS e inseridos no programa. Wahl (2010) destaca que a partir de vários eventos envolvendo o colapso de maciços ao longo da história, foi possível realizar a coleta de uma grande quantidade de dados relativos às características finais de brechas, tornando possível a predeterminação de possíveis faixas de variação de parâmetros com base no tipo de barramento. Tanto a nível nacional (ELETROBRAS, 2003; ANA, 2016), quanto a nível internacional (FEMA, 2013; FERC, 1993; USACE, 2007) são diversas as publicações de agências reguladoras de barragens indicando os possíveis intervalos de largura, inclinação e tempo de desenvolvimento esperados para formações de brechas (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Faixas sugeridas por agências nacionais e internacionais para os parâmetros de formação de brecha de ruptura, onde H = altura da barragem; e L = comprimento da crista da barragem

Tipo de Barragem	Largura da Brecha	Componente Horizontal da Declividade Lateral da Brecha (H:V)	Tempo de Formação da Brecha [horas]	Referência
Terra e Enrocamento	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	ELETROBRÁS (2003)
	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0,25 e 1	0,5 a 3,0	ANA (2016)
	(0,5 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 4,0	FEMA (2013)
	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	FERC (1993)
	(0,5 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 4,0	USACE (2007)
Concreto Gravidade	Usualmente $\leq 0,5 L$	Vertical	0,1 a 0,3	ELETROBRÁS (2003)
	Usualmente $\leq 0,5 L$	Vertical	0,1 a 0,3	ANA (2016)
	Blocos monolíticos	Vertical	0,1 a 0,5	FEMA (2013)
	Usualmente $\leq 0,5 L$	Vertical	0,1 a 0,3	FERC (1993)
	Blocos monolíticos	Vertical	0,1 a 0,5	USACE (2007)
Concreto em Arco		Entre 0 e a declividade do vale		
	L	Entre 0 e a declividade do vale	< 0,1	ELETROBRÁS (2003)
	(0,8 a 1,0) x L	Entre 0 e a declividade do vale	< 0,1	ANA (2016)
	L	Entre 0 e a declividade do vale	< 0,1	FEMA (2013)
	L	Entre 0 e a declividade do vale	< 0,1	FERC (1993)
	(0,8 a 1,0) x L	Entre 0 e a declividade do vale	< 0,1	USACE (2007)

Fonte: Eletrobrás (2003); ANA (2016); USACE (2014), adaptado pelo autor

Equações empíricas de formação de brecha foram também desenvolvidas pela comunidade científica. Conforme USACE (2014), tais estudos foram derivados de dados de barragens de terra e enrocamento, não se aplicando a barragens de concreto. Esta condição deve-se a dificuldade técnica existente para predição dos parâmetros de formação de brecha nestas tipologias de barramento. Lara (2016) argumenta que, na fase construtiva, a heterogeneidade junto ao controle de qualidade dos materiais demanda maior perícia nos

procedimentos postulados em normas. Assim, a medida em que o controle de qualidade do concreto é mais facilmente observado, as incertezas envolvidas no processo de ruptura de uma barragem de aterro tendem a ser significativamente maiores.

É importante notar que a maioria das equações de regressão para estimativa dos parâmetros de formação da brecha de ruptura foram desenvolvidas estatisticamente, a fim de principalmente estimar os parâmetros de largura média e tempo de formação. Portanto, ao realizar-se uma análise de ruptura, deve-se atentar para a seleção de equações desenvolvidas com dados representativos da barragem em estudo. USACE (2014) alerta que o uso destas pesquisas deve ser feito com cautela, especialmente ao aplicá-las a grandes barragens, que muitas vezes se encontram fora da faixa de dados para os quais as equações foram desenvolvidas.

Segundo recomendações de FEMA (2013), USACE (2014) e CWC (2018), as principais equações de regressão disponíveis na literatura são: (i) Froehlich (1995); (ii) Froehlich (2008); (iii) Froehlich (2016); (iv) MacDonald e Langridge-Monopolis (1984); e (v) Von Thun & Gillette (1990). A Tabela 3.4 apresenta as principais faixas de informações utilizadas para desenvolvimentos das equações. Uma descrição das metodologias e um detalhamento das formulações matemáticas das equações de regressão é desenvolvido na sequência para esclarecimento de suas limitações de emprego.

Tabela 3.4 – Faixas de informações utilizadas para desenvolvimentos das equações de regressão de formação de brecha

<b>Referência</b>	<b>Número de Casos Estudados</b>	<b>Tipo das Barragens de Aterro Analisadas</b>	<b>Altura das Barragens Analisadas [metros]</b>	<b>Volume de Água no Reservatório no Momento da Ruptura [hm<sup>3</sup>]</b>
Froehlich (1995)	63	Terra Homogênea	3,66 a 92,96 (90% < 30 e 76% < 15)	0,013 a 660 (87% < 25 e 76% < 15)
		Terra Zoneada		
		Terra com Núcleo Impermeável (Argila)		
		Enrocamento		
Froehlich (2008)	74	Terra Homogênea	3,05 a 92,96 (93% < 30 e 81% < 15)	0,014 a 660 (86% < 25 e 82% < 15)
		Terra Zoneada		
		Terra com Núcleo Impermeável (Argila)		
		Enrocamento		

Referência	Número de Casos Estudados	Tipo das Barragens de Aterro Analisadas	Altura das Barragens Analisadas [metros]	Volume de Água no Reservatório no Momento da Ruptura [hm <sup>3</sup> ]
Froehlich (2016)	111	Terra Homogênea	2,10 a 86,90 (88% < 30 e 77% < 15)	0,014 a 660 (87% < 25 e 81% < 15)
		Terra Zoneada		
		Terra com Núcleo Impermeável (Argila)		
		Enrocamento		
MacDonald e Langridge–Monopolis (1984)	42	Terra Homogênea	4,27 a 92,96 (76% < 30 e 57% < 15)	0,004 a 660 (79% < 25 e 69% < 15)
		Terra com Núcleo Impermeável (Argila)		
		Enrocamento		
Von Thun e Gillette (1990)	57	Terra Homogênea	3,66 a 92,96 (89% < 30 e 75% < 15)	0,027 a 660 (89% < 25 e 84% < 15)
		Terra Zoneada		
		Terra com Núcleo Impermeável (Argila)		
		Enrocamento		

Fonte: USACE (2014), adaptado pelo autor

Froehlich (1995) utilizou dados de 63 casos de rompimento de barragens, compostos por barragens de terra e enrocamento. As faixas características de dados utilizados foram de barragens com altura entre 3,66 m e 92,96 m e com volume armazenado no momento da ruptura entre 0,013 hm<sup>3</sup> e 660hm<sup>3</sup>. Por meio do estudo, foram desenvolvidas um conjunto de equações de regressão que descrevem a largura média da brecha (Equação 1) e tempo de falha (Equação 2) previsto.

$$B_m = 0,1803 K_o V_w^{0,32} h_b^{0,19} \quad (1)$$

$$t_f = 0,00254 V_w^{0,53} h_b^{-0,90} \quad (2)$$

Onde  $B_m$  é a largura média da brecha [m];  $K_o$  é uma constante da equação (1,4 para rompimento por galgamento e 1,0 para rompimento por *piping*);  $V_w$  é o volume do reservatório no momento do rompimento [m<sup>3</sup>];  $h_b$  é a altura final da brecha de ruptura [m]; e  $t_f$  é o tempo total de formação da brecha [h].

Froehlich (1995) ainda indica que inclinações laterais médias das brechas devem ser de 1,4H:1,0V para rompimentos por galgamento e 0,9H:1,0V para demais tipos de rompimento (*piping*/erosão interna). USACE (2014) também destaca que o autor não deixa claro como identificar a variável de altura da brecha e recomenda que a avaliação seja feita por meio da diferença entre a cota do topo da barragem e a interface com o nível da superfície do solo onde localiza-se a brecha.

Froehlich (2008), empregando um maior número de dados, realiza uma atualização de suas equações de regressão. No presente estudo, foram utilizados dados de 74 casos de rompimento de barragens de terra e enrocamento, com características de altura variando entre 3,05 m e 92,96 m e de volume armazenado no momento da ruptura variando entre 0,0139 hm<sup>3</sup> e 660hm<sup>3</sup>. As relações de regressão obtidas pelo autor são apresentadas na Equação 3 e Equação 4.

$$B_m = 0,27 K_o V_w^{0,32} h_b^{0,04} \quad (3)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \quad (4)$$

Onde  $B_m$  é a largura média da brecha [m];  $K_o$  é uma constante da equação (1,3 para rompimento por galgamento e 1,0 para rompimento por *piping*);  $V_w$  é o volume do reservatório no momento do rompimento [m<sup>3</sup>];  $h_b$  é a altura final da brecha de ruptura [m];  $t_f$  é o tempo total de formação da brecha [s] e  $g$  é a aceleração da gravidade (9,806 m/s<sup>2</sup>).

Froehlich (2008) indica que as inclinações laterais médias das brechas sejam de 1H:1V para rompimentos por galgamento; e 0,7H:1,0V para demais tipos de rompimento (*piping*/erosão interna). Devido à falta de determinação do procedimento de determinação da altura da brecha, permanecem as recomendações de adoção da diferença entre a cota do topo da barragem e a interface com o nível da superfície do solo onde localiza-se a brecha (USACE, 2014).

Froehlich (2016), por fim, realiza novamente uma atualização de suas equações de regressão. Ao todo, foram utilizados dados de 111 casos de rompimento de barragens de terra e enrocamento, com características de altura variando entre 2,10 m e 86,90 m e de volume

armazenado no momento da ruptura variando entre 0,0139 hm<sup>3</sup> e 660hm<sup>3</sup>. A relações de regressão obtidas pelo autor são apresentadas na Equação 5 e Equação 6.

$$B_m = 0,23 K_0 V_w^{1/3} \quad (5)$$

$$t_f = 60 \sqrt{\frac{V_w}{g H_b^2}} \quad (6)$$

Onde  $B_m$  é a largura média da brecha [m];  $K_0$  é uma constante da equação (1,5 para rompimento por galgamento e 1,0 para rompimento por *piping*);  $V_w$  é o volume do reservatório no momento do rompimento [m<sup>3</sup>];  $H_b$  é a altura final da brecha de ruptura [m];  $t_f$  é o tempo total de formação da brecha [h] e  $g$  é a aceleração da gravidade (9,807 m/s<sup>2</sup>).

Froehlich (2016) indica ainda que as inclinações laterais médias das brechas sejam de 1,0H:1,0V para rompimentos por galgamento; e 0,6H:1,0V para demais tipos de rompimento (*piping*/erosão interna).

MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) utilizaram dados de 42 casos de rompimento de barragens, predominantemente de barragens de terra e enrocamento. As faixas características de dados utilizados foram de barragens com altura entre 4,27 m e 92,96 m e com volume armazenado no momento da ruptura entre 0,0037 hm<sup>3</sup> e 660 hm<sup>3</sup>. Em sua pesquisa, os autores trazem o conceito de “Fator de Formação de Brecha”, definido pelo produto entre o volume de água defluente e a altura de água sobre a barragem. Aplicando-se o fator, é proposta uma relação para estimativa do volume de material erodido do corpo do barramento (Equação 7 e Equação 8) e para o tempo de formação de brecha (Equação 9).

$$V_{erod} = 0,0261 (V_s h_w)^{0,769} \quad (\text{barragens de terra}) \quad (7)$$

$$V_{erod} = 0,00348 (V_s h_w)^{0,852} \quad (\text{barragens de terra com núcleo de argila ou barragens de enrocamento}) \quad (8)$$

$$t_f = 0,0179(V_{erod})^{0,364} \quad (9)$$

Onde  $V_{erod}$  é o volume de material erodido do corpo do barramento [ $m^3$ ];  $V_s$  é o volume de água que passa pela brecha ( $m^3$ );  $h_w$  é a profundidade de água acima da geratriz inferior da brecha [m]; e  $t_f$  é o tempo de formação da brecha [h].

Destaca-se que o valor de  $V_s$ , representado pelo volume de água que passa pela brecha, não é exatamente conhecido antes da realização da primeira análise. USACE (2014) sugere que a primeira estimativa seja feita com base no volume de água no reservatório no momento do rompimento. Uma vez definidos os conjuntos de parâmetros, a análise é realizada de maneira iterativa, de modo a buscar uma melhor aproximação do volume de d'água que passa através da área de brecha a medida em que evolui o evento.

Ainda, MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) preconizam que: (i) o formato da brecha de ruptura deve ser trapezoidal; (ii) as inclinações laterais médias das brechas devem ser de 0,5H:1,0V; (iii) o tamanho da brecha deve ser calculado assumindo-se que a erosão ocorre verticalmente até a fundação da barragem e horizontalmente até que a quantidade máxima de material tenha sido erodida ou que as ombreiras da barragem tenham sido alcançadas. Segundo Schaefer (1992), a largura da base da brecha pode ser calculada a partir da geometria da barragem por meio da Equação 10 e Equação 11.

$$W_b = \frac{V_{erod} - h_b^2 (CZ_b + h_b Z_b Z_3/3)}{h_b(C + h_b Z_3/2)} \quad (10)$$

$$Z_3 = Z_2 + Z_1 \quad (11)$$

Onde:  $W_b$  é a largura da base da brecha [m];  $h_b$  é a altura desde a crista até a geratriz inferior da brecha [m];  $C$  é a largura da crista da barragem [m];  $Z_b$  é inclinação lateral da brecha (0,5H:1V, conforme preconizado pelos autores);  $Z_1$  declividade horizontal da face de montante do corpo do barramento ( $Z_1:1$ ); e  $Z_2$  declividade horizontal da face de montante do corpo do barramento ( $Z_2:1$ ).

Von Thun e Gillette (1990) desenvolveram sua metodologia por meio da utilização de 57 casos previamente analisados pelos estudos de Froehlich (1987) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984). As faixas características de dados utilizados foram de barragens com altura entre 3,66 m e 92,96 m e com volume armazenado no momento da ruptura entre 0,027 hm<sup>3</sup> e 660 hm<sup>3</sup>. No trabalho, os autores propõem que as inclinações laterais médias das brechas sejam

de 1H:1V, com exceção para os casos de barramentos construídas com solos coesivos, onde então deve-se adotar inclinações laterais na ordem de 0,5H:1,0V a 0,33H:1,0V. A relação de regressão para estimativa da largura média da brecha é apresentada na Equação 12.

$$B_m = 2,5h_w + C_b \quad (12)$$

Onde:  $B_m$  é a largura média da brecha [m];  $h_w$  é a altura de água sobre a geratriz inferior da brecha [m]; e  $C_b$  é um coeficiente calculado em função do volume do reservatório [m], conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Sugestão de valores para o parâmetro  $C_b$  em função de faixas de volume de reservatórios

Volume do Reservatório [hm <sup>3</sup> ]	$C_b$ [m]
< 1,23	6,1
1,23 a 6,17	18,3
6,17 a 12,3	42,7
> 12,3	54,9

Fonte: Von Thun e Gillette (1990), adaptado pelo autor

Em relação ao tempo de formação de brecha, Von Thun e Gillette (1990) desenvolveram dois conjuntos de equações. O primeiro conjunto (Equação 13 e Equação 14) descreve o desenvolvimento da brecha apenas em função da profundidade de água sobre a geratriz inferior da brecha. O segundo conjunto (Equação 15 e Equação 16) utiliza, adicionalmente, a variável de largura média estimada para a brecha.

$$t_f = 0,02h_w + 0,25 \quad (\text{barragens resistentes a erosão}) \quad (13)$$

$$t_f = 0,015h_w \quad (\text{barragens facilmente erodíveis}) \quad (14)$$

$$t_f = \frac{B_m}{4h_w} \quad (\text{barragens resistentes a erosão}) \quad (15)$$

$$t_f = \frac{B_m}{4h_w + 61,0} \quad (\text{barragens facilmente erodíveis}) \quad (16)$$

Onde  $t_f$  é o tempo de formação da brecha [h];  $B_m$  é a largura média da brecha [m]; e  $h_w$  é a altura de água sobre a geratriz inferior da brecha [m].

Como é possível notar, a metodologia de Von Thun e Gillette (1990) estabelece diferentes equações para barragens resistentes a erosão e barragens facilmente erodíveis. Os autores sugerem que as duas variáveis sejam tratadas como limites superiores e inferiores correspondentes a barragens bem construídas com utilização de materiais resistentes a erosão e a barragens mal construídas com utilização de materiais de fácil erosão, respectivamente (USACE, 2014).

### 3.3 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE PREVISÃO DE BRECHA DE RUPTURA DE BARRAGENS

As análises de brecha de ruptura de barragem são utilizadas para estimar os riscos potenciais associados a uma falha da estrutura. Conforme apresentado na Seção 3.2, os modelos de previsão de brecha de ruptura de barragens normalmente são baseados em dados empíricos derivados de um conjunto de estudos de caso de falhas de barragens de terra e enrocamento. As equações empíricas disponíveis relacionam os parâmetros da brecha de ruptura às propriedades da barragem e do reservatório, como altura, material de construção e sua respectiva erodibilidade, volume armazenado e forma do reservatório.

Nesse contexto, FERC (2014a) destaca que as incertezas inerentes as estimativas de parâmetros de brecha não devem ser menosprezadas. Historicamente, estas incertezas tem sido avaliadas por meio da execução de uma série de possíveis conjuntos de parâmetros em uma análise de sensibilidade, de forma a melhor elucidar a gama de possíveis resultados de brechas de ruptura e identificar quão sensíveis são estes resultados em relação ao cenário base (determinístico) proposto.

De modo a desenvolver uma avaliação com base no risco de ocorrência de diferentes cenários, Goodell (2012) recomenda a abordagem probabilística para amostragem de conjuntos de parâmetros de formação de brecha de ruptura. Segundo FERC (2014a), a avaliação probabilística demanda a atribuição de uma função de densidade de probabilidade a cada um dos parâmetros incertos de rompimento. Estas funções podem ser definidas por diferentes distribuições estatísticas, como distribuições uniformes, normais (Gaussianas) e triangulares, por exemplo. Para examinar as equações preditivas dos parâmetros de ruptura que se aplicam à barragem avaliada, torna-se necessário o entendimento dos prováveis modos de falha e das condições do local, bem como necessita-se a utilização de um bom julgamento de engenharia

para aplicação de médias e variâncias que permitam a aproximação da realidade por meio de funções de densidade de probabilidade.

Após a atribuição destas funções, os parâmetros de brecha são amostrados aleatoriamente sobre suas distribuições predefinidas, de modo a se construir diferentes conjuntos de parâmetros. Cada conjunto é executado através do modelo de rompimento da barragem como um único evento modelado chamado de “realização”, e o valor do pico resultante do hidrograma de vazão do rompimento é armazenado. Este procedimento então é repetido utilizando-se o método de Monte Carlo até que seja alcançada a convergência estatística nos resultados, ou seja, a média e o desvio padrão do conjunto populacional de resultados possíveis deixa de mudar com as sucessivas realizações. O conjunto populacional de picos de vazão provenientes das configurações de brechas é então ordenado e classificado, e a cada valor é atribuída uma probabilidade de excedência. Essa informação, por fim, permite a preparação de mapas de probabilidade de excedência de inundação, em vez de mapas de inundação determinísticos. A Figura 3.7 apresenta um exemplo esquemático de um mapa de probabilidade de excedência de inundação.

Figura 3.7 – Modelo de mapa de probabilidade de excedência de inundação



Fonte: Própria do autor

De forma a conduzir a análise probabilística de previsão de brecha de ruptura de uma barragem, o presente trabalho propõe a utilização do procedimento de “Análise de Potenciais Modos de Ruptura” (APMR), para levantamento das prováveis formas de ruptura de uma barragem, e da ferramenta computacional MCBreach, para amostragem dos parâmetros de formação da brecha por meio de sua associação a modelos probabilísticos de distribuição de frequências e aplicação da técnica de Monte Carlo. No presente contexto, uma descrição: (i) do processo de Análise de Potenciais Modos de Ruptura; (ii) do software MCBreach; e (iii) da interface de comunicação com o modelo hidráulico HEC-RAS 5.0.7 é apresentado nas seções subsequentes.

### 3.3.1 Análise de Potenciais Modos de Ruptura

A Análise de Potenciais Modos de Ruptura (APMR), do inglês *Potential Failure Mode Analysis* (PFMA), é um processo utilizado para identificar, descrever e avaliar sistematicamente as maneiras pelas quais uma barragem e suas estruturas adjacentes podem falhar sob condições postuladas de carregamento (FERC, 2017).

Desde 2002, o procedimento da APRM figura-se como parte integrante das inspeções previstas pelo regulamento da Comissão Federal Reguladora de Energia dos EUA (*Federal Energy Regulatory Commission – FERC*) para empreendimentos hidroelétricos privados. Para sua execução, FERC (2017) apresenta uma descrição detalhada do processo, incluindo os principais objetivos e resultados típicos, revisão de informações básicas, inspeção de campo e condução de *workshops*, envolvendo sessões de “*brainstorming*” para identificar e avaliar possíveis modos de falha, consequências e medidas de mitigação. Em termos gerais, os principais objetivos da APRM são:

- I. Aprimorar o processo de inspeção de segurança de barragens, ajudando a focar nas áreas de preocupação mais críticas da barragem;
- II. Identificar os potenciais modos de ruptura relacionados a aspectos operacionais da barragem;
- III. Considerar os perigos de eventos naturais que podem afetar indiretamente a barragem;
- IV. Identificar potenciais modos de ruptura relacionados aspectos estruturais, como formação de *piping*, o qual não é abordado pelos métodos analíticos tradicionais de análise de estabilidade;
- V. Aprimorar e focalizar as atividades de inspeção visual e auscultação;

- VI. Identificar deficiências ou falhas nos dados, na apresentação das informações ou nas análises necessárias para avaliar a segurança da barragem e cada potencial modo de ruptura;
- VII. Ajudar a identificar as medidas de redução de risco mais eficazes; e,
- VIII. Documentar os resultados do estudo para subsidiar as atividades futuras de inspeções de segurança de barragens, bem como o desenvolvimento do estudo de formação de brecha.

Para execução da APRM, FERC (2017) indica o cumprimento dos seguintes requisitos:

1. Coletar todos os dados, estudos e informações sobre as investigações, projetos e construção da estrutura. Coletar todas as avaliações e análises anteriores de segurança da barragem, desempenho e operação do projeto, histórico de reparos e seu comportamento;
2. Realizar inspeção visual no local da barragem, com atenção aos potenciais modos de rupturas, condições estruturais e geológicas;
3. Identificar as instrumentações existentes; revisar a operação da estrutura; e entrevistar proprietários e operadores a fim de incorporar informações de suas opiniões sobre os potenciais modos de ruptura;
4. Avaliar todas as informações básicas para compreensão geral, mantendo em mente as seguintes perguntas específicas:
  - Como a barragem poderia romper?
  - O que aconteceria se a barragem rompesse?
  - Mesmo se a barragem não falhar, como uma grande descarga não planejada poderia ocorrer?
  - Existem outros reservatórios presentes na bacia do rio a montante que possam representar um risco para a barragem em questão?
  - Os potenciais modos de ruptura identificados são reconhecidos e monitorados adequadamente por inspeção visual ou por instrumentos de auscultação?
  - Que ações, imediatas ou a longo prazo, podem ser tomadas para reduzir a probabilidade de falha da barragem ou para mitigar as consequências da falha?

Para barragens de alto risco e dano potencial associado, é recomendada a condução da APRM por uma equipe principal de cinco ou mais, com expertise em diferentes áreas do conhecimento associadas a engenharia e segurança de barragens. Além da equipe técnica, é recomendável a participação no *workshop* dos operadores da barragem avaliada e de outras

responsáveis por barragens que podem afetar sua a operação, bem como de representantes de instituições interessadas.

Em relação à metodologia, o *workshop* deve envolver a identificação sistemática de potenciais modos de ruptura para condições normais e inundações. Os locais da barragem devem ser considerados como vários componentes discretos e analisados um de cada vez. Os cenários de falha deverão ser discutidos dentro da equipe e os registros deverão incluir os potenciais modos de ruptura identificados, as razões pelas quais cada um provavelmente ocorrerá e quaisquer ações possíveis relacionadas que possam ajudar a reduzir o risco. As análises deverão ser documentadas por meio do registro das principais descobertas e discussões da sessão de *brainstorming*.

Ainda, BM (2021b) sugere a possibilidade de execução da APMR em diferentes níveis de complexidade. Nesse contexto, em vários casos, torna-se necessário ou apropriado realizar uma avaliação rápida dos potenciais modos de ruptura, de forma que os princípios gerais do processo proposto por FERC (2017) sejam seguidos, mas com modificações para otimização do tempo e de recursos. Esta avaliação conduz a processos simplificados, que podem encontrar a sua legitimidade na quantidade e qualidade da informação disponível.

Por fim, é importante que a equipe mantenha em mente durante a execução da APMR que o produto do exercício não é um documento de decisão, mas sim um documento informativo, desenvolvido a partir da contribuição compartilhada da equipe, que se destina a uso e referência para os anos futuros (FERC, 2017).

### **3.3.2 Modelo McBreach**

O McBreach é uma ferramenta acoplada ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS que permite a realização de modelagens probabilísticas de brecha de ruptura de barragens. Uma breve revisão fundamentada no manual do usuário do software (KLEINSCHMIDT, 2019a) é apresentada nesta seção.

O modelo McBreach permite a amostragem aleatória, sobre distribuições estatísticas predefinidas, de todos os parâmetros de brecha existentes no software HEC-RAS. Através de simulações de Monte Carlo, obtém-se como resultado os picos de vazão de ruptura associados as suas probabilidades de excedência. Cada pico de vazão encontra-se associado a um conjunto de parâmetros de brecha, o qual pode ser posteriormente utilizado para produção de mapas de probabilidade de excedência de inundação.

O Método de Monte Carlo funciona por meio da amostragem aleatória de valores de entrada para uma solução matemática. A resolução dos resultados é então repetidamente conduzida até que a probabilidade de um resultado específico convirja em um único valor. No processo de modelagem de rompimento de barragens pelo modelo McBreach, existem 8 parâmetros de rompimento ao simular um evento de rompimento de galgamento e 10 parâmetros de rompimento ao simular um evento de *piping* (Quadro 3.4). Cada um desses parâmetros de brecha deve ser amostrado aleatoriamente sobre uma distribuição estatística definida pelo usuário, até que ocorra o processo de convergência estatística.

Quadro 3.4 – Parâmetros de brecha de rompimento para os mecanismos de galgamento e *piping*

Parâmetros de Brecha do Modelo	Modo de Falha	Descrição
Inv.	Galgamento / <i>Piping</i>	Elevação inferior final do fundo
$W_b$	Galgamento / <i>Piping</i>	Largura final do fundo
LSS.	Galgamento / <i>Piping</i>	Inclinação do lado esquerdo
RSS.	Galgamento / <i>Piping</i>	Inclinação do lado direito
$t_f$	Galgamento / <i>Piping</i>	Tempo de Formação
Init.	Galgamento / <i>Piping</i>	Elevação da superfície de água para início da ruptura (utilizado apenas quando o gatilho de ruptura estiver definido pela elevação do NA).
$C_d$ .	Galgamento / <i>Piping</i>	Coefficiente de descarga da brecha (vertedouro)
Prog.	Galgamento / <i>Piping</i>	Progressão de desenvolvimento da brecha.
$C_{pipe}$ .	<i>Piping</i>	Coefficiente de descarga de <i>piping</i> (orifício).
$El_{Pipe}$ .	<i>Piping</i>	Elevação inicial de ocorrência do <i>piping</i> .

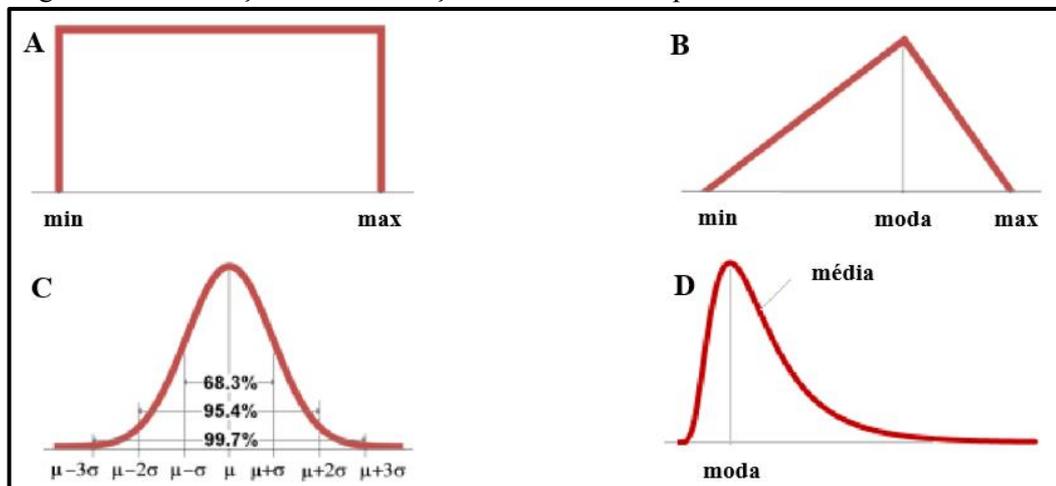
Fonte: Kleinschmidt (2019a), adaptado pelo autor

Em relação as distribuições estatísticas, estas desempenham o papel de orientação do processo de amostragem aleatória dos parâmetros de brecha pelo modelo McBreach. De modo geral, as distribuições definem a tendência central de um parâmetro, sua variância e até mesmo seus limites superiores e inferiores. Na versão 5.0.7 do software, existem quatro distribuições disponíveis para seleção:

- Distribuição Uniforme: distribuição estatística simétrica dentro de um intervalo definido, onde todos os resultados têm uma chance de ocorrência igualmente provável (Figura 3.8a). Essa distribuição exige a inserção dos valores mínimos e máximos para definição do intervalo de amostragem.
- Distribuição Triangular: distribuição estatística assimétrica que define uma tendência central (Figura 3.8b). A tendência central (ou valor de probabilidade mais alto assumido) é definida como a moda do conjunto amostral. A moda é o valor que ocorre com mais frequência. Requer a inserção dos valores mínimos e máximos, bem como da moda como parâmetros de entrada no McBreach.

- Distribuição Normal: Distribuição simétrica que define uma tendência central (Figura 3.8c). A tendência central (ou valor de probabilidade mais alto assumido) é definida como a média ( $\mu$ ) do conjunto amostral. A faixa de resultados é definida pelo desvio padrão ( $\sigma$ ). A distribuição normal exige a inserção pelo o usuário da média e do desvio padrão.
- Distribuição Lognormal: distribuição assimétrica que define uma tendência central (Figura 3.8d). Nesta distribuição, o logaritmo da variável aleatória é normalmente distribuído. Sua utilização demanda a inserção de uma moda e uma média. A moda representa o valor mais provável, enquanto a média representa uma média do conjunto amostrado. A média deve sempre ser maior que a moda para a distribuição lognormal e afetará o quão assimétrica é a distribuição.

Figura 3.8 – Ilustração das distribuições estatísticas<sup>1</sup> disponíveis no software McBreach.



Fonte: Kleinschmidt (2019a), adaptado pelo autor

Ao longo da execução do software é possível acompanhar a progressão da convergência do primeiro ao quarto momento estatístico: média, desvio padrão, assimetria e curtose (Figura 3.9). No início da simulação, é esperada a ocorrência de oscilação dos momentos estatísticos. Após várias realizações, todavia, espera-se que a média dos picos de vazão comece a se estabilizar em um valor constante. Ainda, cada momento estatístico de ordem superior exigirá mais realizações para alcançar a convergência. De modo geral, a execução de 10.000 realizações normalmente alcançará a convergência para todos os quatro momentos estatísticos.

<sup>1</sup> Onde: A: Distribuição Uniforme; B: Distribuição Triangular; C: Distribuição Normal e E: •Distribuição Lognormal

Figura 3.9 – Interface de acompanhamento estatístico dos resultados dos picos de vazão de ruptura



Fonte: Kleinschmidt (2019a), adaptado pelo autor

Por fim, os resultados de saída dos parâmetros de brecha são apresentados, por padrão, para as vazões de pico de 1%, 5%, 10%, 50%, 90%, 95% e 99%. Complementarmente, o modelo McBreach tem a capacidade de produzir uma probabilidade de excedência adicional definida pelo usuário.

### 3.3.3 Interface com o Modelo HEC-RAS

Conforme apresentado anteriormente, o processo de execução do modelo HEC-RAS em uma aplicação do método de Monte Carlo demanda a execução de dezenas de milhares de realizações para obtenção da convergência estatística. Para tornar viável a realização da modelagem probabilística de abertura de brecha, torna-se necessário a adoção de artifícios computacionais para redução do tempo de execução de cada simulação individual. Nesse contexto, os modelos de rompimento de barragem no HEC-RAS podem ser truncados, de modo a garantir uma execução rápida o suficiente para tornar a aplicação do McBreach exequível no período de algumas horas. Conforme recomendações dos autores, um bom objetivo seria reduzir o tempo de execução de uma realização individual para cinco segundos (ou menos), condição

que representaria cerca de 14 horas para execução de 10.000 realizações (KLEINSCHMIDT, 2019a).

Importante destacar que a versão truncada do modelo é necessária apenas durante a simulação do McBreach, ao longo do processo de execução das milhares realizações. Após a conclusão do modelo, o usuário pode replicar os conjuntos de parâmetros de brecha para os picos de vazão associados as suas probabilidades de excedência, inserindo-os no modelo hidráulico completo e mapeado as extensões de inundação individualmente.

De modo geral, para configuração de um modelo truncado, Kleinschmidt (2019a) sugere a adoção das seguintes sugestões:

- Remover a extensão do domínio de simulação a jusante: A medida em que o modelo McBreach obtém as vazões de pico de ruptura da geometria da barragem rompida, não é necessário simular o amortecimento da onda de inundação na totalidade da planície de inundação;
- Desativar as opções de pós-processamento: O McBreach verifica os valores dos picos de ruptura diretamente dos arquivos de processamento do HEC-RAS.
- Aumentar o intervalo de cálculo: Após a remoção de uma grande parcela do domínio computacional de jusante, é provável que se possa aumentar o intervalo de cálculo e ainda manter a estabilidade numérica no modelo truncado;
- Utilizar os equacionamentos de onda difusa: Em análises bidimensionais, a utilização das equações de onda difusa demanda menor tempo de processamento e é menos propensa a gerar erros quando comparado a utilização das equações completas de Saint Venant 2D (“Full Momentum Equations”);
- Reduzir o tempo de simulação: Como o McBreach lê apenas as vazões de pico do hidrograma de ruptura na barragem, a simulação só precisa ser longa o suficiente para capturar o pico do hidrograma. O restante da simulação pode ser removido, objetivando-se a redução do tempo computacional.

### 3.4 AVALIAÇÃO DE PERDA DE VIDA

A presente seção objetiva-se a descrever as principais informações relacionadas ao processo de avaliação de perda de vidas em estudo de ruptura hipotética de barragens e está subdividida em: (i) diretrizes internacionais para análise de perda de vida; (ii) revisão e estado da arte da análise de perda de vida; e (iii) modelo HEC-LifeSim.

### 3.4.1 Diretrizes Internacionais para Análise de Perda de Vida

Segundo CWC (2019), o rompimento de uma barragem com ocorrências de perdas de vida é a consequência mais severa e que causa maior impacto na percepção pública do desastre. Assim, esta variável tem sido objeto da maioria dos estudos de consequência conduzidos, existindo diversos métodos de cálculo disponíveis (USDHS, 2011).

Importante destacar que os métodos de estimativa de perda vida permitem apenas a obtenção de um valor indicativo da magnitude desta variável, não sendo capazes de fornecer resultados com alta precisão. Via de regra, isso deve-se as inúmeras variáveis envolvidas no processo que são de difícil modelagem, como é o caso do comportamento humano em eventos de desastre (JONKMAN, 2007). Todavia, a obtenção de resultados desta natureza é de grande importância para compreensão e comparação do impacto social esperado em um portfólio de barragens, configurando-se como importante fator a ser utilizado em sistemas de classificação de dano potencial associado e no planejamento de ações de emergência.

FEMA (2013) fundamenta a existência de três fatores que apresentam grande influência no número de fatalidades resultantes de um rompimento de barragem: (i) número de pessoas ocupando a planície de inundação a jusante do local de rompimento; (ii) quantidade de avisos e alertas emitidos as pessoas expostas a inundação; e (iii) gravidade da inundação. A medida em que análises desta natureza são de grande complexidade, FERC (2014b) destaca a importância da escalabilidade no processo de determinação da metodologia, visando ajustar no nível de esforço da análise conforme o grau de incerteza aceitável para a avaliação de risco. Assim, para uma barragem de baixa probabilidade de ocorrência de fatalidades, a adoção de uma simulação complexa pode configurar uma utilização desnecessária de recursos. Em contrapartida, ao avaliar-se uma barragem capaz de causar grande número de mortes, a redução da incerteza das estimativas pode ser necessária, justificando a execução de uma simulação de maior complexidade.

Configurando-se como prática comum nas análises de risco, FERC (2014b) sugere que a estimativa de perda de vidas seja um processo iterativo ou em níveis, iniciando-se pela análise mais simples e avançando-se na complexidade para tomada de uma decisão informada. O principal objetivo é que o rigor adotado permita um nível de confiança suficientemente alto para facilitar as decisões sobre a segurança da barragem. O Quadro 3.5 apresenta os níveis de complexidade propostos pelo órgão, conforme três principais condições ou fases de avaliação.

Quadro 3.5 – Níveis gerais de previsão de perda de vida

<b>Nível de Complexidade</b>	<b>População em Risco</b>	<b>Perda de Vida Prevista</b>	<b>Variáveis de Tempo e Velocidade</b>
Baixo	Contagem de estruturas em fotografias aéreas, estimativa de residentes por estrutura usando dados gerais do Censo.	Suposição de que todos os residentes na área de inundação morrerão.	Suposição de que todas as estruturas estão habitadas.
Médio	Utilização de metodologias em SIG com emprego de dados de setores censitários e áreas de inundação para estimativa da população em risco.	Utilização de métodos empíricos para estimativa da perda de vidas com base no tempo de aviso e na severidade da inundação.	Resultados interpolados do escoamento de modelos unidimensionais (1D) para obtenção dos tempos de chegada e das velocidades. Consideração de mudanças sazonais da população.
Alto	Recenseamento porta a porta e levantamento topográfico das estruturas.	Utilização de modelos de simulação para prever a movimentação da população com base nos tempos de aviso, simulações de tráfego, velocidade da inundação, etc.	Resultados matriciais de modelos bidimensionais (2D) para obtenção dos tempos de chegada e das velocidades de escoamento.

Fonte: FERC (2014b), adaptado pelo autor.

Neste contexto, CWC (2018) também sugere uma abordagem de avaliação níveis, objetivando-se, igualmente, o uso eficiente do tempo e das ferramentas disponíveis. Assim, a seleção de um nível de análise deve corresponder à sofisticação e precisão esperados e à escala e complexidade da barragem e da área a jusante sob investigação. Semelhantemente a proposição de FERC (2014b), barragens com alto potencial de risco localizadas a montante de áreas povoadas ou planícies aluviais complexas demandam abordagens de modelagem mais sofisticadas, ao passo que em barragens com baixo potencial de risco, situadas a montante de áreas escassamente povoadas, permitem a adoção de métodos de análise mais simplificados. O Quadro 3.5 apresenta a orientação da CWC para estimativa de população em risco conforme três principais níveis de análise.

Quadro 3.6 – Níveis de estimativa da população em risco

<b>Níveis</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Abordagem Adequada para Estimativa da População em Risco</b>
Nível 1	Triagem inicial para barragens de alto risco Barragens com baixo potencial de risco	Suposições grosseiras sobre a envoltória máxima de inundação; Avaliação da população em risco com base em mapas de densidade populacional do município.
Nível 2	Grandes barragens com risco significativo Todas as barragens de alto risco	Análise da área de inundação de rompimento de barragem usando topografia de resolução grosseira; Estimativas mais detalhadas da população em risco; Avaliação da perda potencial de vidas utilizando-se abordagens empíricas.
Nível 3	Barragens de risco significativo com inundações complexas a jusante Barragens de alto risco com grande população em risco	Análise detalhada da área de inundação de inundação proveniente do rompimento da barragem; Estimativas da população a nível familiar; Emprego de modelos de maior complexidade para estimativa da perda potencial de vidas.

Fonte: CWC (2018), adaptado pelo autor

Avaliando-se as diretrizes de FERC (2014b) e CWC (2018), observam-se três principais tendências quanto a aplicação de metodologias de análise de perda de vida: (i) orientação crescente e proporcional do nível de risco do barramento com a complexidade metodológica necessária a ser adotada; (ii) otimização do tempo e do uso das ferramentas disponíveis, postulando que barragens de médio e baixo risco possam trabalhar com informações de menor precisão; e (iii) mesmo para barragens de alto risco e complexidade, indica-se, primeiramente, a condução de metodologias mais simplificadas, permitindo que ao longo do processo de construção das avaliações de consequência ocorra, iterativamente, a análise do grau de complexidade necessário para alcançar um nível satisfatório de dados e informações que permitam avaliação de risco da barragem.

Destaca-se ainda que as diretrizes apresentadas refletem apenas as condições dos países de vigência das documentações. Buscando-se ilustrar o estado da arte a nível internacional das metodologias adotadas para análise de perda de vida, conduziu-se uma avaliação de ICOLD (2021). A referida publicação tem por objetivo o levantamento e a caracterização das diferentes abordagens para avaliação dos riscos de barragens adotadas pelos países membros da organização. Através da avaliação das respostas relacionadas as práticas para estimativa dos impactos na população afetada, apresenta-se no Quadro 3.7 uma compilação das principais informações apresentadas pelos 11 países participantes da enquete.

Quadro 3.7 – Estado da arte das diretrizes metodologias adotadas para análise de perda de vida em diferentes países

<b>País</b>	<b>Diretrizes Metodológicas para Análise de Perda de Vida</b>
Argentina	Em casos específicos, a agência reguladora nacional de segurança de barragens indica a aplicação de análises de perda de vida. Este tipo de avaliação, contudo, não configurasse como prática comum. As metodologias adotadas referem-se a utilizações de modelos empíricos como DSO-99-06 (GRAHAM, 1999) e SUFRI (ESCUDEBUENO <i>et al.</i> , 2012).
Austrália	Utilizam-se modelos hidráulicos unidimensionais (1D) para simulação dos cenários de rompimento e identificação das profundidades e velocidades desenvolvidas em cada estrutura atingida na região de jusante. Estes dados são posteriormente empregados no modelo empírico RCEM (USBR, 2015) para estimativa da perda de vida. Realizam-se também aplicações de modelos hidráulicos bidimensionais (2D) com objetivo de obtenção distribuída de dados hidráulicos do escoamento para entrada no modelo dinâmico HEC-LifeSim (USACE, 2020b).
Canadá	A metodologia a ser adotada varia de acordo a situação. Para estimativas passíveis de simplificação, a análise é conduzida com base em modelos de regressão (DEKAY; MCCLELLAND, 1993) e modelos empíricos (DSO-99-06 ou RCEM). Modelos de maior complexidade e com maior demanda de dados como HEC-FIA (USACE, 2018), HEC-LifeSim e Life Safety Model (HRW, 2021) são aplicados em cenários de maior risco e incerteza. Outras abordagens dentro desses limites também são utilizadas. Em alguns casos, vários modelos, como Life Safety Model e HEC-LifeSim são aplicados conjuntamente em uma análise múltipla.
República Checa	Junto ao processo de categorização de barragens, são estipuladas metodologias que relacionam a taxa de fatalidade esperada com a distância a jusante da estrutura analisada. Em casos onde há o desenvolvimento de estudos hidráulicos de ruptura, as fatalidades são previstas através da interação das variáveis de velocidade e profundidade do escoamento com o número de habitantes na zona inundada.
França	A estimativa do número de pessoas e propriedades impactadas é desenvolvida com base nos mapas de inundação. Comumente, utilizam-se métodos analíticos simplificados para obtenção de uma ordem de magnitude de afetados.
Itália	Não são indicadas metodologias para análise de perda de vida.
Holanda	Os impactos esperados sobre a população constituem a base para política e para os padrões de análise estabelecidos. O número de fatalidades e de perda material é determinado com base nos valores de profundidade e de taxa de subida do nível esperados para o evento. As vítimas fatais e todas as pessoas que sejam de alguma forma afetadas por uma enchente são monetizadas em 6,7 milhões e 12 mil euros, respectivamente. Para contabilização das perdas de patrimônio cultural, natureza, produção, entre outros, são adotados fatores de multiplicação.
Eslováquia	Conforme legislação existente para categorização de barragens, a análise topográfica do terreno é utilizada, bem como a análise de rompimento da barragem e impactos das ondas de rompimento dependendo da distância e do volume do reservatório.
Sri Lanka	A avaliação de perda de vidas é conduzida com base nas áreas de inundação mapeadas com estudos hipotéticos de rompimento. Comumente, utilizam-se bases em SIG para cruzamento de informações e avaliação dos danos esperados a vidas humanas, estruturas e meio ambiente.

País	Diretrizes Metodológicas para Análise de Perda de Vida
Estados Unidos	<p><u>Federal Energy Regulatory Agency (FERC)</u> A metodologia para estimativa de perda de vidas humanas está fundamentada nas diretrizes de USBR &amp; USACE (2019).</p> <p><u>US Army Corps of Engineers (USACE)</u> Em termos gerais, uma abordagem escalável é utilizada, iniciando-se com emprego de métodos empíricos, em um nível de triagem, até a adoção de simulações dinâmicas baseadas em agentes com modelagem explícita do processo de evacuação, para avaliações em níveis de maior complexidade. A perda indireta de vidas também é estimada quantitativamente utilizando-se uma combinação de dados históricos e características da população a jusante para determinação de taxas de mortalidade indireta como uma porcentagem da população em risco.</p> <p><u>US Bureau of Reclamation (USBR)</u> As consequências de perda de vida de uma ruptura de barragem são avaliadas utilizando-se o método empírico RCEM. O método assume que a taxa de fatalidade em uma determinada porção da área de inundação pode ser estimada como uma função da severidade da enchente e da quantidade alertas recebidos pela população. Essa relação foi desenvolvida com base em dados de casos históricos.</p> <p><u>State of Colorado</u> São adotadas as orientações de USBR para categorização das consequências em ordens relativas de magnitude (Níveis 1 a 4, onde Nível 1 refere-se a potencial improvável de perda de vidas e Nível 4 refere-se a grandes centros populacionais com mais de 100 perdas de vidas). O Índice de Vulnerabilidade Social (CUTTER <i>et al.</i>, 2003) é também utilizado, fornecendo uma indicação da capacidade da população em risco de responder e se recuperar de um evento de rompimento de barragem.</p>

Fonte: ICOLD (2021), adaptado pelo autor

No Brasil, conforme elucidado na Seção 3.1, a avaliação de perda de vidas é conduzida com base nas áreas de inundação mapeadas com estudos hipotéticos de rompimento entregues pelo empreendedor ou executadas pelo órgão fiscalizador, a partir de metodologias simplificadas (ANA, 2017b). As consequências são verificadas com base na avaliação visual da interferência da mancha de inundação de ruptura com as ocupações humanas e naturais existentes no vale a jusante. Os resultados são empregados diretamente em um sistema de classificação e possuem categorização binária, atribuindo a condição de alto dano potencial associado a barragens cuja mancha atinge áreas permanentemente ocupadas e vidas humanas podem ser atingidas (CNRH, 2012a).

Em termos gerais, observam-se respostas heterogêneas, com variados níveis de detalhamento. As informações demonstram também diferentes níveis de maturidade na área de

segurança de barragens e gestão de riscos entre os países. Via de regra, países com intermediária maturidade em análises de risco apresentam tendências mais consolidadas de aplicação de metodologias empíricas para análise de perda de vida. Países com maior maturidade, por outro lado, tendem a empregar um conjunto de ferramentas analíticas, prevendo escalabilidade da complexidade de avaliação conforme o grau de risco e o potencial de perdas associados. Observam-se também países que não possuem diretrizes claramente estabelecidas sobre o tema. Nestes casos, ações expeditas são adotadas para avaliação do potencial de perda de vida à medida em que demandas específicas surgem.

### **3.4.2 Revisão e Estado da Arte da Análise de Perda de Vida**

Após analisar as diretrizes internacionais para análise de perda de vida, observa-se uma gama de metodologias disponíveis no contexto mundial. Nesse contexto, desenvolve-se na sequência uma breve revisão histórica dos principais estudos na área, fundamentado nas publicações de McClelland e Bowles (2002), Jonkman (2007) e USDHS (2011).

Configurando-se como um dos primeiros modelos empíricos propostos para estimativa de perda de vidas causadas por inundações provenientes de ruptura de barragens, Brown e Graham (1988) propuseram uma equação de estimativa de fatalidades em função do tempo de alerta e do tamanho da população em risco. As relações apresentadas derivaram da análise de um conjunto de 24 grandes rompimentos de barragens e inundações bruscas.

Dekay e McClelland (1993), fundamentados na mesma base de dados, propuseram um aprimoramento do estudo, prevendo uma divisão das equações de regressão em inundações de baixa e alta letalidade. Condições de alta letalidade foram correlacionados a eventos onde os escoamentos desenvolvem-se com altas profundidades e velocidades, comumente encontrados em regiões de vale. Condições de baixa letalidade, por outro lado, foram correlacionados a eventos onde os escoamentos desenvolvem-se com rasas profundidades e velocidades menores, casos de maior recorrência em áreas de planícies de inundação.

Graham (1999), por meio da expansão do conjunto de dados utilizados por Brown e Graham (1988) e Dekay e McClelland (1993), apresentou um modelo empírico para estimativa de perda de vidas fundamentado em categorias de classificação. Assim, as taxas de mortalidade recomendadas são sugeridas com base na severidade da inundação, no tempo de alerta e na compreensão da população quanto à gravidade do evento. As severidades de inundação são

avaliadas quantitativamente conforme as condições hidráulicas desenvolvidas pela inundação. Os tempos de alerta são divididos em faixas conforme a antecedência de emissão e as condições de recebimento e entendimento do alerta pela população afetam as estimativas de fatalidade.

McClelland e Bowles (1999; 2002), Aboelata *et al* (2003) e Aboelata e Bowles (2005), fundamentados em pesquisas conduzidas na *Utah State University*, desenvolveram o modelo dinâmico “LIFESim” com objetivo de superar as limitações das abordagens puramente empíricas de estimativa de perda de vida. Através de uma abordagem baseada em agentes para rastrear indivíduos durante todo o processo de alerta e evacuação, o modelo analisa a interação da população em risco com as estruturas, estradas, veículos e com o próprio escoamento em desenvolvimento ao longo do evento. Atualmente existem dois *softwares* disponíveis que implementam a teoria base do LIFESim: uma versão simplificada encontra-se no modelo HEC-FIA (USACE, 2018) e a versão completa encontra-se incorporada no *software* HEC-LifeSim (USACE, 2020b).

Watson *et al.* (2001), Assaf e Hartford (2002), Hartford e Baecher (2004), Johnstone (2005) e Lumbroso *et al* (2011) desenvolveram o modelo “Life Safety Model” (LSM). Construído inicialmente pela *British Columbia Hydro* e agora sob responsabilidade da *HR Wallingford* do Reino Unido, o LSM é um modelo dinâmico, baseado em agentes, concebido para estimativa do risco de inundação as pessoas em termos de perda de vidas. O modelo realiza a interação dinâmica entre pessoas, veículos, edifícios e a onda de inundação e estima a perda de vidas devido a causas de afogamento, exaustão, desabamento de edifícios e carros varridos. Os resultados produzidos colaboram com entendimento de incertezas relacionadas à evacuação que não são explicadas pela aplicação de modelos empíricos.

FEMA (2008) propôs um modelo empírico denominado de “Método da Comparação de Inundação” (MCI). Sua concepção teve por objetivo fornecer uma ferramenta de fácil utilização para os gestores e reguladores de segurança de barragens para avaliação de risco de seus portfólios de estruturas. A aplicação limita-se a barragens com até 6,17 hm<sup>3</sup> e sua metodologia baseia-se em dados históricos que demonstram maior fatalidade em regiões mais a jusante das barragens e em condições que o pico do hidrograma de ruptura é significativamente maior em comparação as inundações ordinárias da bacia.

OMNR (2002; 2011) estabeleceu um modelo empírico baseado em dados hidráulicos e perigo hidrodinâmico a pessoas como referência para classificação do perigo potencial do referido órgão. Denominado de “Regra 2x2 ou “OMRN 2x2” o modelo fundamenta-se no conceito de que a perda potencial de vidas em um local específico ocorre quando a profundidade do escoamento é igual ou superior a 0,80 m, a velocidade ultrapassa 1,7 m/s ou o produto das duas variáveis ultrapassa o valor de 0,37 m<sup>2</sup>/s.

Escuder-Bueno *et al.* (2012), no contexto de estratégias sustentáveis de gestão de risco de inundações urbanas na região europeia, desenvolveram o modelo empírico “SUFRI”. Sua concepção fundamentasse no efeito de medidas não estruturais para redução dos riscos de inundação. As taxas de fatalidade são estimadas separadamente com base na avaliação de três principais variáveis: (i) nível de preparação e comunicação de risco; (ii) tempo de alerta; e (iii) severidade da inundação. Conforme proposto pelos autores, a combinação destas condições são discretizadas em 10 categorias, que devem ser escolhidas conforme as características do evento estudado para definição das taxas de fatalidades.

USBR (2015), objetivando uma atualização e aprimoramento metodológico dos estudos propostos por Graham (1999), desenvolveu o modelo empírico RCEM (*Reclamation's Consequence Estimating Methodology*). O modelo segue uma abordagem gráfica para determinar a perda potencial de vidas dentro da zona de inundação. As taxas de mortalidade são extraídas dos gráficos propostos pelo método e são função da severidade da inundação (risco hidrodinâmico), do período do dia em que ocorrem (diurno x noturno) e da eficiência dos alertas emitidos.

Observando-se a revisão histórica dos principais estudos na área, verifica-se que os modelos existentes utilizam diferentes parâmetros de entrada, empregam distintos mecanismos de análise e possuem particulares níveis de detalhamento. Os parâmetros relacionam-se a: variáveis hidráulicas, tempos de alerta e evacuação, interação com edificações, percepção e preparação da população, entre outros exemplos, que são necessários como entrada para aplicação dos modelos.

Os mecanismos de análise referem-se aos princípios de modelagem adotados e podem ser resumidos em duas grandes categorias: (i) empíricos, quando os resultados de fatalidade são correlacionados exclusivamente com características de eventos passados; e (ii) dinâmicos,

quando permitem simulações mais detalhadas do comportamento dos indivíduos e das causas de fatalidade (JONKMAN, 2007). Entre as duas principais categorias citadas, podem ainda existir diferentes classificações referindo-se a modelos que aplicam parcialmente ambos os princípios.

Os níveis de detalhamento, por fim, descrevem a resolução da população avaliada pelo modelo e são classificados em: (i) Escala Macro ou de Evento, onde a avaliação de perda de vida é conduzida única e uniformemente para todas as pessoas em risco no vale a jusante; (ii) Escala Meso ou em Zonas, onde avaliasse as condições do evento e suas respectivas taxas de fatalidade em diferentes regiões, obtendo-se níveis de detalhamento dentro de um mesmo evento; e (iii) Escala Micro ou Individual, onde avalia-se o comportamento e as causas de fatalidade de cada indivíduo ou grupo de pessoas ao longo da passagem da onda de inundação.

Buscando-se sumarizar os parâmetros de entrada e mecanismos principais de análise, apresenta-se no Quadro 3.8 uma visão geral das características dos modelos descritos ao longo desta seção. A Figura 3.10 ilustra graficamente esta caracterização em termos de princípios básicos de modelagem (eixo x) e nível de detalhamento (eixo y).

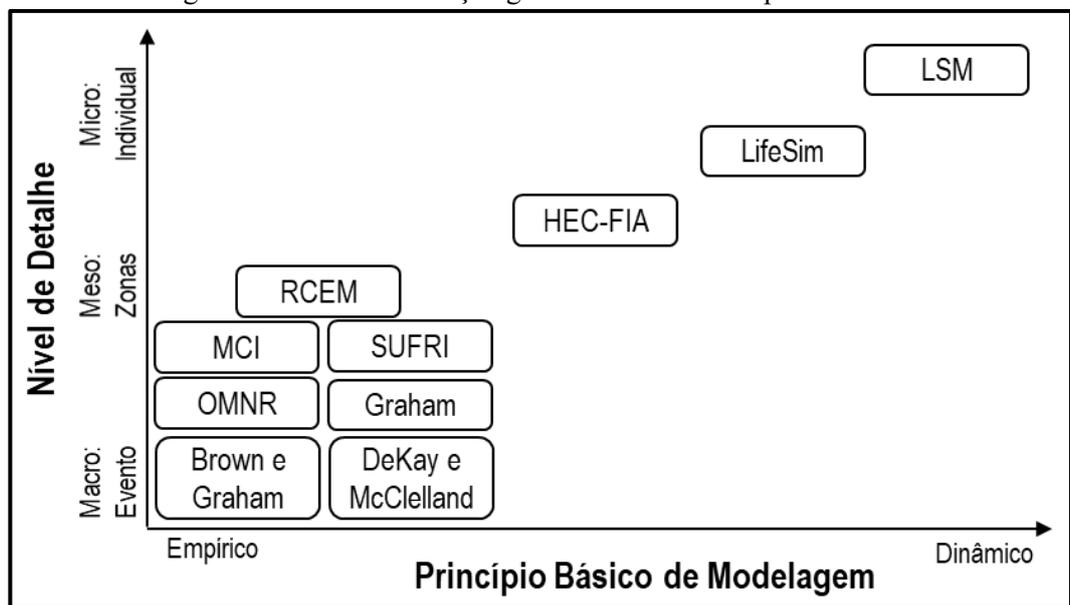
Quadro 3.8 – Visão geral dos parâmetros e mecanismos dos modelos de perda de vidas existentes, onde E = Empírico; e D = Dinâmico.

Modelo	Parâmetros Utilizados na Estimativa de Perda de Vida								Mecanismo Principal
	Profundidade	Velocidade	Alerta e Evacuação	Colapso de Estruturas	Preparação da População	População em Risco	Distância da Barragem	Vazão de Pico e Vazão Ordinária	
Brown e Graham			X			X			E
Dekay e McClelland			X			X			E
Graham	X	X	X			X			E
MCI						X	X	X	E
OMNR 2x2	X	X				X			E
SUFRI	X	X	X		X	X			E
RCEM	X	X	X						E
HEC-FIA	X	X	X	X					D

Modelo	Parâmetros Utilizados na Estimativa de Perda de Vida								Mecanismo Principal
	Profundidade	Velocidade	Alerta e Evacuação	Colapso de Estruturas	Preparação da População	População em Risco	Distância da Barragem	Vazão de Pico e Vazão Ordinária	
HEC-LifeSim	X	X	X	X	X				D
LSM	X	X	X	X	X				D

Fonte: Jonkman *et al.* (2016), adaptado pelo autor

Figura 3.10 – Caracterização geral dos modelos de perda de vida



Fonte: Jonkman *et al.* (2016), adaptado pelo autor

Configurando o objetivo do presente estudo a avaliação das estimativas de perda de vida para cada cenário associado a probabilidade de excedência de inundação, justifica-se a seleção do modelo dinâmico HEC-LifeSim devido a seu potencial de análise associado à sua capacidade direta de comunicação com o software HEC-RAS, condição que permite maior flexibilidade e agilidade para integração dos resultados hidrodinâmicos dos cenários de inundação com as simulações de perda de vida. Na seção subsequente, apresenta-se um detalhamento teórico do modelo.

### 3.4.3 Modelo HEC-LifeSim

O HEC-LifeSim é um sistema de modelagem dinâmico que permite realizar a estimativa da perda potencial de vidas e dos danos econômicos causados por eventos de

inundações (USACE, 2020). Através da simulação explícita das fases de alerta e de mobilização da população potencialmente exposta ao perigo, o modelo realiza previsões da distribuição espacial de fatalidades junto as estruturas e vias de acesso da região atingida. Deste modo, a concepção do modelo centra-se em 2 questões: (i) se a população potencialmente atingida evacua com sucesso; e (ii) se a parcela que não consegue evacuar pode alcançar um abrigo adequado (Aboelata *et al.*, 2003).

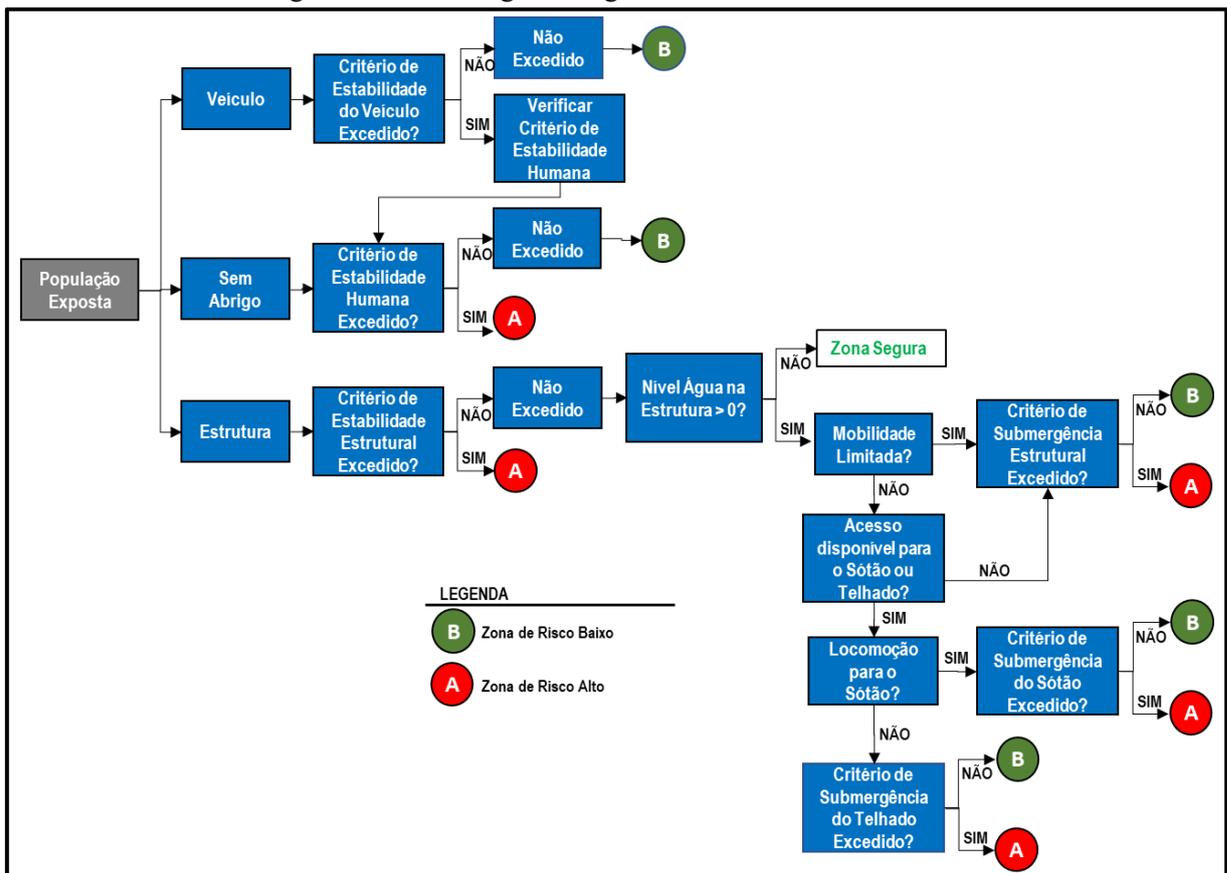
Conforme USACE (2020), o modelo HEC-LifeSim executa múltiplas iterações, ou resultados potenciais, por meio da aplicação do método de Monte Carlo. O intervalo de simulação para cada iteração inicia com o primeiro aviso de evacuação ou primeiro passo de tempo das variáveis hidráulicas e continua até o final da série temporal hidráulica ou até o momento em que as ações de evacuação de cada grupo simulado tenham sido concluídas. Fornecidas informações sobre as variáveis hidráulicas da inundação, a população em risco, as estruturas e rede rodoviária, o modelo HEC-LifeSim executa o seguinte fluxograma lógico:

1. Estima as características hidráulicas (profundidade, velocidade e profundidade vs velocidade) em cada estrutura e cada segmento de estrada ao longo do tempo para um determinado evento de inundação;
2. Amostra a hora em que os avisos são emitidos para a população em relação à ocorrência do evento de ruptura;
3. Separa a população em grupos de evacuação, onde o tamanho de cada grupo é determinado pelo tipo de ocupação da estrutura;
4. Propaga o alerta e estima o tempo que a população em cada estrutura recebe a informação;
5. Determina o momento em que cada grupo tomará medidas de proteção após o recebimento do alerta;
6. Determina se o grupo tentará evacuar para um destino seguro ou se permanecerá em sua estrutura e evacuará verticalmente. Os grupos sempre tentarão a evacuação vertical no caso de permanecerem em sua estrutura. Para os casos dos grupos que decidirem tomar ações protetivas de evacuação e a água já os tenha atingidos, estes avaliarão as condições de profundidade em sua estrutura;
7. Rastreia os grupos de evacuação ao longo da rede rodoviária à medida que evacuam. Os grupos ficam imobilizados quando (i) A profundidade limite para o veículo/pessoas é excedida, ou (ii) Não é possível encontrar um destino seguro ao tentar encontrar outras rotas;
8. Atribui aos grupos uma zona de risco (seguro, baixo risco, alto risco):
  - As pessoas que evacuaram e chegaram ao seu destino com segurança são atribuídas a “seguro”;

- As pessoas que se mobilizaram, mas foram apanhadas, são atribuídas a uma zona de perigo (baixa ou alta) com base (i) Nas condições hidráulicas máximas do segmento de estrada em que estão; e (ii) Na verificação dos critérios de estabilidade do veículo ou das pessoas;
  - As pessoas que não se mobilizaram são atribuídas a uma zona de risco (baixa ou alta) com base nas seguintes informações: (i) Estabilidade estrutural do abrigo disponível; e (ii) Critério de submersão humana;
9. Calcula a perda de vida para cada grupo, aplicando uma taxa de mortalidade amostrada da zona de risco atribuída a cada pessoa do grupo exposta ao risco de inundação;
  10. Estima a perda total de vidas como a soma da perda de vidas para todas as estruturas e veículos atingidos durante a evacuação;

Uma ilustração do fluxograma lógico para determinação da zona de perigo para as pessoas expostas a inundação (Etapas 6 a 10) é apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Fluxograma lógico do modelo HEC-LifeSim

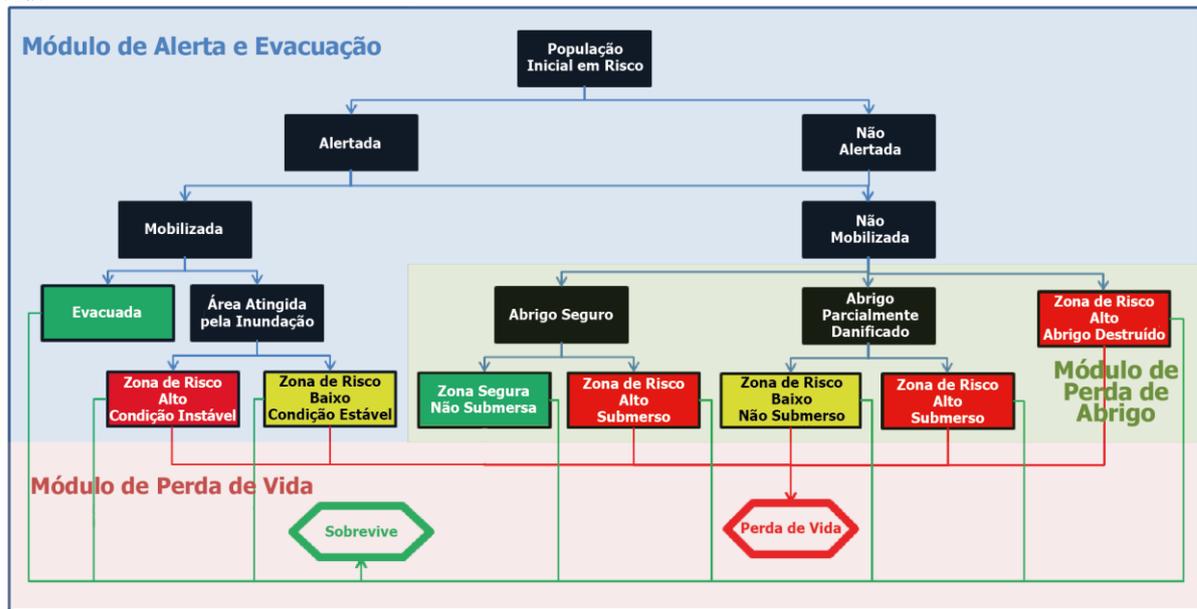


Fonte: USACE. (2020), adaptado pelo autor

Em relação a sua estrutura computacional, o modelo é construído sobre um banco de dados formado por camadas e tabelas provenientes de um Sistema de Informações Geográficas

(SIG), onde 4 principais módulos interagem entre si, sendo eles: (i) Módulo de Propagação; (ii) Módulo de Perda de Abrigo; (iii) Módulo de Alerta e Evacuação; e (iv) Módulo de Perda de Vida (Figura 3.12). De forma a elucidar as considerações e equacionamentos utilizadas no modelo, cada módulo existente no HEC- LifeSim será explorado nas seções subsequentes.

Figura 3.12 – Representação da abordagem metodológica do HEC-LifeSim para estimativa da perda de vida

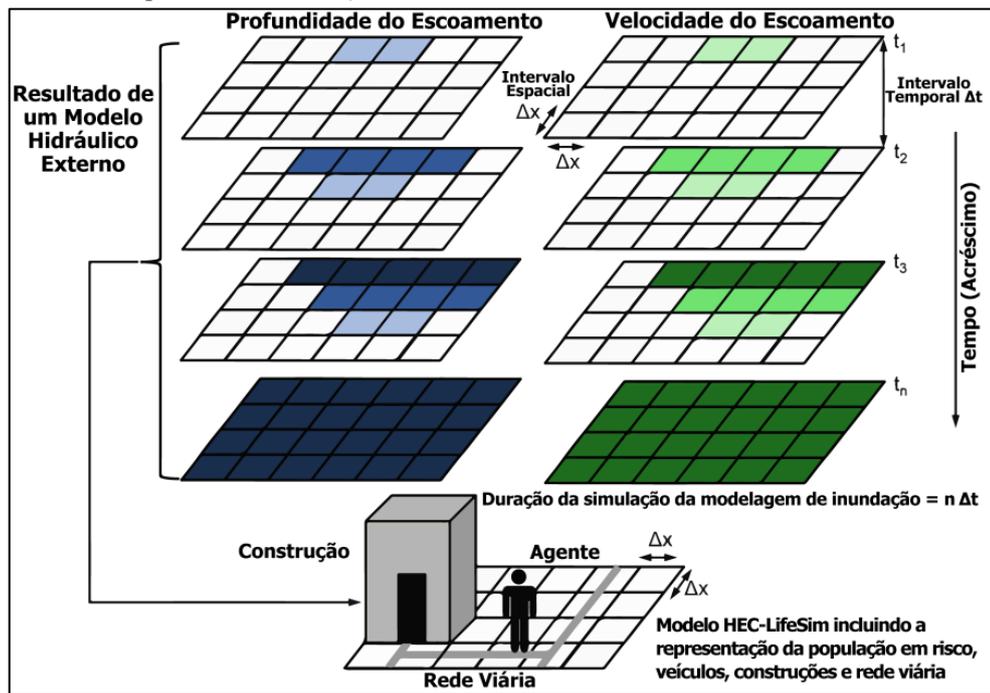


Fonte: Adaptado de Aboelata e Bowles (2008)

### 3.4.3.1 Módulo de Propagação

Para execução desse módulo, dados obtidos em simulações de modelos hidráulicos de escoamento não permanente são importados para o HEC-LifeSim, de modo a estabelecer os limites de inundação, tempos de chegada, profundidades e velocidades necessários para análise dos módulos subsequentes. Os dados importados são então sobrepostos pelo programa junto as estruturas e estradas entre os passos temporais da simulação hidráulica, fornecendo o perigo apresentado aos agentes modelados (pessoas, veículos e construções). A Figura 3.13 ilustra como os resultados externos do modelo hidráulico estão vinculados ao sistema.

Figura 3.13 – Esquema de vinculação entre os dados hidrodinâmicos e o modelo HEC-LifeSim



Fonte: Lumbroso *et al.* (2021), adaptado pelo autor

#### 3.4.3.2 Módulo de Perda de Abrigo

Esse módulo simula a exposição da população nas construções durante a passagem do evento de referência como resultado das consequências associadas aos danos estruturais, submersão e colapso das estruturas. Para tanto, torna-se necessário a inserção de um inventário de estruturas no modelo, por meio de um arquivo vetorial, onde para cada estrutura deve-se determinar informações associadas aos ocupantes, as características do material construtivo e ao tipo de ocupação (Quadro 3.9). Este processo define parâmetros comuns para estruturas semelhantes, como condições de estabilidade estrutural, incertezas de altura de fundação, critérios de evacuação e limites de submersão.

Quadro 3.9 – Atributos requeridos pelo inventário de estruturas do modelo HEC-LifeSim

Atributo	Definição
Tipo de ocupação	Descreve a classe da estrutura (por exemplo: unifamiliar, sem porão, fundação elevada, um andar).
Número de andares	Número de andares da estrutura.
Tipo de construção	Descreve de que é feita a estrutura, com base no material de construção predominante.
Altura da fundação	Diferença entre a elevação do solo e a elevação do piso térreo.
Altura do andar térreo	Diferença entre a elevação do piso e a elevação do teto do andar térreo.
Altura acima do andar térreo	Diferença entre a elevação do piso e a elevação do teto para cada andar acima do térreo.

<b>Atributo</b>	<b>Definição</b>
Altura do sótão	Diferença entre a elevação do teto do andar mais alto e a elevação do telhado. Em algumas estruturas o valor pode ser zero.
População com menos de 65 anos (noite)	Estimativa de pessoas dentro da estrutura com idade inferior a 65 anos durante a noite (presumindo-se que seja 2h da manhã).
População com mais de 65 anos (noite)	Estimativa de pessoas dentro da estrutura com mais de 65 anos de idade durante a noite (presumindo-se que seja 2h da manhã).
População com menos de 65 anos (dia)	Estimativa de pessoas dentro da estrutura com menos de 65 anos durante o dia (presumindo-se que seja 14h).
População com mais de 65 anos (dia)	Estimativa de pessoas dentro da estrutura com mais de 65 anos durante o dia (presumindo-se que seja 14h).

Fonte: USACE. (2020), adaptado pelo autor

A análise de submersão refere-se à avaliação do nível d'água ocorrido nas estruturas e de suas consequências associadas quanto a probabilidade de sobrevivência. Quando os agentes simulados ficam presos em uma estrutura inundada, critérios relacionados ao tipo de construção e a existência de acessibilidade ao sótão e ao telhado das construções são utilizados para definir o limite entre as condições de zona risco baixo ou alto. Uma descrição dos critérios de submersão, suas aplicações e valores padrão são mostrados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Critérios de submersão

<b>Critérios</b>	<b>Descrição</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Valores Padrão</b>
A. Profundidade de alto risco em relação ao piso	Se a profundidade acima do piso do andar mais alto estiver acima do limite, as pessoas serão colocadas na zona de alto risco.	Ocupantes com mobilidade reduzida	1,2 – 1,8 metros, distribuição triangular com melhor estimativa de 1,5 metros.
B. Profundidade de alto risco em relação ao teto	Se a profundidade em relação ao topo do teto do andar mais alto estiver acima do limite, as pessoas serão colocadas na zona de alto risco	Ocupantes aptos fisicamente	0,15 – 0,5 metros, distribuição triangular com melhor estimativa de 0,3 metros.
C. Profundidade de alto risco em relação ao telhado	Se a profundidade acima do telhado for maior que o limite, as pessoas presas no telhado serão colocadas na zona de alto risco.	Ocupantes aptos fisicamente	0,9 – 1,5 metros, distribuição triangular com melhor estimativa de 1,2 metros.

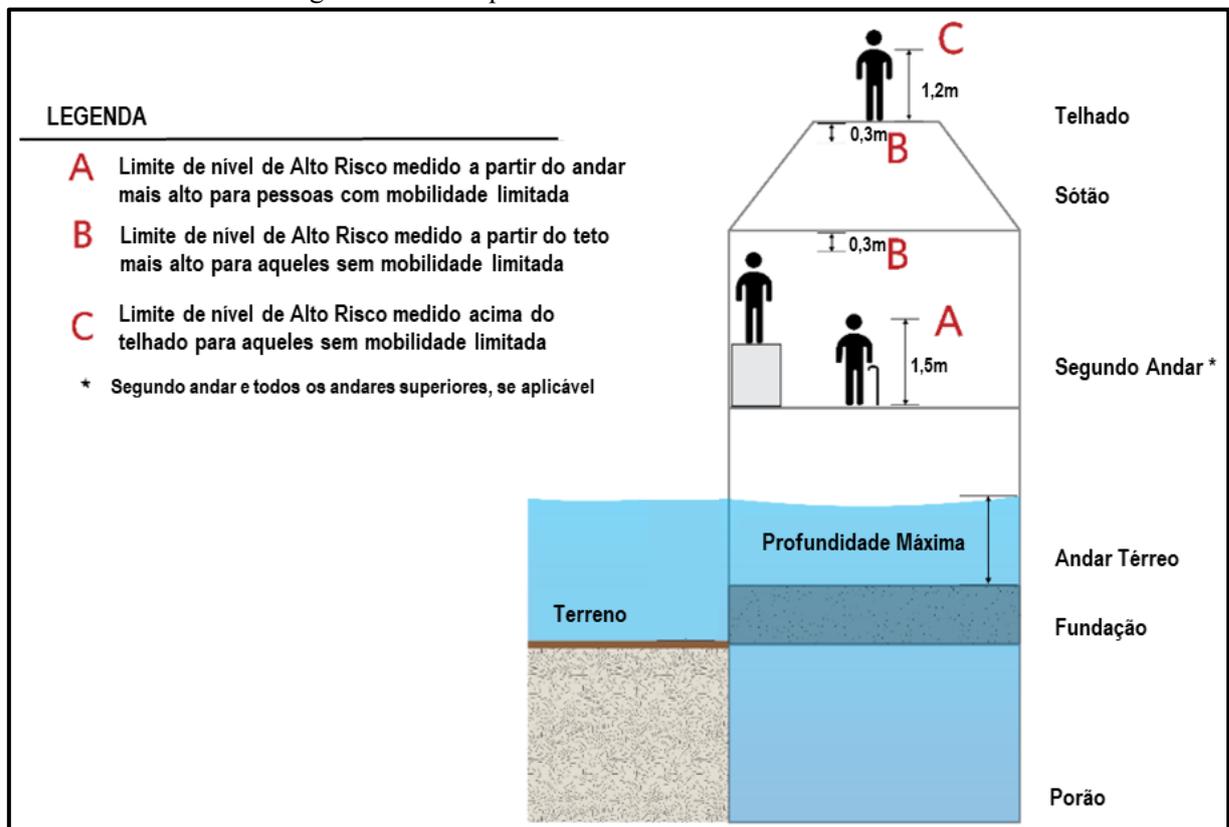
Fonte: USACE. (2020), adaptado pelo autor

Os critérios de submersão das estruturas são definidos em três tipos: A, B e C, conforme ilustrado na Figura 3.14. O critério de submersão A é medido a partir do piso do andar mais alto da estrutura e é utilizado para pessoas com mobilidade reduzida. A suposição dos valores padrão é que pessoas com mobilidade reduzida podem chegar ao andar mais alto em qualquer edificação, mas não conseguem escalar objetos ou nadar. O critério de submersão B é medido a partir do teto do andar mais alto, representando uma bolsa de ar em uma estrutura profundamente inundada. O critério B é utilizado para pessoas sem mobilidade limitada que

não possuem acesso ao telhado. Este critério também é usado para pessoas que vão para o sótão em vez do telhado. A suposição dos valores padrão é de que as pessoas irão subir em cima de algum objeto para permanecer acima da água.

O critério de submersão C, por fim, é medido a partir do topo do telhado. Esse é usado por pessoas sem mobilidade limitada que acessam o telhado. A suposição nos valores padrão é que se a água for mais alta que o telhado, ela deve estar se movendo lentamente ou, do contrário, a estrutura já teria desmoronado e nenhuma evacuação vertical seria calculada. Como, todavia, pode haver alguma velocidade e exposição a elementos externos como detritos/chuva/vento, os valores do critério C são inferiores ao critério A.

Figura 3.14 – Esquema de submersão adotado no HEC-LifeSim

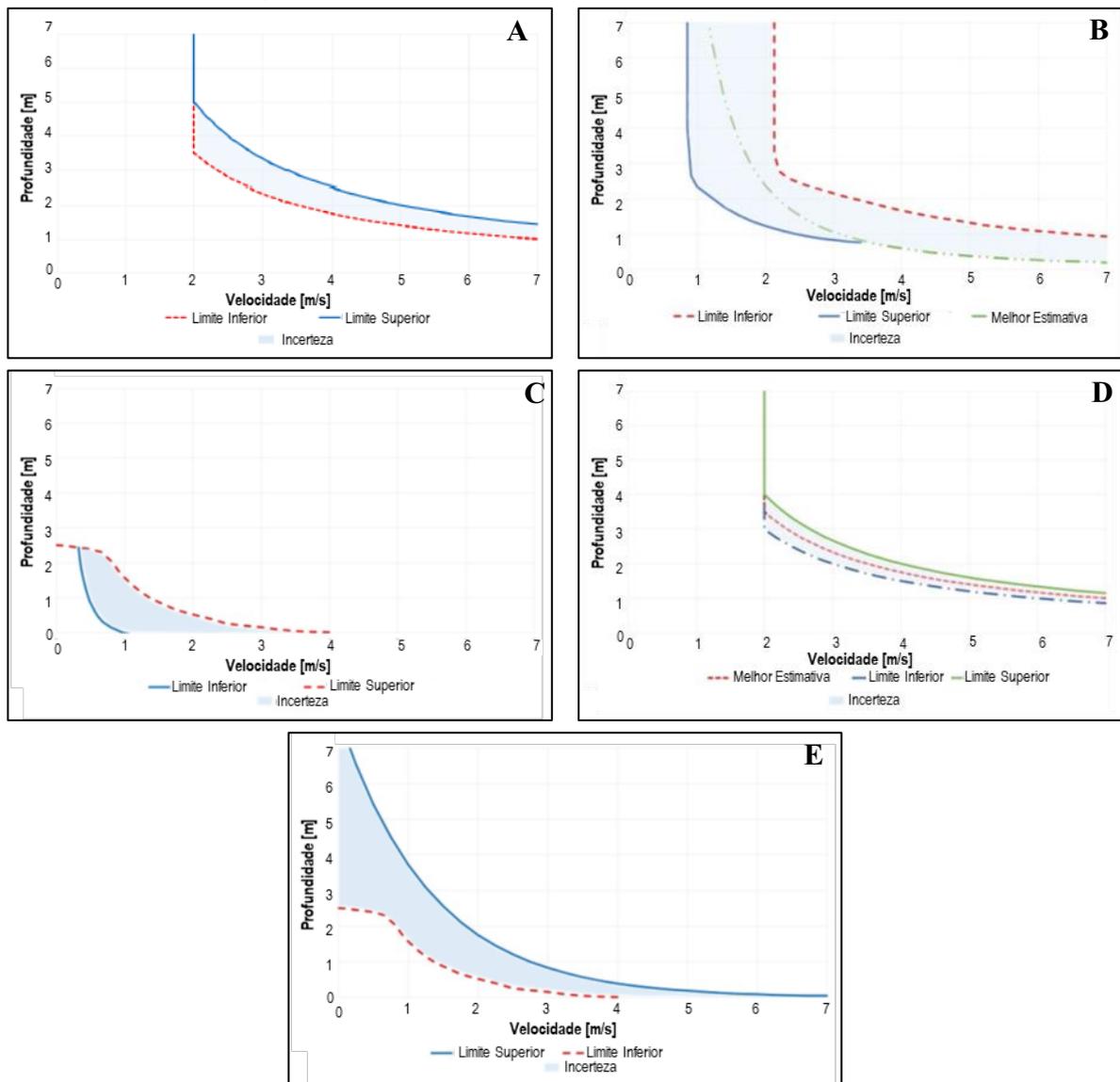


Fonte: USACE. (2020), adaptado pelo autor

Em relação à análise de estabilidade estrutural, as condições hidráulicas do evento são avaliadas para determinação das estruturas expostas que atingem os limites de colapso. Ao longo da simulação, se a profundidade e a velocidade atingirem um valor acima do limite funcional, a estrutura é colapsada, indicando uma zona de risco alto as pessoas envolvidas. No HEC-LifeSim, os critérios de estabilidade devem ser atribuídos a cada estrutura dentro do inventário antes da execução da simulação, sendo possível a inserção manual dos limiares ou a

seleção de um conjunto pré-determinado de informações incluído no modelo. Os critérios de estabilidade existentes no HEC-LifeSim são baseados em cinco tipos de construção: (i) Reforçadas em Aço (USACE (1985)); (ii) Ancoradas em Madeira (BECKER *et al.*, 2011; GALLEGOS *et al.*, 2012); (iii) Pré-Fabricadas (FEMA, 2009; DALE *et al.*, 2004); (iv) Alvenaria (CLAUSEN e CLARK, 1990); e (v) Madeira sem fundação (DALE *et al.*, 2004). Uma representação das curvas padrões de estabilidade existentes para os diferentes tipos de construção é apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Curvas padrões de estabilidade para os diferentes tipos de construção no HEC-LifeSim. A: Reforçadas em Aço; B: Ancoradas em Madeira; C: Pré-Fabricadas Alvenaria; D: Alvenaria; E: Madeira sem fundação

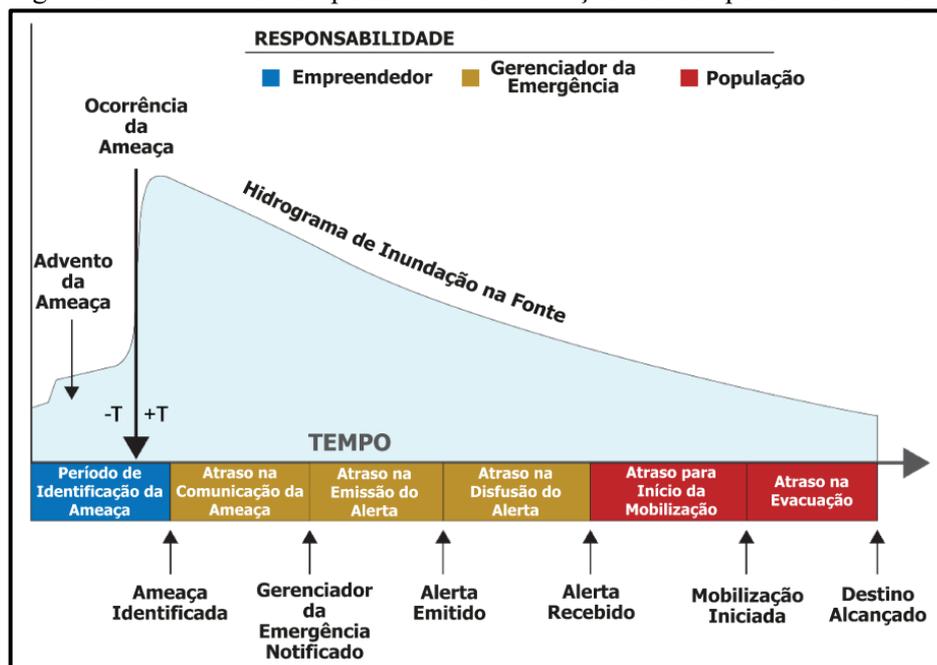


Fonte: USACE. (2020), adaptado pelo autor

### 3.4.3.3 Módulo de Alerta e Evacuação

Esse módulo descreve o processo do fluxo de informações e das tomadas de decisão que ocorrem desde a identificação do perigo até as ações protetivas adotadas pela população. As duas ações protetivas existentes no HEC-LifeSim são: (i) evacuação horizontal, por meio de locomoção a pé ou com veículos em direção a zonas seguras; e (ii) evacuação vertical, onde os agentes buscam refúgio junto aos pontos mais elevados de uma estrutura. Neste contexto, a partir do momento em que os avisos são emitidos, o módulo redistribui de forma dinâmica a população de seus locais iniciais para novos locais, atribuindo aos agentes diferentes categorias de zona de risco (segura, risco baixo e risco alto). De forma a ordenar o processo, o sistema fundamenta-se em uma linha do tempo de alerta e evacuação, onde são simulados os tempos de identificação e comunicação da ameaça, emissão e difusão do alerta, iniciação das ações de mobilização e evacuação (Figura 3.16).

Figura 3.16 – Linha do tempo de alerta e evacuação adotada pelo HEC-LifeSim



Fonte: USACE. (2020), adaptado pelo autor

Em síntese, o modelo baseia-se na identificação dos principais eventos da comunicação de desastres e dos períodos de tempo (atrasos) associados para alertar e evacuar a população em zonas de risco. O processo inicia-se na condição anterior a ocorrência da ameaça, o tempo entre o momento de identificação e a ocorrência efetiva é definido como o “Período de Identificação da Ameaça”, podendo ser negativo (anterior) ou positivo (posterior) a ocorrência do evento. Na sequência, o “Atraso na Comunicação da Ameaça” é o intervalo de tempo que

leva para quem identificou a ameaça alertar o agente responsável pela gestão da emergência (empreendimento ou órgão de defesa civil). Uma vez alertado, o agente deve notificar a população sobre o perigo, sendo este intervalo de elaboração e emissão do alerta tratado como o “Atraso na Emissão do Alerta”. Uma vez emitida a informação, o tempo para que ocorra a divulgação necessária para o público é referido como o “Atraso na Difusão do Alerta”. Por fim, o atraso entre o recebimento da informação e a efetiva tomada de decisão de ações protetivas pela população é denominado como o “Atraso para Início da Mobilização”. Em termos gerais, para que um processo de evacuação seja bem-sucedido, as tomadas de ações de proteção devem iniciar suficientemente a tempo para que a população em risco alcance os destinos seguros antes da chegada da ameaça.

Referentemente a definição dos intervalos de atraso na identificação e na comunicação da ameaça, o usuário deve realizar suas determinações com base nas características do evento e dos órgãos de gestão de emergência envolvidos. Por outro lado, em relação aos intervalos de atraso na emissão, recebimento dos alertas e mobilização, existe um conjunto de parâmetros pré-definidos no modelo fundamentados nos estudos de Sorensen & Mileti (2014a, 2014b, 2014c).

Para o atraso na emissão do alerta, Sorensen & Mileti (2014a) apontam quatro principais fatores determinantes para descrição da variável: (i) formalização dos procedimentos de planejamento e implementação (ii) experiência da equipe e relacionamento interpessoal; (iii) desempenho do sistema de alerta; e (iv) condições situacionais. Para o equacionamento das curvas de atraso na emissão do alerta, Sorensen & Mileti (2014a) fundamentarem-se nos estudos de Lindell *et al.* (2002) e Lindell & Perry (2004), propondo a utilização da Equação 17. Complementarmente, quatro diferentes curvas de distribuições de probabilidade padrão são indicadas pelos autores em função de diferentes condições de planejamento, conforme coeficientes apresentados na Tabela 3.6. As respectivas ilustrações das curvas são apresentadas na Figura 3.17.

$$P_t = 1 - e^{(-at^b)} \quad (17)$$

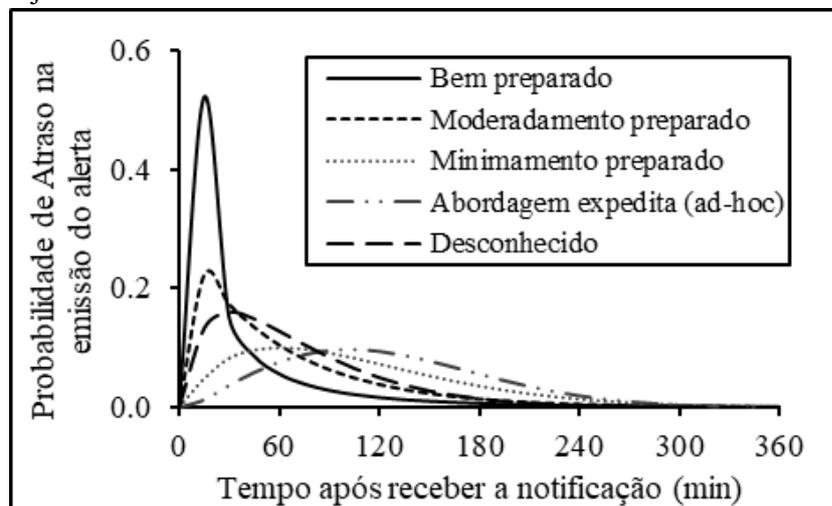
Onde  $P_t$  é a probabilidade de atraso na decisão;  $t$  é o tempo;  $a$  e  $b$  são coeficientes específicos para ajuste dos dados empíricos.

Tabela 3.6 – Coeficientes utilizados nas curvas de atraso na emissão do alerta em função da condição de planejamento

Condição de Planejamento	Coeficiente	
	a	b
Bem preparado	1,7	0,6
Moderadamente preparado	1,0	1,0
Minimamente preparado	0,4	1,5
Abordagem expedita ( <i>ad-hoc</i> )	0,2	2,0
Desconhecido	0,83	1,28

Fonte: Sorensen & Mileti (2014a), adaptado pelo autor

Figura 3.17 – Curvas de distribuição de probabilidade de atraso na emissão do alerta em função da condição de planejamento



Fonte: Sorensen & Mileti (2014a), adaptado pelo autor

Em relação ao atraso na difusão do alerta, Sorensen & Mileti (2014b) descrevem como suas duas principais variáveis explicativas: (i) O recebimento direto de alertas ou mensagens oficiais; e (ii) O recebimento indireto de alerta, por meio da comunicação com amigos, vizinhos, colegas de trabalho e parentes. Nesse contexto, a Equação 18 é proposta para representar a taxa de variação do recebimento do primeiro alerta de uma população ao longo do tempo, sendo função da eficácia dos sistemas diretos e indiretos de alertas e da população que ainda precisa ser alertada.

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = PU_t * (B_t + C_t - B_t * C_t) \quad (18)$$

Onde  $W$  é a população alertada;  $t$  é o tempo;  $\frac{\Delta W}{\Delta t}$  é a taxa de população alertada por passo de tempo;  $PU_t$  é a população que não foi alertada no passo de tempo  $t$ ;  $B_t$  é o coeficiente

relacionado à eficácia do sistema de alerta direto no passo de tempo  $t$ ; e  $C_t$  é o coeficiente relacionado à eficácia do alerta indireto no passo de tempo  $t$ .

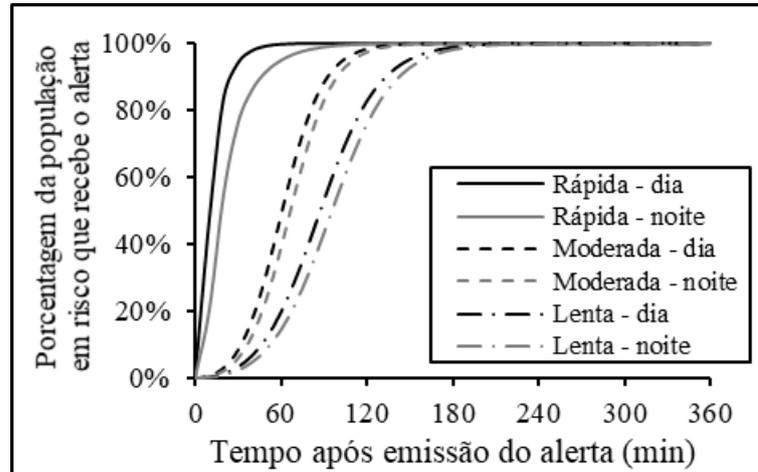
Os autores descrevem ainda a existência de dois fatores-chave para variação das condições de difusão de alerta entre diferentes eventos, sendo estes: (i) o número de canais de comunicação utilizados e a frequência de retransmissão do alerta pelos mesmos; e (ii) o período de transmissão do alerta (dia ou noite), condição onde as pessoas estão envolvidas em diferentes atividades ou estão dormindo. Assim, a partir da análise de casos históricos e de projetos anteriores de pesquisa, Sorensen & Mileti (2014b) desenvolveram 4 modelos de curvas de difusão de alerta como protótipos para representar diferentes faixas de eficácia do sistema, representando condições de difusão rápida, moderadamente rápida, moderada e lenta. Estas funções foram ainda ajustadas para diferentes períodos do dia, resultando em um total de oito curvas padrão de difusão de alerta. Os parâmetros da Equação 18 propostos a para cada cenário e período do dia são apresentados na Tabela 3.7. A respectiva ilustração das curvas é apresentada na Figura 3.18.

Tabela 3.7 – Valores dos coeficientes de eficácia do alerta direto e indireto para cada tipo de curva de difusão de alerta proposta

Tipo de Curva	Descrição	Período do Dia	Coeficientes de Eficácia	
			$B_t$	$C_t$
Rápida	Sistemas de alerta que utilizam vários canais de comunicação, incluindo canais de rápida velocidade, ampla penetração e disseminação frequente. Este é ainda complementado por canais com alta qualidade de mensagem.	Dia	5	0,1
		Noite	10	0,05
Moderadamente Rápida	Sistemas de alerta com vários canais sem adoção das tecnologias mais recentes de rápida difusão	Dia	50	0,08
		Noite	70	0,06
Moderada	Sistemas de alerta compostos por uma combinação de tecnologias tradicionais, mas não de tecnologia avançada	Dia	100	0,06
		Noite	120	0,05
Lenta	Sistemas de alerta que adotam tecnologias limitadas sem repetição de alertas.	Dia	150	0,04
		Noite	180	0,02

Fonte: Sorensen & Mileti (2014b), adaptado pelo autor

Figura 3.18 – Curvas de distribuição de probabilidade de difusão do alerta em função da condição de eficácia do sistema



Fonte: Sorensen & Mileti (2014b), adaptado pelo autor

Quanto ao atraso para início da mobilização, Sorensen & Mileti (2014c) consideram três fatores chave para explicação da variável: (i) características da mensagem de alerta; (ii) características do receptor; e (iii) características do contexto. A Equação 19 é proposta pelos autores para representação da resposta da população no tempo em função da velocidade de mobilização e do tempo médio para início das ações.

$$P_t = 1 - e^{\left(\frac{-t^2}{\alpha*\beta^2}\right)} \quad (19)$$

Onde  $P_t$  é a probabilidade cumulativa de ser mobilizado no tempo  $t$ ;  $\alpha$  é o coeficiente relacionado à velocidade da mobilização; e  $\beta$  é o coeficiente relacionado ao tempo médio para mobilização.

Sorensen & Mileti (2014c) propõem ainda quatro tipos de curvas de mobilização padrão (curvas “A” a “D”) com base na análise de dados empíricos de casos históricos. As características de cada curva e os coeficientes propostos associados a Equação 37 são apresentados na Tabela 3.8. Ainda, com base nas referidas curvas, USACE (2020) propõe uma ponderação de suas características, considerando a preparação e a percepção da população em risco frente ao evento de inundação. A preparação possui classificação de boa, pobre e desconhecida; e a percepção de provável, improvável e desconhecida. Assim, o modelo HEC-LifeSim apresenta nove possibilidades de curvas que representam as condições de mobilização da população em risco alertada. A Figura 3.19 ilustra as curvas características das condições de preparação boa e ruim e das percepções de possivelmente impactado e não impactado.

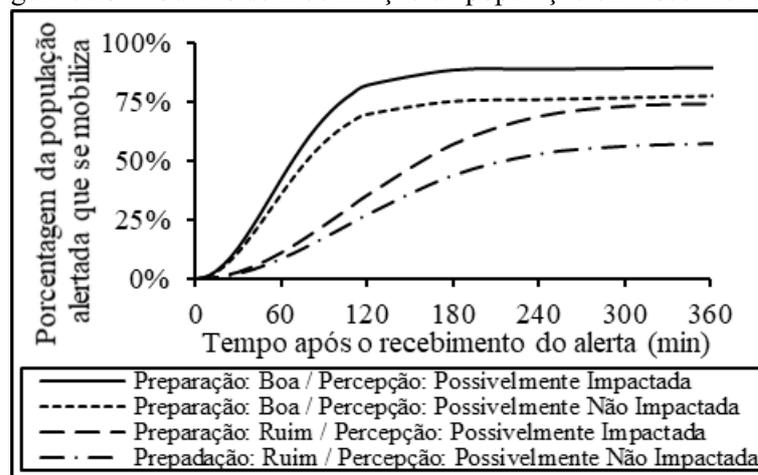
Importante destacar que as curvas padrões apresentadas para o atraso na emissão do alerta, na difusão e na mobilização representam uma estimativa média em função de eventos históricos observados nos Estados Unidos. Essas curvas também refletem o comportamento da população americana e a tecnologia associada na época de ocorrência em relação aos sistemas de alerta disponíveis. Assim, USACE (2020) destaca que muitos estudos se beneficiariam de curvas específicas dos órgãos de gerenciamento de emergência responsáveis pela região de estudo.

Tabela 3.8 – Valores dos coeficientes de mobilização da população em risco alertada

Curva	Descrição	Coeficientes	
		$\alpha$	$\beta$
A	Evacuação em comunidades que se encontram no estado da arte quanto ao sistema de alerta de emergência e quanto as ações de preparação e planejamento. Preparação boa e percepção de possivelmente impactada.	1,0	25
B	Evacuação em comunidades com grau intermediário de preparação, representando uma mistura de fatores existentes positivos e negativos quanto ao tempo de iniciação. Representa uma comunidade que fez algum progresso na melhoria de seu planejamento de alerta e preparação para emergências. Preparação boa e percepção de possivelmente não impactada.	1,5	45
C	Evacuação em comunidades com grau intermediário de preparação, representando uma mistura de fatores existentes positivos e negativos quanto ao tempo de iniciação. Representa uma comunidade que não apresentou progresso na melhoria de seu planejamento de alerta e preparação para emergências. Preparação ruim e percepção de possivelmente impactada.	2,0	85
D	Evacuação em comunidades que não planejaram e nem investiram em tecnologias de alerta de emergência. A resposta a qualquer emergência é improvisada. Preparação ruim e percepção de possivelmente não impactada.	2,5	200

Fonte: Sorensen & Mileti (2014c), adaptado pelo autor

Figura 3.19 – Curvas de mobilização da população em risco alertada



Fonte: USACE (2020), adaptado pelo autor

Nesse contexto, Sorensen & Mileti (2015a) desenvolveram um guia de entrevista com 52 perguntas que abrangem os possíveis eventos que ameaçam a região, características do plano

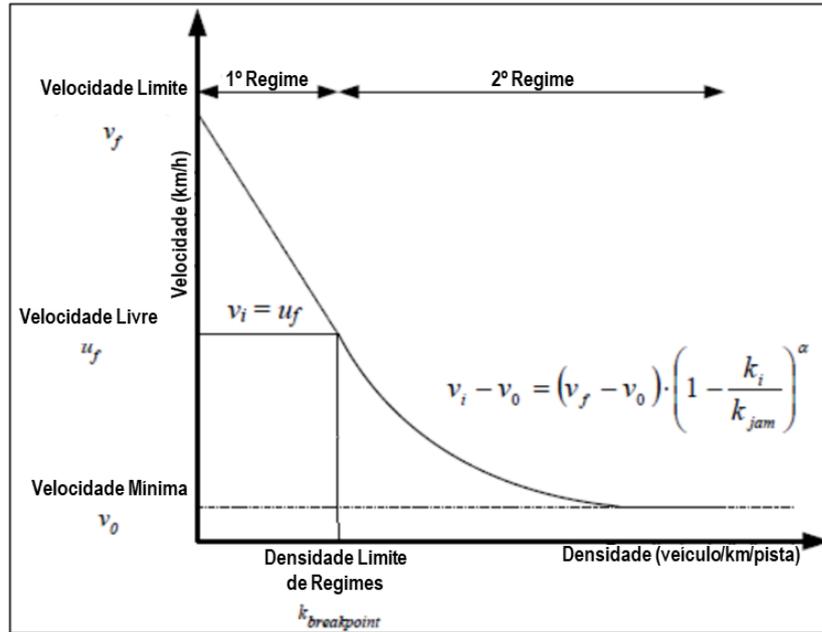
de ações emergenciais e dos sistemas de alerta, percepção e preparação da população e características pessoais dessa população (SILVA, 2020). A aplicação do referido questionário em conjunto: (i) com um sistema de pontuação das respostas propostos pelos autores (SORENSEN & MILETI, 2015b); e (ii) com um aplicativo de geração de curvas de alerta, difusão e mobilização elaborada por USACE–RCM (*Warning and Mobilization Curve Generator*), permite a estimativa dos valores máximos, mínimos e mais prováveis dos parâmetros das Equações 17, 18 e 37 para a área em estudo.

Em relação à dinâmica de evacuação, o modelo simula o tráfego ao longo da rede viária, respeitando a cronologia de evacuação dos agentes. No processo de simulação, os motoristas podem tomar decisões sobre sua rota com base em dados computacionais que incluem as condições de tráfego, os locais de destino, a profundidade inundada nas estradas, o tipo de veículo e a própria classificação da estrada. Para simulação tráfego, o software HEC-LifeSim utiliza uma versão modificada do modelo de simulação de tráfego de Greenshields (GREENSHIELDS et al., 1935), como mostrado na Equação 20 e Figura 3.20, para determinação da velocidade dos veículos em cada passo de tempo (MAHMASSANI et al., 2009). Caso a densidade de veículos na estrada se torne alta o suficiente, as velocidades começarão a diminuir. A densidade limite é o ponto em que os veículos transitam de velocidades livres de fluxo para condições congestionadas, mudando seu comportamento para um modelo de *Greenshields* de relação velocidade densidade (USACE, 2020).

$$\begin{aligned}
 v_i &= u_f & 0 \leq k_i \leq k_{bp} \\
 v_i - v_0 &= (v_f - v_0) \left( 1 - \frac{k_i}{k_{jam}} \right)^\phi & k_{bp} \leq k_i \leq k_{jam}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Onde  $v_i$  é a velocidade no trecho  $i$ ;  $u_f$  é a velocidade livre de fluxo no trecho  $i$ ;  $k_i$  é a densidade de veículos no trecho  $i$ ;  $k_{bp}$  é a densidade limite para ocorrência da velocidade livre de fluxo;  $v_0$  é a velocidade de congestionamento no trecho  $i$ ;  $v_f$  é a velocidade máxima de interceptação;  $k_{jam}$  é a densidade de engarrafamento no trecho  $i$ ; e  $\phi$  é o coeficiente potencial de *Greenshields*.

Figura 3.20 – Modelo modificado de Greenshields adotado no HEC-LifeSim



Fonte: USACE (2020), adaptado pelo autor

Nos casos onde os veículos ou grupo de pessoas são atingidos pela inundação durante a evacuação, os critérios de estabilidade são aplicados e, caso excedidos, os agentes afetados são alocados na condição de zona de risco alto. Os valores limites padrão adotados no HEC-LifeSim para estabilidade de veículos de alta e baixa altura são apresentados na Tabela 3.9. Por fim, a função padrão no HEC-LifeSim para estabilidade humana é mostrada na Figura 3.21 em unidades do sistema americano<sup>2</sup>.

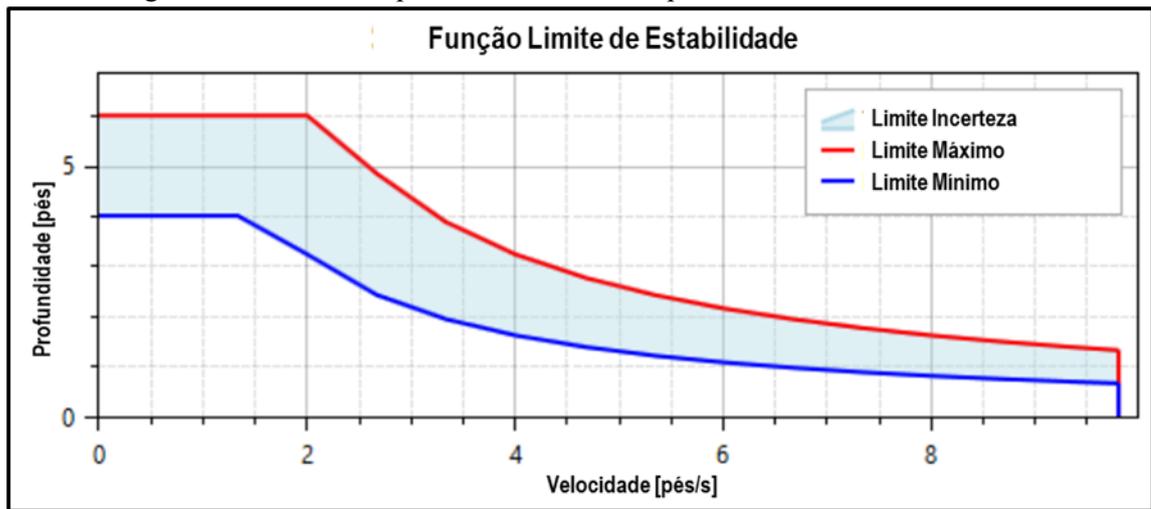
Tabela 3.9 – Critério padrão de estabilidade de veículos no HEC-LifeSim

Limite Hidráulico	Veículos Baixos (Carros e Vans)			Veículos Altos (Caminhões e SUVs)		
	Máximo	Mínimo	Melhor Estimativa	Máximo	Mínimo	Melhor Estimativa
Profundidade [m]	1,5	0,3	1,2	2	0,5	1,5
Velocidade [m/s]	6	3	4,5	6	3	6
Profundidade x Velocidade [m <sup>2</sup> /s]	1,3	0,3	0,8	2,4	0,6	1,2

Fonte: USACE (2020), adaptado pelo autor

<sup>2</sup> Onde 1,0 pé equivale a 0,305m.

Figura 3.21 – Critérios padrão de estabilidade para humanos no HEC-LifeSim



Fonte: USACE (2020), adaptado pelo autor

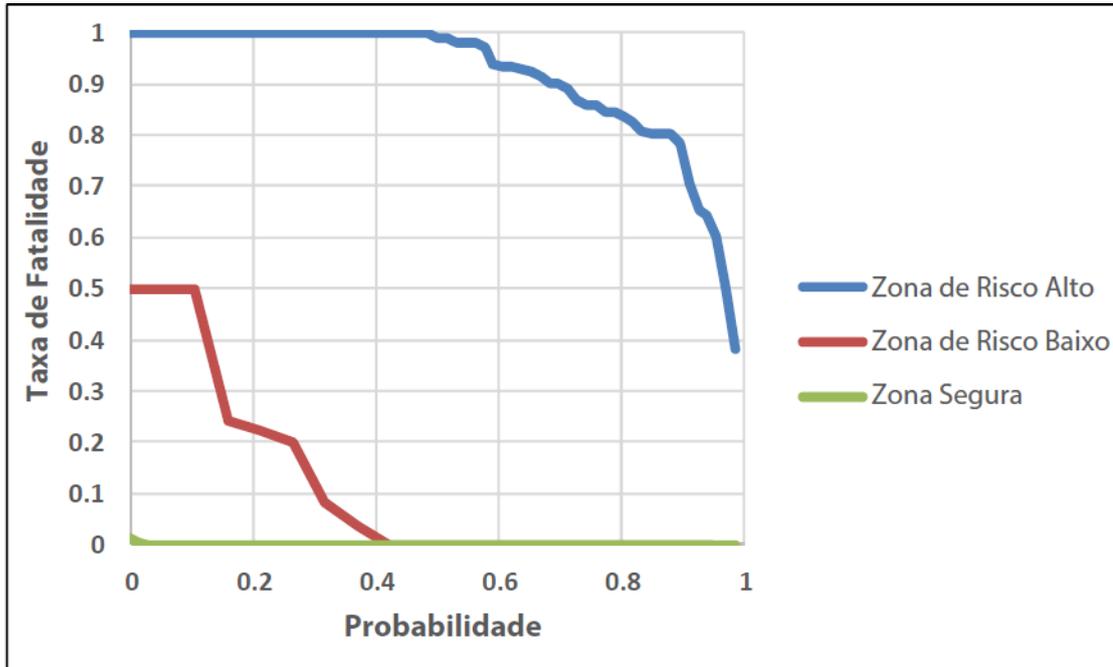
#### 3.4.3.4 Módulo de Perda de Vida

Este módulo consiste na aplicação das curvas de distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade para cada agente que foi alocado em uma zona de risco de inundação. Fundamentado nos estudos desenvolvidos por McClelland e Bowles (2002) e atualizados por Aboelata et al. (2003), o modelo possui três classificações de zonas de risco de inundação:

- Zona de Risco Alto: regiões onde ocorrem as condições mais severas de níveis e velocidades e os critérios de estabilidade e submersão de pessoas, veículos e estruturas são excedidos. Nessas condições, as vítimas são normalmente arrastadas pela força d'água, soterradas por estruturas colapsadas ou ficam presas debaixo d'água, de modo que a sobrevivência depende, em grande parte, do acaso. A probabilidade de fatalidade nesta zona varia de 50% a 100%, com valor médio de 90%;
- Zona de Risco Baixo: condição onde os agentes estão expostos a enchentes relativamente calmas, com condições de níveis rasos e velocidades baixas e a estabilidade de pessoas e estruturas não é comprometida. Nesses termos, existe um risco residual devido ao potencial intrínseco de ocorrência de fatalidades quando há contato da população com a água em locais não destinados a tal interação. A probabilidade de fatalidade nesta zona varia de 0% a 50%, com valor médio de 10%;
- Zona Segura: áreas secas ou sem exposição a inundação. A probabilidade de fatalidade nestas zonas é virtualmente zero.

As curvas de distribuição de probabilidade de taxas de fatalidade propostas pelos autores são apresentadas na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade utilizados no HEC- LifeSim para cada zona de risco de inundação



Fonte: USACE (2018), adaptado pelo autor

### 3.5 ESTUDOS ANTERIORES DESENVOLVIDAS NO CENÁRIO NACIONAL E INTERNACIONAL

Visando a caracterização das aplicações do modelo McBreach para a modelagem probabilística de abertura de brecha e do modelo HEC-LifeSim para modelagem de estimativa do potencial de perda de vidas no cenário nacional e internacional, efetuou-se uma avaliação dos principais trabalhos publicados na área.

No âmbito da utilização do *software* McBreach para a modelagem probabilística de abertura de brecha, Lara (2016) empregou o referido modelo para avaliar a ruptura hipotética da UHE Tucuruí, em Tucuruí/PA. Três cenários de brecha foram propostos para as estruturas de terra e enrocamento da barragem, empregando a metodologia probabilística e comparando os resultados dos hidrogramas de saída e manchas de inundação com os resultados da metodologia determinística. Os resultados demonstraram que com a metodologia probabilística torna-se possível calcular o risco de cotas de inundação, referente uma brecha de ruptura, ao longo do vale à jusante. O autor ainda concluiu que o emprego de equações empíricas e recomendações de engenharia isoladamente se mostram insuficientes para desenvolver estudos de ruptura de barragens para empreendimentos com grandes volumes de reservação, maiores do que 600 hm<sup>3</sup>.

Goodell *et al.* (2018) descreveu os principais benefícios da modelagem probabilística de abertura de brecha em barragens, bem como detalhou os procedimentos a serem utilizados para realização da análise. Os autores ainda apresentaram os resultados de uma abordagem probabilística de ruptura aplicada a uma barragem em Oregon (EUA) e comparam os resultados com o método determinístico tradicional. Os autores concluíram que a metodologia probabilística auxilia na seleção de parâmetros de brecha mais apropriados para fins de classificação de perigo das estruturas. Da mesma forma, destacaram que a informação adicional fornecida pela abordagem probabilística permite que decisões muito mais informadas possam ser tomadas.

Vieira e Eleutério (2021) conduziram uma comparação dos resultados gerados por um estudo hipotético de ruptura pelo método determinístico com os resultados apresentados segundo uma abordagem probabilística de abertura de brecha. Como estudo de caso, foram utilizadas bases de dados relacionadas à Barragem B1, em Brumadinho-MG. Para a abordagem probabilística, os autores utilizaram o software McBreach v.5.0.7. Para ambas as abordagens, foram considerados fluidos newtonianos. A propagação da onda para jusante foi realizada por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional no software HEC-RAS v. 5.0.7. Quando comparada aos resultados gerados pelo modelo probabilístico, a mancha de inundação gerada pelo modelo determinístico encontrou-se entre as probabilidades de ocorrência de 1% e 10%. Segundos os autores, as principais limitações identificadas no estudo foram a ausência de trabalho de campo para determinação de parâmetros importantes para a simulação, as incertezas associadas à quantidade de volume potencialmente propagado a jusante e a subjetividade na escolha dos modelos de distribuição estatística para os parâmetros inseridos no modelo McBreach.

Belo *et al.* (2022) avaliaram a influência dos parâmetros mais relevantes para a configuração das análises estatísticas de brechas de ruptura. Com a utilização do software McBreach, os autores conduziram uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros de brecha mais relevantes, seguido de uma avaliação de incerteza em relação à definição estatística das vazões máximas de ruptura. Os resultados demonstraram que as vazões máximas pelo modo de falha por galgamento são mais sensíveis aos parâmetros de tempo de formação da brecha, seguido pela altura e largura final da brecha. Combinados, os parâmetros foram responsáveis por 85% das vazões máximas de ruptura. Resultados adicionais indicaram ainda magnitudes altamente variáveis para as vazões máximas de ruptura, dependendo da definição

estatística dos parâmetros de brecha. O trabalho apontou que esta variabilidade impacta significativamente o risco de inundação estimado associado à brecha de ruptura, impactando a delimitação da zona de inundação, a preparação de planos de ação de emergência e a escala de futuros projetos de barragens. Conseqüentemente, os autores destacam a importância de investigações adicionais para reduzir essa incerteza e, portanto, o risco associado às avaliações de abertura de brecha de ruptura.

Pereira *et al.* (2023) conduziram um trabalho comparativo de duas diferentes premissas relacionadas à análise de incertezas em parâmetros de brecha. As premissas diferiram-se em relação ao estabelecimento dos limites máximos dos parâmetros de brecha relacionados à possibilidade ou impossibilidade de formação de brechas com dimensões superiores aos limites geométricos do terreno natural onde a barragem está implantada. Um estudo de caso foi conduzido para uma barragem hipotética construída em uma região montanhosa. Ao total, foram realizadas 8.000 simulações de ruptura, com utilização acoplada dos programas McBreach e HEC-RAS 2D, considerando a variação aleatória de cinco parâmetros de brecha. As restrições impostas à geometria das brechas impactaram significativamente a magnitude das vazões de pico dos hidrogramas de ruptura, levando à diferença de até 47% entre os resultados das diferentes premissas. Os autores concluíram que a definição de restrições geométricas das brechas representa uma importante etapa na abordagem probabilística, devendo ser atentamente observada de acordo com a realidade física da barragem em estudo.

No âmbito da utilização do *software* HEC–LifeSim para modelagem de estimativa do potencial de perda de vidas, Risher *et al.* (2017) utilizaram o referido modelo para validação de uma inundação causada pela ruptura de um dique ocorrida na cidade de *Joso* no Japão no ano de 2015. Para caracterização da população e das construções em risco foram utilizados dados censitários. Foram conduzidos cenários analisando diferentes critérios de estabilidade das construções. Os resultados demonstraram uma tendência de superestimativa na quantificação de fatalidades. Entre os motivos identificados, os autores destacaram a limitação do modelo em representar os processos de evacuação em intervalos muito curtos de chegada da onda de inundação.

Hill *et al.* (2018) realizaram uma avaliação comparativa entre os modelos HEC–LifeSim e RCEM (USBR, 2015). As avaliações foram conduzidas para 5 barragens de acumulação da água na Austrália com diferentes características a jusante. Os resultados apontaram para valores superiores das medianas de fatalidade obtidas com o *software* HEC-

LifeSim em relação aos obtidos com o RCEM. Como conclusões, os autores destacaram as limitações intrínsecas da aplicação de modelos empíricos e enfatizaram as potencialidades de aplicação do modelo HEC-LifeSim no desenvolvimento e análise de planos de emergência.

Lara e Lohn (2019) desenvolveram um estudo piloto de análise de perda de vida com o modelo HEC-LifeSim para um caso hipotético em uma região do estado de Minas Gerais. O trabalho teve por objetivo introduzir o modelo como recurso alternativo na busca de subsídios para a construção de planos de emergência mais efetivos. As metodologias adotadas para construção do modelo não foram detalhadas e os resultados tiveram enfoque na apresentação da interface e dos principais elementos de entrada do modelo, bem como também no processo de definição e seleção de curvas de mobilização e na ilustração dos cálculos de perdas de vida correlacionados com as análises de incertezas efetuadas pelo método de *Monte Carlo*. A discussão dos resultados tratou da identificação das correlações entre as incertezas temporais decorrentes dos critérios e parâmetros selecionados e a taxa de fatalidade dos cenários, ilustrando como é possível identificar aspectos a serem otimizados nos planejamentos de preparação. As conclusões apontaram para necessidade de um maior número de estudos de aplicação da metodologia no cenário nacional e definiram como requisito principal a necessidade de construção de uma base de dados integrada e confiável, a nível federal, para tornar a aplicação do modelo compatível com a realidade brasileira.

Matos e Eleutério (2019) realizaram uma comparação entre os resultados prospectivos sobre a mancha de inundação e perdas de vida associadas ao evento hipotético de ruptura da Barragem de Fundão (Mariana/MG) e os dados reais observados no desastre ocorrido em 2015. As informações populacionais e geográficas necessárias foram obtidas através de produtos do censo demográfico realizado pelo IBGE no ano de 2010. A quantificação e distribuição do número de habitantes e estruturas foi realizada através de técnicas de transferência de dados por desagregação. Em relação aos parâmetros de alerta e evacuação, 5 cenários foram simulados avaliando diferentes hipóteses de identificação e comunicação da ameaça, propagação de aviso e tomada de ações protetivas. Os resultados identificaram uma correlação entre a melhoria do sistema de alerta existente e a redução do número de perda de vidas. Além disso, os valores de fatalidade calculados superestimaram o número de mortos devido à ruptura real, sendo uma das possíveis causas levantadas a não consideração das características reológicas do rejeito, implicando em um escoamento do fluido com maior velocidade e em uma diminuição do tempo da chegada da onda de ruptura.

Silva *et al.* (2020) utilizaram o modelo HEC-LifeSim para simulação de alerta, evacuação e perdas de vidas associadas à ruptura hipotética da Barragem da Pampulha (Belo Horizonte – MG). Os dados populacionais e estruturais foram obtidos através do mapeamento da vulnerabilidade do vale a jusante, cujas análises foram realizadas exclusivamente com dados secundários provenientes das bases do censo demográfico do IBGE de 2010 e do Município de Belo Horizonte. A definição dos parâmetros de alerta e evacuação foi fundamentada em dois cenários distintos: um eficiente e outro ineficiente em relação a preparação da população para reagir à emergência de ruptura da barragem. Os resultados encontrados apontaram para o efeito de redução nas fatalidades ocorridas à medida que em que se incrementam os sistemas de alerta e a capacidade de mobilização local. Constatou-se também a existência de faixas limites de tempo de antecipação do alerta, em relação à ocorrência do rompimento, para obter-se uma redução significativa da perda de vida. Por fim, também foi destacado o potencial da metodologia para redução de fatalidades por meio da identificação de processos a serem otimizados nas atividades de preparação.

Silva (2020) avaliou a aplicabilidade de dois modelos de estimativa de perdas de vidas com princípios diferentes para inundações provenientes das rupturas de barragens de rejeitos: o modelo empírico RCEM (*Reclamation's Consequence Estimating Methodology*) (USBR, 2015) e o modelo dinâmico baseado em agentes HEC-LifeSim. Para tanto, dois casos de rupturas ocorridos em Minas Gerais foram analisados: São Francisco (Miraf) e Fundão (Mariana). No estudo, a determinação da população e da quantidade de domicílios admitiu a utilização dos produtos do censo demográfico realizado pelo IBGE no ano de 2010 e a aplicação de técnicas de transferências espaciais de dados. A caracterização do módulo de alerta e mobilização fundamentou-se no conhecimento prévio de como ocorreram os processos de evacuação nos casos estudados. Uma análise de sensibilidade também foi conduzida no estudo com objetivo de identificar os parâmetros que possuem maior impactos nas incertezas dos resultados da modelagem. As conclusões apontaram para o potencial da análise da estimativa de fatalidades, por meio modelagens computacionais e simulações matemáticas, como forma de subsidiar os planejamentos de emergência. Destacou-se que os resultados provenientes da utilização de dados censitários para realização da análise de vulnerabilidade e exposição se aproximaram dos valores observados em um dos eventos analisados, no entanto, a metodologia aplicada apresentou diversas limitações devido às inúmeras hipóteses adotadas, devendo a aplicação da mesma, para outros estudos, ser analisada com critério. Enfatizou-se também a

necessidade de adequação do processo de caracterização das curvas de alerta e evacuação da população para o contexto brasileiro.

Kalinina *et al.* (2021) verificaram as incertezas associadas aos parâmetros de entrada do HEC-LifeSim considerando a ruptura hipotética de barragens localizadas na Suíça. Para tanto, foi proposta uma metodologia de ajuste ao modelo original. Denominado pelos autores do trabalho de metamodelo, este foi baseado na Expansão de Caos Polinomial (ECP) para a realização de um maior número de simulações com tempo computacional inferior. Os resultados desse estudo indicaram que os parâmetros de entrada de população residente, taxa de fatalidade e atraso na emissão do alerta apresentam maior impacto na variabilidade das estimativas de perdas de vidas no contexto das barragens suíças avaliadas. Os autores concluíram que a metodologia proposta permite avaliar as incertezas inerentes aos dados de entrada e obter maior confiabilidade nos resultados gerados pelo modelo, permitindo a elaboração de planos de ações emergenciais mais eficientes.

Bilali *et al.* (2021) avaliaram a ruptura de uma barragem localizada no Marrocos, com utilização dos modelos HEC-RAS e HEC-LifeSim. O foco de análise foi a comparação de duas estratégias de evacuação na malha viária. A estratégia denominada “eficiente” adotou rotas de fugas e fechamento de estradas, entre outras ações; A estratégia denominada “ineficiente”, por sua vez, não adotou estratégias de otimização de rotas. Os resultados mostraram que a adoção de medidas de gestão na malha viária durante os eventos de evacuação diminuiu significativamente a probabilidade de perdas de vidas.

Nascimento *et. al.* (2023) modelaram o desastre da barragem de rejeitos B-I de Brumadinho com a utilização dos *softwares* livres HEC-RAS 2D e LifeSim. O objetivo dos autores foi realizar uma análise comparativa dos resultados gerados por Lumbroso *et al.* (2021) com o uso dos softwares MIKE21 e LSM. Para a caracterização da população a jusante foram resgatadas informações relacionadas ao quadro de funcionários da Vale presente na área de operação no momento da ruptura. Foram também adotadas estimativas de distribuição populacional para as demais edificações residenciais no vale a jusante, conforme premissas propostas por Lumbroso *et al.* (2021). Para a estimativa de perda de vida, foram consideradas diferentes cenários alternando os parâmetros de modo de evacuação e de atraso na emissão do alerta. Seguindo as mesmas premissas do estudo comparativo, não foram considerados tempos de atraso na identificação do risco, na difusão do alerta e para início da mobilização. Os resultados demonstraram que o software HEC-LifeSim representou adequadamente as

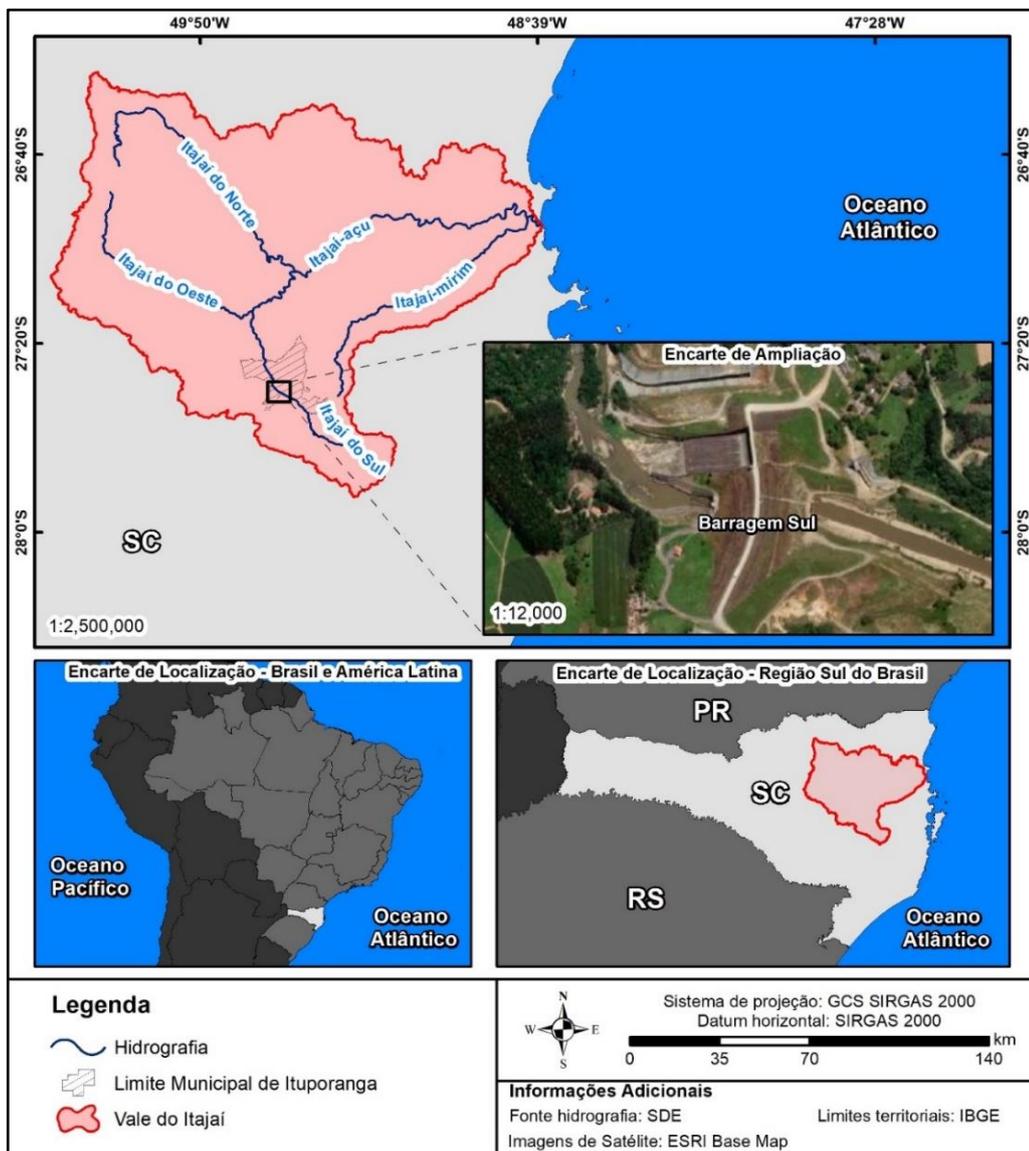
fatalidades, demonstrando ligeira superestimativa em relação ao evento real. Da mesma forma, os resultados alcançados ficaram próximos ao de Lumbroso *et al.* (2021) em grande parte das simulações e os efeitos do alerta se mostraram significativos para se reduzir fatalidades. As margens de erro dos resultados simulados demonstraram a importância do desenvolvimento de estudos para maior compreensão das incertezas associadas a essas modelagens preditivas.

De modo geral, nos estudos até então desenvolvidos, observam-se aplicações segmentadas entre as metodologias de avaliação probabilística de abertura de brecha e de modelagem de estimativa do potencial de perda de vidas. Nesse contexto, o presente trabalho se enquadra como uma contribuição quanto as potencialidades de aplicação integrada das metodologias.

#### 4 AREA DE ESTUDO E CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

A Barragem Sul foi escolhida para condução do estudo de rompimento hipotético e aplicação dos modelos de estimativa de perda de vida. As principais condicionante para seleção da estrutura fundamentaram-se: (i) na disponibilidade de dados topográficos e hidrológicos; (ii) existência de dados cadastrais; e (iii) classificação da barragem como de alto dano potencial associado. A estrutura localiza-se no município de Ituporanga, no estado de Santa Catarina, no Rio Itajaí do Sul, um dos principais afluentes da porção alta da bacia do Rio Itajaí Açu. O empreendedor responsável pela estrutura é a Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. A Figura 4.1 ilustra a localização da área de estudo.

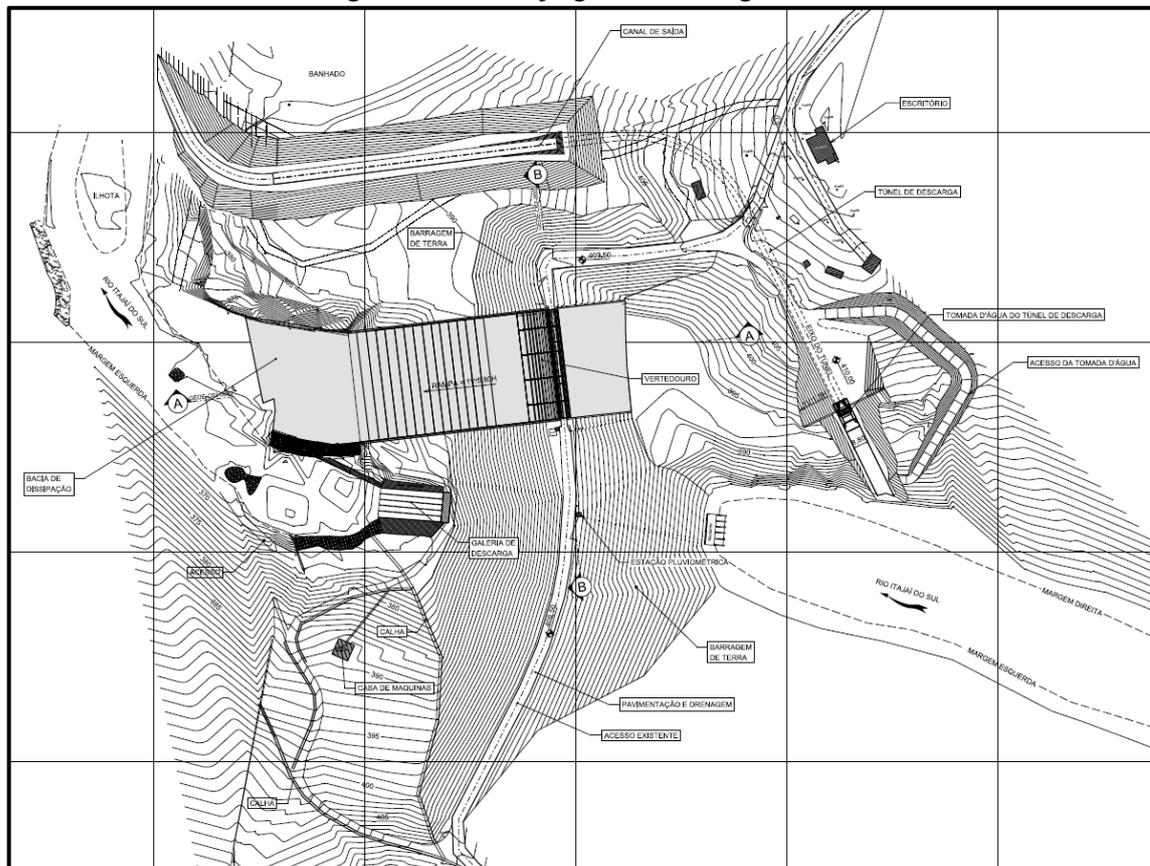
Figura 4.1 – Localização da Barragem Sul no contexto da Bacia do Rio Itajaí-Açu (Vale do Itajaí) em Santa Catarina.



Fonte: Própria do autor

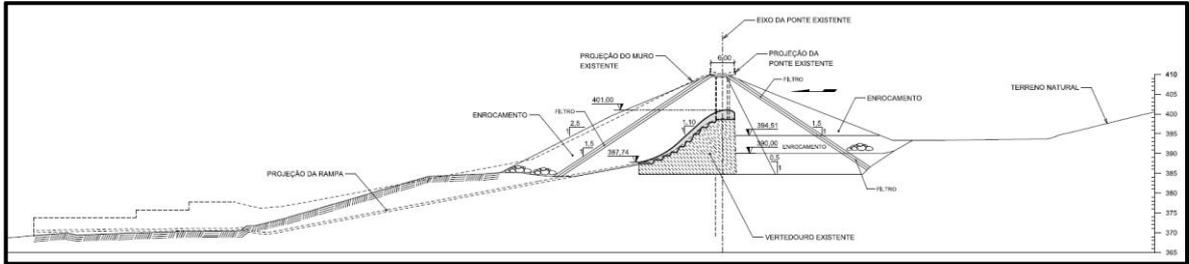
Conforme (DCSC, 2018a), a Barragem Sul é caracterizada como uma estrutura mista. O barramento é composto por enrocamento compactado e núcleo em argila, com altura máxima de 43,50 m e comprimento de crista de, aproximadamente, 390 m, com largura de 6 m. A barragem tem crista na cota 409,50 m, sendo que o nível máximo maximum encontra-se na cota 408 m. Os taludes de montante têm inclinação 1,0V:2,5H e os de jusante 1,0V:2,0H. O sistema extravasor é composto por: (i) por um vertedouro de soleira livre em concreto armado, com altura de 9,0 m e comprimento de 65,0 m; (ii) cinco comportas de fundo, instaladas na margem esquerda com seção de controladora de diâmetro de 1,50 m; e (iii) túnel e canal de descarga na margem direita, com uma comporta vagão de seção 4 x 6 m. O volume total de armazenamento do reservatório para NA Normal (401,0 m) é de 104,0 hm<sup>3</sup> e para o NA máximo maximum (408,0 m) é de 190,0 hm<sup>3</sup>. A Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 ilustram o arranjo geral, perfil transversal, perfil longitudinal e registro fotográfico aéreo da estrutura, respectivamente. O Quadro 4.1, por fim, apresenta a ficha técnica da barragem com o resumo de suas principais informações.

Figura 4.2 – Arranjo geral da Barragem Sul



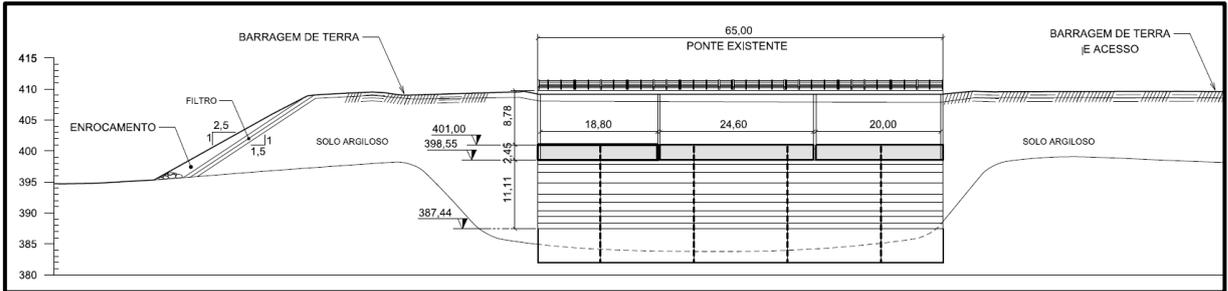
Fonte: Sanetal (2013a), adaptado pelo autor

Figura 4.3 – Seção Transversal da Barragem Sul (A-A)



Fonte: Sanetal (2013b), adaptado pelo autor

Figura 4.4 – Seção Longitudinal da Barragem Sul (B-B)



Fonte: Sanetal (2013b), adaptado pelo autor

Figura 4.5 – Registro fotográfico aéreo da Barragem Sul e indicação dos principais componentes da estrutura



Fonte: NSC Total (2017), adaptado pelo autor

Quadro 4.1 – Ficha Técnica da Barragem Sul – Ituporanga/SC

<b>1. Reservatório</b>	
<b>1.1 Localização</b>	
Rio	Rio Itajaí do Sul
Bacia	Atlântico, Trecho Sudeste
Sub-bacia	Rio Itajaí-Açu
Municípios	Alfredo Wagner, Chapadão do Lageado, Ituporanga
Estado	Santa Catarina
Latitude	27° 30' 14,93" S
Longitude	49° 33' 19,56" W
Distância da foz	208 km
<b>1.2 Níveis d'Água a Montante</b>	
Máximo Maximorum (enchente decamilenar)	408,00 m
Máximo Normal <sup>3</sup>	401,00 m
Mínimo Operacional <sup>4</sup>	367,25 m
<b>1.3 Áreas</b>	
De drenagem no local do barramento	1163,38 km <sup>2</sup>
De inundação do reservatório na El. 401,00 m (N.A. Máximo Normal) <sup>5</sup>	7,26 km <sup>2</sup>
De inundação do reservatório na El. 408,00 m (N.A. Máximo Maximorum) <sup>6</sup>	10,77 km <sup>2</sup>
<b>1.4 Volumes</b>	
El. 401,00 m (N.A. Máximo Normal)	104,03 hm <sup>3</sup>
El. 408,00 m (N.A. Máximo <i>Maximorum</i> )	190,00 hm <sup>3</sup>
<b>2. Barragem</b>	
Tipo	Enrocamento compactado com núcleo de argila
Comprimento da crista	390,00 m
Largura da crista	6,0 m
Inclinação do talude de montante	1,0V:2,5H
Inclinação do talude de jusante	1,0V:2,0H
Cota da crista	409,50 m
Borda livre	1,50 m
Altura máxima	43,50 m
<b>3. Vertedouro</b>	
Tipo	Soleira Livre
Comprimento total da estrutura na projeção horizontal	65,00 m
Altura <sup>7</sup>	9 m
Dissipação de energia	Leito do rio
Cota da soleira	401,00 m
Capacidade máxima de descarga	2.582,00 m <sup>3</sup> /s
Tempo de Retorno	10.000 anos

<sup>3</sup> Elevação da soleira do vertedouro.

<sup>4</sup> Elevação da geratriz inferior do descarregador de fundo.

<sup>5</sup> Áreas sem efeito de remanso do reservatório

<sup>6</sup> Áreas sem efeito de remanso do reservatório.

<sup>7</sup> Altura entre a soleira do vertedouro e a crista da barragem.

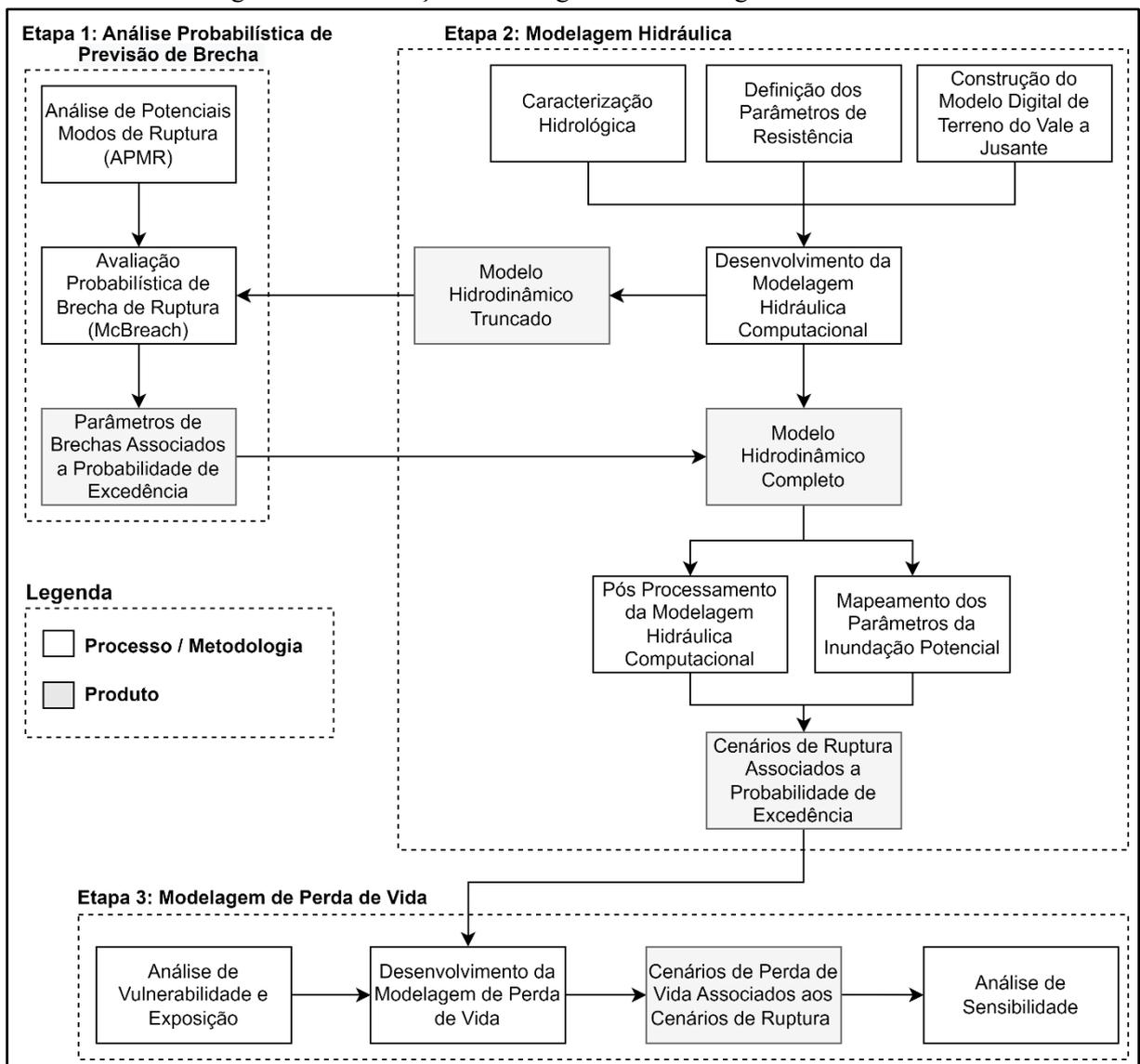
<b>4. Galeria</b>	
Tipo	Descarregador de Fundo
Número de galerias	5
Diâmetro	1,50 m
Cota soleira geratriz inferior	367,25 m
Capacidade máxima de descarga	200 m <sup>3</sup> /s
Comprimento	223,55 m
Comportas tipo	Gaveta
Acionamento	Hidráulico com 1 servomotor e circuito de tubulação por comporta
Diâmetro da comporta	1,5 m
<b>4.1 Grades Comportas</b>	
Número de grades comportas	5
Dimensão tipo 1 (vão x comprimento)	3,10 x 5,00 m
Dimensão tipo 2 (vão x comprimento)	3,00 x 5,00 m
<b>5. Túnel e Canal de Descarga</b>	
Tipo	Túnel/canal extravasor
Seção	Retangular na entrada e semi-retangular na saída
Cota soleira entrada	380,00 m
Cota soleira saída	372,39 m
Capacidade máxima de descarga	284,10 m <sup>3</sup> /s
Comportas tipo	Vagão
Acionamento	Por talha elétrica
Largura da comporta	4,00 m
Altura da comporta	6,00 m
<b>5.1 Grades Comportas</b>	
Tipo	fixa
Quantidade	1
Vão livre	5,80 m
Altura livre	9,88 m
Espaçamento entre linhas de centro das barras verticais	200 mm
Inclinação da grade com a vertical	1:4V

Fonte: DCSC (2021a), adaptado pelo autor

## 5 METODOLOGIA

A metodologia geral deste trabalho consistiu na realização de três principais etapas: (i) Análise probabilística de previsão de brecha de ruptura da Barragem Sul (ii) Simulação do rompimento da Barragem Sul em modelo hidráulico computacional; e (iii) Simulação da perda de vida com aplicação do modelo HEC-LifeSim. A Figura 5.1 ilustra o fluxograma metodológico proposto. As Seções 5.1, 5.2 e 5.3 detalham as principais metodologias adotadas em cada etapa.

Figura 5.1 – Ilustração do fluxograma metodológico adotado neste trabalho



Fonte: Própria do autor

## 5.1 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE PREVISÃO DE BRECHA

Para desenvolvimento de um estudo de ruptura de barragem é necessário estabelecer as hipóteses de ruptura e definir os modos de falha. Para tanto, são elencados os potenciais eventos adversos e as circunstâncias anômalas que podem levar a origem da falha da estrutura e, diante desses eventos, são definidos os prováveis mecanismos de ruptura. Definidos esses mecanismos, o processo determinístico é fundamentado na seleção daquele de maior dano para o vale a jusante para composição do cenário de Ruptura Hipotética da Barragem em estudo (FEMA, 2013; ANA, 2016). O método probabilístico, conforme descrito na Seção 3.3, implica na execução de um maior número de atividades para estimativa dos parâmetros de formação da brecha, incluindo a análise do projeto da barragem, dos registros de inspeções, do uso de equações empíricas e das recomendações de engenharia para determinação de faixas de amostragem dos parâmetros de brecha (GOODELL, 2012).

No caso do estudo de ruptura hipotética da Barragem Sul, avaliou-se qualitativamente a probabilidade de ocorrência de eventos adversos, e posteriormente a probabilidade de ruptura da barragem para diferentes mecanismos de ruptura. Conforme apresentado pelo fluxograma metodológico (Figura 5.1), os parâmetros de brecha foram definidos por meio (i) da aplicação do procedimento de “Análise de Potenciais Modos de Ruptura” (APMR) e (ii) da avaliação probabilística de brecha de ruptura, por meio do emprego da ferramenta computacional MCBreach (KLEINSCHMIDT, 2019a). Os detalhes metodológicos para desenvolvimento de cada item são apresentados, respectivamente, nas Seções 5.1.1 e 5.1.2.

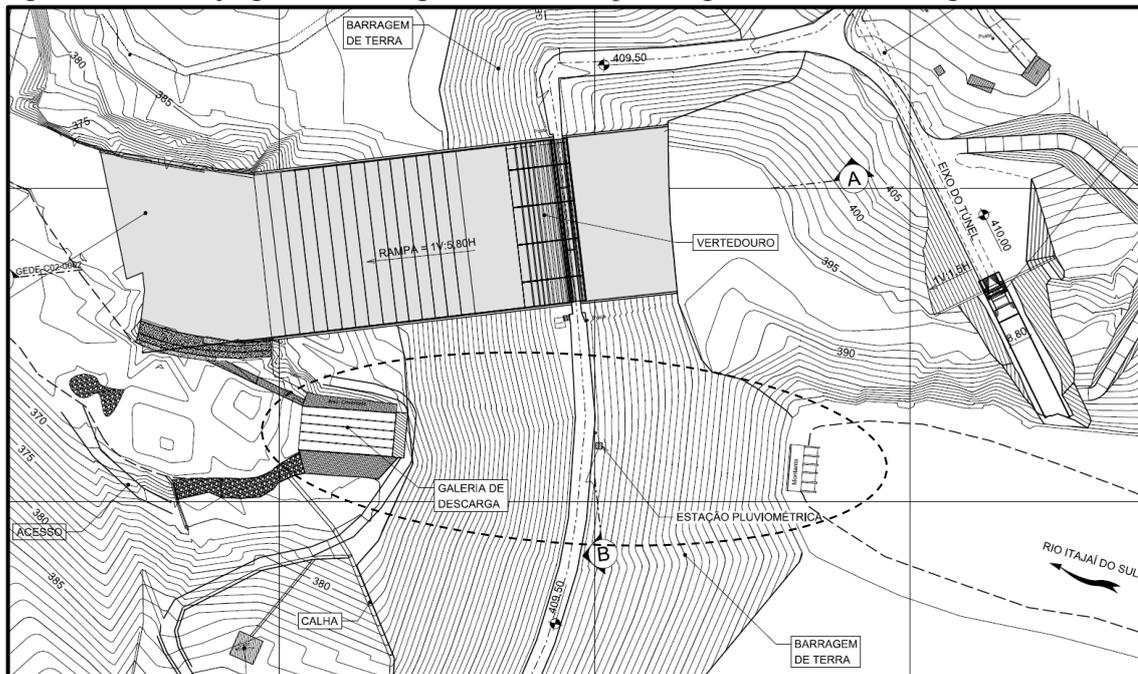
### 5.1.1 Análise de Potenciais Modos de Ruptura

A Análise de Potenciais Modos de Ruptura (APMR) foi realizada seguindo os principais requisitos previstos por FERC (2017) apresentados na Seção 3.3. A visita técnica de especialistas a Barragem Sul ocorreu em julho de 2021, junto a execução de uma inspeção visual da estrutura (DCSC, 2021b). O *workshop* para identificação sistemática dos potenciais modos de ruptura incluiu a participação de uma equipe de diferentes especialistas, representados pelas Gerências de Manutenção e Operação, de Mitigação e de Monitoramento Hidrológico da Defesa Civil de Santa Catarina (DCSC), órgão responsável pela operação e manutenção da estrutura.

A revisão documental conduzida anteriormente a visita identificou que o projeto original da Barragem Sul remonta da década de 1970, todos ainda em papel e grande parte do projeto executivo não consta nos documentos (DCSC, 2018b). Entre os documentos do projeto original, não foi possível encontrar um *As Built*, nem o projeto de alteamento da estrutura. Através da inspeção conduzida, constatou-se que a Barragem Sul se encontra em bom estado de conservação. Por não existirem instrumentos de monitoramento do barramento, visualmente não foram evidenciados recalques ou sinais de deformações excessivas que possam indicar algum risco estrutural ou à estabilidade da estrutura de terra.

Com o auxílio da equipe da DCSC presente no *workshop*, identificaram-se os pontos de maior preocupação estrutural da barragem. As galerias dos descarregadores de fundo despertam maior atenção devido as condições observadas (Figura 5.2 e Figura 5.3). A inexistência de informações relacionadas ao controle de compactação na região de transição da galeria de concreto com a barragem de terra (Figura 5.4) associada à recorrente variação do gradiente hidráulico no barramento – em função das operações de enchimento e esvaziamento para controle de cheias – indicam o local como um possível ponto de suscetibilidade a ocorrência de *piping*. Complementarmente, a permanência do reservatório em condição seca (DCSC, 2021c), expõe o talude de montante a ações da vegetação e de animais que podem contribuir para abertura de caminhos preferenciais de infiltração.

Figura 5.2 – Arranjo geral da Barragem Sul – destaque das galerias dos descarregadores de fundo



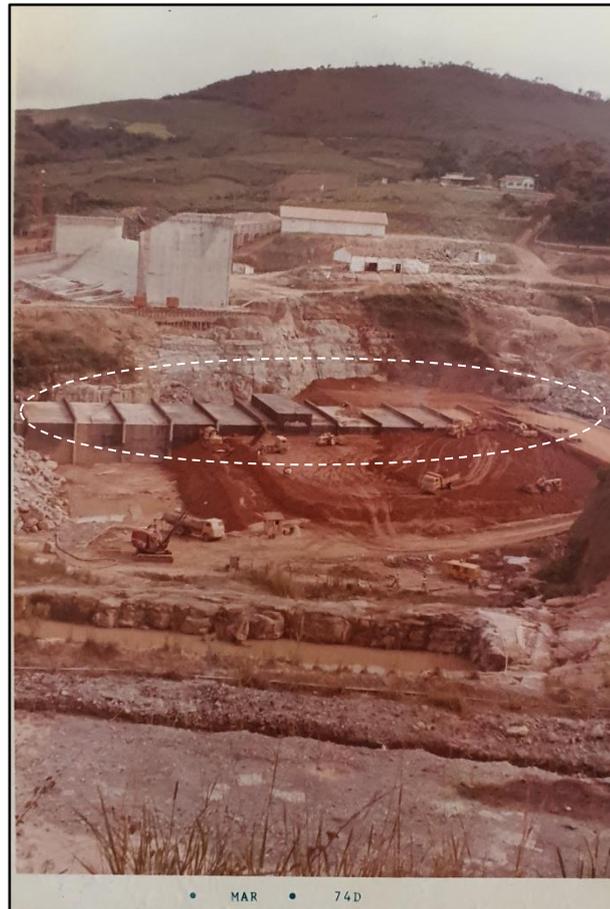
Fonte: Sanetal (2013a), adaptado pelo autor

Figura 5.3 – Comportas de fundo da Barragem Sul: A: vista de montante da seção de emboque das comportas; B: vista de jusante de saída das galerias de descarga



Fonte: Própria do autor

Figura 5.4 – Registro fotográfico da implementação das galerias de fundo concreto da Barragem Sul



Fonte: Acervo pessoal do operador da barragem Sul

Verificam-se também danos nas grades de separação de detritos presentes na entrada dos descarregadores de fundo (Figura 5.5), condição que implica na passagem de galhos e troncos sob a galeria. A passagem desse material, em eventos de operação da estrutura, causa

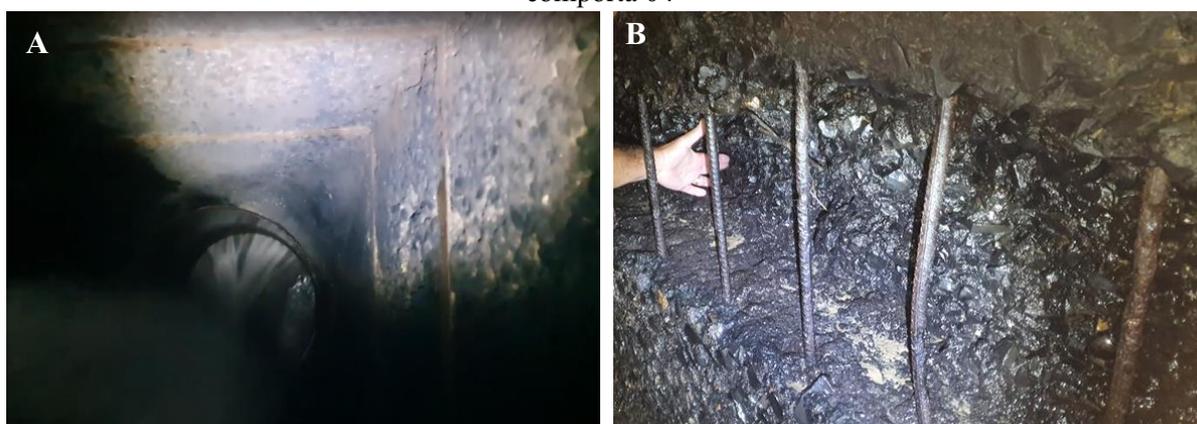
processos de desagregação do concreto nas paredes e piso, expondo a armadura em vários pontos das galerias (Figura 5.6). Frente as condições observadas, a equipe participante da APRM concluiu que a formação de *piping* é um fator iniciador provável de uma brecha de ruptura da Barragem Sul. Um local provável elencado para início da formação da brecha foi definido na região de contato da galeria de concreto com a barragem de terra, junto ao centro de maior altura da barragem de terra da margem esquerda.

Figura 5.5 – Vista de montante da seção de emboque das comportas de fundo – destaque aos danos nas grades de separação de detritos



Fonte: Própria do autor

Figura 5.6 – Visão interna das galerias de fundo de concreto. A: estrutura de concreto com rugosidades e exposição de armadura – canto superior direito da comporta 02; B: Danos na lateral esquerda da comporta 04



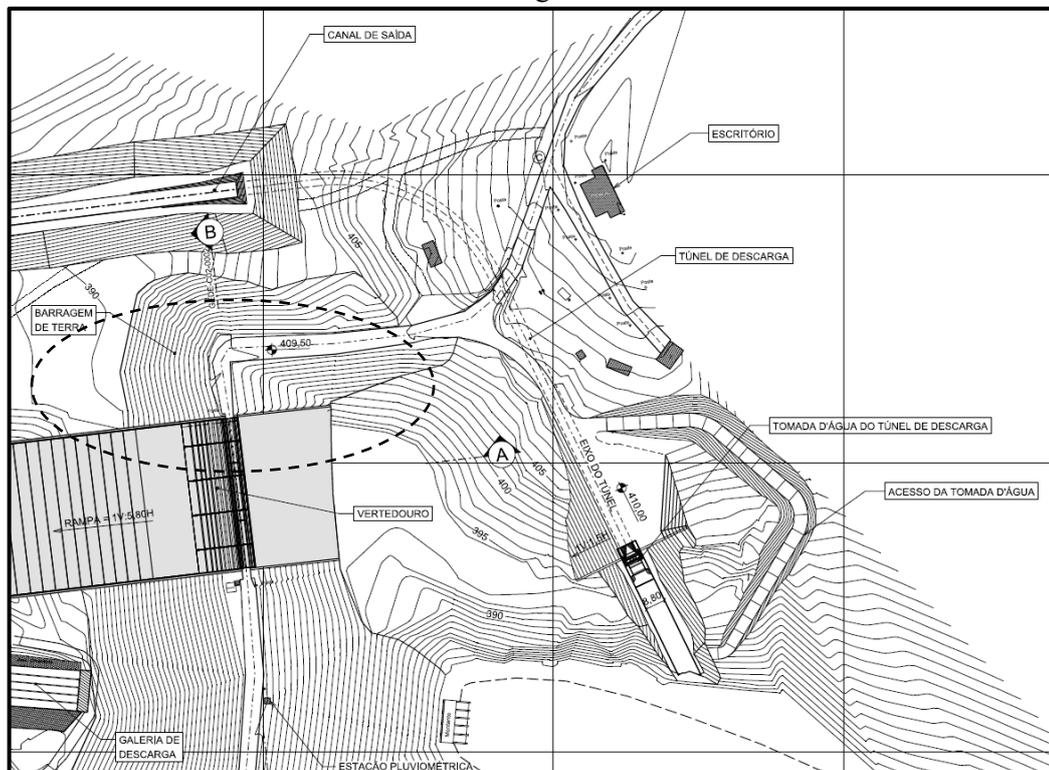
Fonte: DCSC (2021e), adaptado pelo autor

Outro ponto que desperta atenção é a Barragem Fusível, do tipo homogênea em terra, situada entre a ombreira direita e o vertedouro (Figura 5.7 e Figura 5.8). Esta trata-se de uma

estrutura projetada para romper em eventos onde o vertedouro chegasse ao limite, evitando o galgamento da estrutura principal. A principal preocupação refere-se à inexistência de projeto básico/executivo ou “*As Built*”, estudos de estabilidade e dados de sondagem para verificação da segurança do barramento. Uma condição possível para formação de brecha foi definida pela ocorrência de instabilidade estrutural do barramento “fusível” de terra. Para tanto, se esperaria a ocorrência da diminuição do fator de segurança de estabilidade do referido maciço em um cenário de passagem de cheia com elevação do N.A. do reservatório próximo a condição do Nível Máximo Maximorum (El. 408,00 m), seguido da execução de um rápido rebaixamento do reservatório, devido a abertura dos descarregadores de fundo e do túnel de descarga para esvaziamento do reservatório de contenção de cheia.

Importante destacar, que os últimos relatórios de inspeção regular indicaram um bom estado de conservação do trecho de barramento, não apresentando visualmente anomalias que sugiram riscos a estabilidade (DCSC, 2019a; 2021b; 2021d). Nesse contexto, apesar da viabilidade de ocorrência, entende-se que o desenvolvimento de instabilidade estrutural é de baixa probabilidade.

Figura 5.7 – Arranjo geral da Barragem Sul – destaque da barragem “fusível” do tipo homogênea em terra na margem direita



Fonte: Sanetal (2013a), adaptado pelo autor

Figura 5.8 – Visão da margem direita da Barragem Sul: A: crista do dique fusível e ombreira direita; B: talude de montante do “dique fusível”; C: talude de jusante do “dique fusível”



Fonte: Própria do autor

Por fim, a ocorrência de galgamento foi definida como pouco provável em função: (i) do nivelamento da cota de coroamento do dique fusível em relação ao barramento principal da margem esquerda (El. 409,50 m) quando da execução do projeto de alteamento do vertedouro (DCSC, 2018c); e (ii) da verificação dos resultados dos estudos de trânsito de cheias que

indicam a capacidade da passagem de cheia decamilenar na estrutura com ocorrência de 1,5 m de borda livre (DCSC, 2017).

O **Apêndice A** trata dos modos de ruptura identificados no desenvolvimento da APMR, os fatores iniciadores e os mecanismos de falha, conforme modelo proposto por BM (2021b). Para aplicação e desenvolvimento da metodologia probabilística de formação de brecha, selecionou-se um cenário único referente a formação de *piping* junto a região de contato das galerias de concreto com a barragem de terra.

Enfatiza-se que a seleção de apenas um cenário ocorreu devido a necessidade de compactação dos resultados gerados para posterior análise de perda de vida dos cenários de inundação associados a probabilidade excedência. Assim, o evento de *piping* selecionado representa a hipótese mais provável elencada na APRM para ocorrência de ruptura. Também, o referido local de abertura de brecha apresenta-se na região de maior gradiente hidráulico do barramento, favorecendo a ocorrência de cenários conservadores (maior severidade).

A condução integral do APRM previsto por FERC (2017) demandaria a verificação de outros modos de ruptura, bem como de todas as estruturas do barramento. No contexto da presente pesquisa, conforme proposto por BM (2021b), admitiu-se uma avaliação em menor complexidade objetivando a definição de um modo de ruptura principal, informação necessária à discussão da aplicação da metodologia probabilística.

### **5.1.2 Avaliação Probabilística de Brecha de Ruptura**

Fundamentado nos produtos obtidos pela APMR, o processo de erosão interna por *piping* foi selecionado como o mecanismo iniciador da ruptura mais provável. As dimensões da brecha foram estimadas para o desenvolvimento da análise probabilística através da análise do projeto da barragem, dos registros de inspeção e empregando equações empíricas e recomendações de engenharia, conforme recomendações de FEMA (2013), USACE (2014) e CWC (2018).

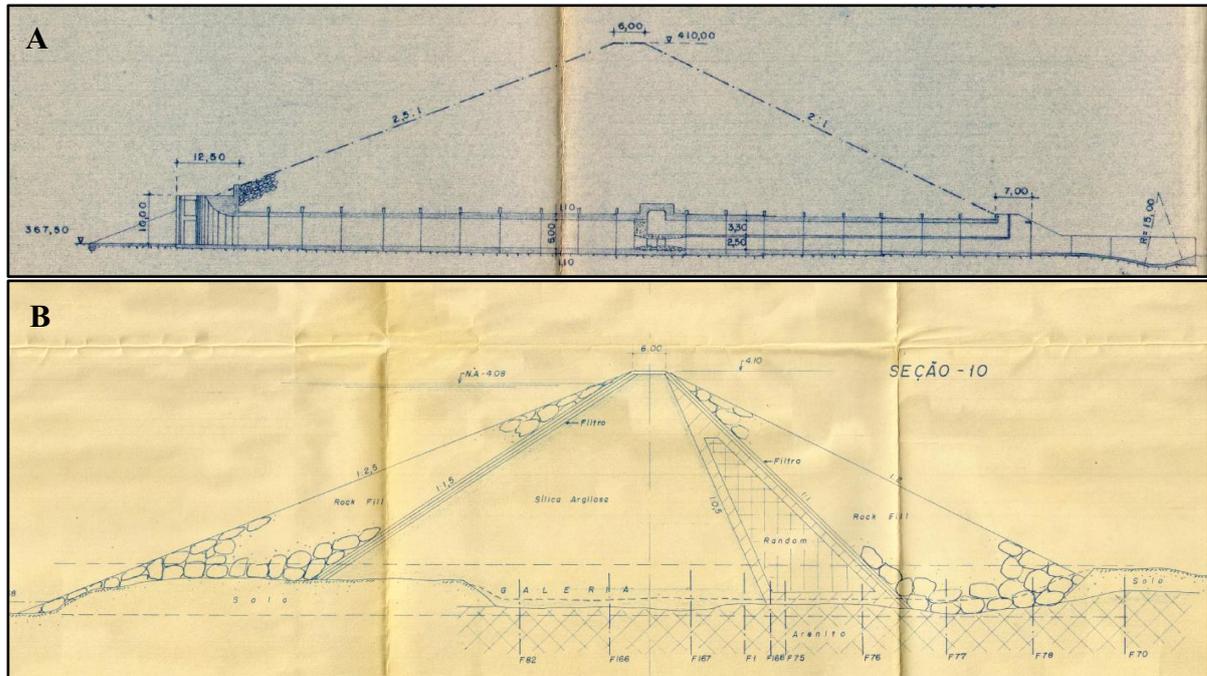
O local da brecha foi escolhido na região de contato da galeria de concreto com a barragem de terra, junto ao centro de maior altura da barragem de terra da margem esquerda. Os limites da dimensão da brecha foram verificados através da análise de imagens, perfil da fundação e a verificação dos controles topográficos. A seção de maior brecha é ilustrada na Figura 5.9. A Figura 5.10 ilustra o corte transversal da barragem no local.

Figura 5.9 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da brecha máxima de ruptura



Fonte: NSC Total (2017), adaptado pelo autor

Figura 5.10 – Corte em perfil da brecha de ruptura: A: Seção longitudinal da galeria; B: Seção transversal da barragem principal no local da galeria



Fonte: DCSC (2018b), adaptado pelo autor

Os parâmetros de formação de brecha foram definidos para os métodos determinístico e probabilístico, conforme apresentado na Seção 5.1.2.1 e Seção 5.1.2.2, respectivamente.

#### 5.1.2.1 Definição dos Parâmetros de Formação de Brecha para o Método Determinístico

O método determinístico foi verificado com o objetivo de comparação dos resultados do método probabilístico. Para sua condução, foram diretamente empregadas equações empíricas e recomendações conservadoras de engenharia para definição dos parâmetros. A

condição determinística reside no fato da aplicação não permitir o entendimento das incertezas associadas aos resultados obtidos, em função das premissas adotadas para definição dos parâmetros de brecha de ruptura.

Um cenário buscando a representação de uma condição de ruptura extrema, com base nas recomendações de ANA (2016), foi construído por meio do emprego direto das equações empíricas de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990), Froehlich (2008) e Froehlich (2016) e das recomendações de engenharia de FERC (1993), ELETROBRÁS (2003), USACE (2007), FEMA (2013) e USACE (2014). Fundamentado nos resultados obtidos, conduziu-se uma análise de sensibilidade conforme metodologia proposta por Ferentchak e Jamieson (2008), que avalia os parâmetros de brecha de acordo com cinco critérios: (i) Factibilidade das dimensões da brecha; (ii) Taxas de erodibilidade do maciço; (iii) Análise técnica dos parâmetros da brecha e das respectivas vazões de pico geradas; (iv) Tempo mínimo de formação da brecha; e (iv) Para o caso de ruptura por galgamento, verificação das condições de contorno para a adoção do nível de água mínimo acima da crista como gatilho de ruptura.

O resultado, após descarte dos autores com parâmetros não aderentes aos critérios da metodologia, foi definido buscando-se a apresentação da condição mais conservadora (maior vazão de pico) (ANA, 2016). Em função das características da barragem e da seleção dos resultados de Von Thun e Gillette (1990) para a condição mais conservadora, ajustes foram conduzidos para tornar a brecha factível à geometria do terreno e do barramento. Os parâmetros finais definidos são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros de brecha definidos para a Barragem Sul. Método Determinístico.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor</b>	<b>Equações / Recomendações</b>
Elevação Inferior do Fundo	m	Inv	366,0	Mínimo definido em planta
Largura Final do Fundo	m	$W_b$	100,0	Von Thun e Gillette (1990)
Declividade Lateral - Esquerda	(H:V)	LSS	0,42	Von Thun e Gillette (1990)
Declividade Lateral - Direita	(H:V)	RSS	0,42	Von Thun e Gillette (1990)
Tempo de Formação	h	$t_f$	0,98	Von Thun e Gillette (1990)
Coefficiente de Descarga - Brecha	-	$C_d$	1,80	USACE (2014)
Progressão de Desenvolvimento	-	Prog	Linear	USACE (2014)
Coefficiente de Descarga - <i>Piping</i>	-	$C_{pipe}$	0,60	USACE (2014)
Elevação de Início do <i>Piping</i>	m	$El_{pipe}$	367,0	Mínimo definido em planta

Fonte: Própria do autor

### 5.1.2.2 Definição dos Parâmetros de Formação de Brecha para o Método Probabilístico

No método probabilístico foram definidas distribuições estatísticas para amostragem de cada parâmetro, conforme descrito na Seção 3.3.2. Para tanto, foi necessário um julgamento de engenharia para aplicação de médias, variâncias e limites para aproximação da realidade por meio de funções de densidade de probabilidade.

As faixas de parâmetros de formação de brecha utilizadas e as distribuições para o método probabilístico estão dispostas na Tabela 5.2. Uma síntese das considerações adotadas para seleção dos respectivos valores é apresentada na sequência.

Tabela 5.2 – Parâmetros de entrada de formação da Brecha. Método probabilístico.

Parâmetro	Unidade	Sigla	Distribuição Estatística	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Elevação Inferior do Fundo	m	Inv	Normal	366,0	367,0	366,5	0,16
Largura Final do Fundo	m	B	Normal	72,0	100,0	86,0	4,67
Declividade Lateral - Esquerda	(H:V)	LSS	Uniforme	0	1	-	-
Declividade Lateral - Direita	(H:V)	RSS	Uniforme	0	1	-	-
Tempo de Formação	h	Tf	Normal	0,2	1,7	0,95	0,25
Coeficiente de Descarga - Brecha	-	Cd	Uniforme	1,1	1,8	-	-
Progressão de Desenvolvimento	-	Prog	Uniforme	“Linear”	“Senoidal”	-	-
Coeficiente de Descarga - <i>Piping</i>	-	Cpipe	Uniforme	0,5	0,6	-	-
Elevação de Início do <i>Piping</i>	m	ElPipe	Uniforme	367,0	369,0	-	-

Fonte: Própria do autor

O parâmetro de Elevação Inferior do Fundo (*Inv*) representa a elevação da geratriz inferior da brecha, definida através da análise das plantas do projeto da barragem. Este deve caracterizar a elevação mais baixa que a brecha pode atingir. A medida em que o processo de *piping* está intrinsicamente relacionado ao padrão de ocorrência da largura média da brecha, uma distribuição normal foi associada ao parâmetro. Nesse contexto, a brecha pode apresentar uma altura máxima de 43,5 m, entre a crista e a fundação do barramento.

A largura final do fundo da brecha ( $W_b$ ) foi estimada empregando as equações empíricas de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun & Gillette (1990), Froehlich (2008) e Froehlich (2016). O limite máximo de largura de brecha foi também verificado com base na análise do perfil da fundação e da verificação dos controles topográficos. Para tanto, partiu-se do princípio de que a brecha não abrirá mais do que os limites dos controles topográficos indicados. No presente caso, destaca-se a limitação de abertura de brecha imposta pela estrutura em concreto do vertedouro de soleira livre.

As declividades laterais do prisma de abertura da brecha (LSS e RSS) foram determinadas empregando as recomendações de USACE (2014). Para tanto, foi associado um

modelo probabilístico uniforme com inclinação mínima de 0,0H:1,0V (vertical) e máxima de 1,0H:1,0V (inclinação suave). Nesse contexto, entende-se como imprevisível o comportamento da ruptura do maciço na formação do prisma de abertura e qualquer combinação possui igual probabilidade de ocorrência. Fatores como o grau e qualidade da compactação do maciço e o a ligação da barragem com a fundação podem influenciar na conformação do parâmetro. Portanto, à medida que no trecho de ruptura não se verifica a possibilidade de controle lateral da fundação sobre a abertura da brecha, entende-se que a recomendação da USACE (2014) se encontra aderente a realidade.

O tempo de formação ( $t_f$ ) foi estimado através de amostragens preliminares, a fim de se calcular o índice “ER/H<sub>w</sub>”, que representa a taxa de erosão linear do corpo do barramento (ER) dividido pela carga hidráulica acima do fundo da brecha (h<sub>w</sub>). Conforme recomendações de Von Thun & Gillete (1990) e Wahl (2004), o atendimento do índice ER/h<sub>w</sub> no intervalo de 1,6 até 21, garante que a brecha está sendo representada coerentemente. Os resultados obtidos com as amostras de largura média e tempo de formação da brecha indicaram valores de mínimo igual a 0,20 h e de máximo igual a 1,70 h.

Os coeficientes de descarga do orifício do *piping* e do prisma da brecha e foram amostrados com base em um modelo probabilístico Uniforme. Fundamentado nas recomendações de USACE (2014), estabeleceram-se os limites máximos e mínimos. De modo geral, os coeficientes de descarga implicam em pouca sensibilidade na resposta hidráulica da brecha. Todavia, como fazem parte da formulação, estes necessitam ser amostrados.

A elevação do *piping*, por fim, foi associada a um modelo probabilístico Uniforme. Seus limites de mínimo e de máximo foram determinados através da análise do projeto da barragem, permanecendo seu intervalo entre o limite de elevação das galerias (367,00 m a 369,00 m), conforme cenário definido de formação de *piping* junto a região de contato das galerias de concreto com a barragem de terra.

Por fim, com base na parametrização definida, aplicou-se o modelo McBreach para realização da modelagem probabilística de previsão brecha de ruptura da Barragem Sul. Conforme descrito na Seção 3.3.3, a execução de dezenas de milhares de realizações para obtenção da convergência estatística demandou a configuração de um modelo hidráulico truncado no HEC-RAS, de modo a garantir uma execução rápida o suficiente para tornar a aplicação do McBreach exequível em um período adequado. A versão truncada do modelo é

necessária apenas durante a simulação do McBreach. Maiores detalhes da construção do modelo truncado são apresentados na Seção 5.2.4.2.

Após a conclusão da simulação do McBreach, os conjuntos de parâmetros de brecha para os picos de vazão associados as suas probabilidades de excedência foram inseridos no modelo hidráulico completo e mapeado as extensões de inundação individualmente. As probabilidades de excedência definidas com maior relevância para o estudo serão de 99%, 90%, 50%, 10% e 1%. O cenário determinístico de condição mais desfavorável será também avaliado.

## 5.2 MODELAGEM HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Os dados hidráulicos do evento de rompimento são componentes críticos para a avaliação da perda de vida, portanto, é de suma importância que a modelagem hidráulica seja desenvolvida de forma consciente quanto a seleção dos parâmetros de entrada. Definições como intervalo de cálculo das variáveis hidráulicas, seleção da dimensionalidade do modelo (1D ou 2D), resolução espacial da malha computacional e seleção dos cenários de ruptura possuem significativa sensibilidade nas análises de consequência (USACE, 2018; 2020b).

Nesse contexto, os procedimentos adotados no presente trabalho acompanham as diretrizes apresentadas pela Agência Nacional de Águas para o desenvolvimento desse tipo de estudo (ANA, 2016), além das recomendações apresentadas por outros órgãos de referência internacional no assunto, como a Agência Federal Americana de Gestão de Emergências (FEMA, 2013), o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, 2014), a Comissão Reguladora de Energia Federal dos Estados Unidos (FERC, 2014a) e a Divisão de Recursos Hídricos do Estado do Colorado (CDWR, 2010).

Conforme apresentado pelo fluxograma metodológico na Figura 5.1, a simulação do rompimento da Barragem Sul foi dividida em 6 etapas: (i) Caracterização hidrológica dos cursos de água; (ii) Definição dos parâmetros de resistência; (iii) Seleção do modelo digital de terreno do vale a jusante; (iv) Desenvolvimento da modelagem hidráulica computacional; (v) Pós processamento da modelagem computacional e (vi) Mapeamento dos parâmetros da inundação potencial. Uma descrição das principais metodologias adotadas em cada etapa é apresentada nas Seções 5.2.1 a 0.

### 5.2.1 Caracterização Hidrológica

Fundamentado nas recomendações de ANA (2016) e FEMA (2013) e nas conclusões do estudo de ruptura hipotética apresentado no Plano de Ação de Emergência da Barragem Sul (DCSC, 2019b), define-se o cenário hipotético de inundação com tempo de recorrência de 1.000 anos para caracterização das condições hidrológicas na bacia para o evento de ruptura. Assim, objetivando a caracterização dos dados hidrológicos, foram consultados os resultados obtidos por DCSC (2017), cujo trabalho determinou hidrogramas de cheias para diferentes tempos de recorrência no local da Barragem Sul. O referido estudo se dividiu em duas principais etapas. A primeira consistiu na utilização de metodologia estatística para determinação da curva de frequência de cheia no local da estrutura. Para tanto, ajustes de distribuição foram conduzidos aos dados de vazões máximas médias diárias registradas nas estações fluviométricas disponíveis na bacia, com posterior transferência de dados por relação direta de área de drenagem. A segunda etapa consistiu em determinar os hidrogramas para os valores de cheia calculados pelo método estatístico, para os diferentes tempos de recorrência, através do modelo chuva-vazão HEC-HMS. Para alimentação do modelo, foi conduzida uma avaliação das precipitações máximas diárias registradas nas estações, construído suas curvas Intensidade x Duração x Frequência (IDF) e determinado seus respectivos hietogramas de projeto através do método dos blocos alternados.

O registro das vazões máximas diárias e vazões máximas instantâneas para o Tempo de Recorrência (TR) de 1.000 anos no local da Barragem Sul é apresentado na Tabela 5.3. Complementarmente, visando a calibração, validação e aquecimento do modelo hidráulico, identificam-se: (i) as vazões registradas na estação Ituporanga (código ANA 83250000) nos eventos de inundação de maior magnitude registrados na bacia, ocorridos nos anos de 1983 e 2011 (Tabela 5.3) e (ii) as vazões com TR de 2 anos para os principais afluentes avaliados no aquecimento da simulação hidráulica (Tabela 5.4). Os referidos dados foram obtidos através dos resultados apresentados por DCSC (2017). A transferência de dados (regionalização) das vazões máximas de TR 2 anos registradas nas estações fluviométricas selecionadas da bacia do rio Itajaí do Sul para os pontos de afluência propostos foram realizadas por a relação direta de área de drenagem, conforme metodologia descrita por Tucci (2004). A adoção da cheia com TR 2 anos como referência a jusante decorre da aceção de que a vazão em trânsito corresponde aproximadamente ao débito de margens plenas, ou seja, não se iniciou ainda um processo de inundação e conseqüentemente a evacuação de áreas inundáveis. Nesse sentido, em termos

hidrológicos, corresponde a um cenário de vazão máxima a partir do qual incrementos de nível de água e eventuais inundações no vale seriam atribuídos somente à ruptura.

Tabela 5.3 – Vazões médias diárias máximas e instantâneas máximas para a Barragem Sul

<b>Cenário</b>	<b>Vazão Média Diária Máxima [m³/s]</b>	<b>Vazão Instantânea Máxima [m³/s]</b>
Cheia com Tempo de Recorrência de 1.000 anos	1.621	2.140
Cheia de 1983	1.422	1.833
Cheia de 2011	1.370	1.766

Fonte: DCSC (2017), adaptado pelo autor

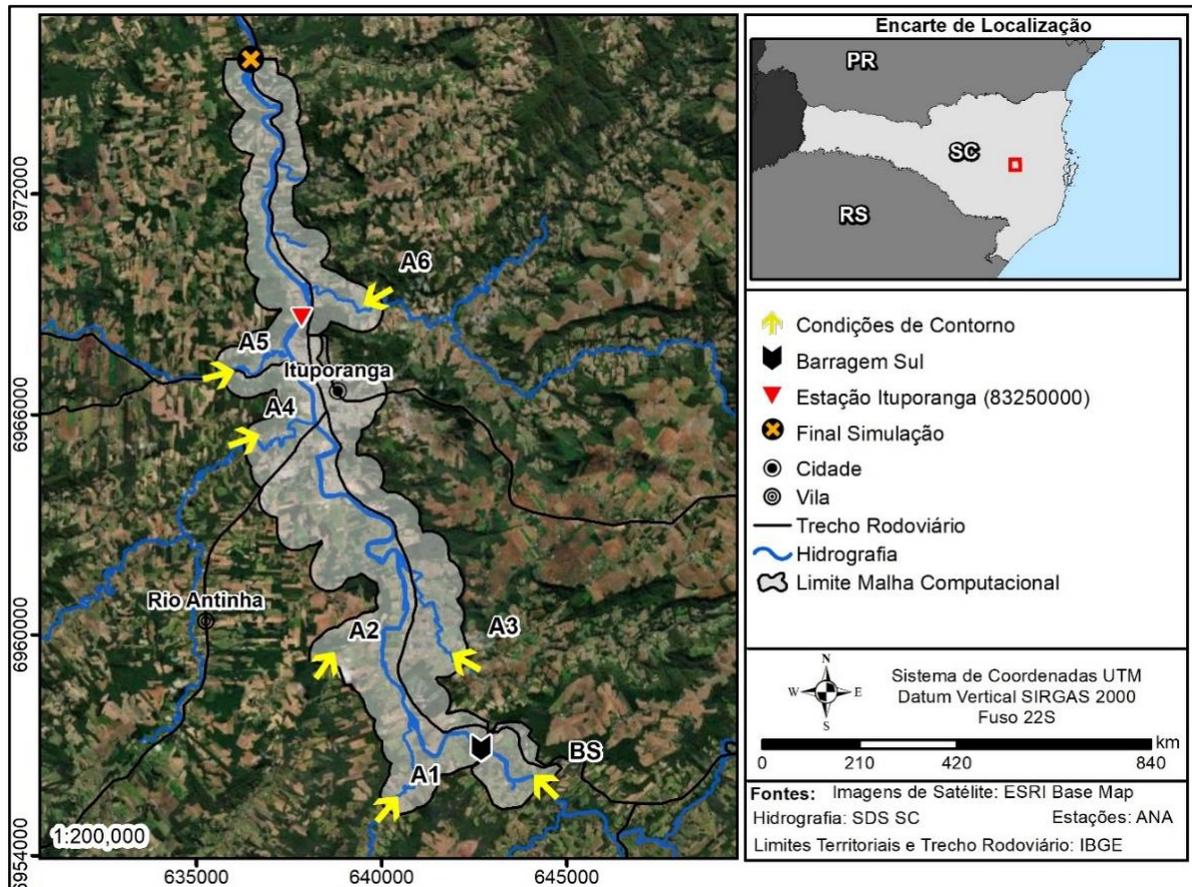
Tabela 5.4 – Vazões com tempo de recorrência de 2 anos para os principais afluentes da área de estudo

<b>Curso de Água</b>	<b>Vazão TR 2 Anos [m³/s]</b>
Itajaí do Sul – Barragem Sul (BS)	325
Afluente 01 (A1)	283
Afluente 02 (A2)	13
Afluente 03 (A3)	11
Afluente 04 (A4)	22
Afluente 05 (A5)	63
Afluente 06 (A6)	34

Fonte: Própria do autor

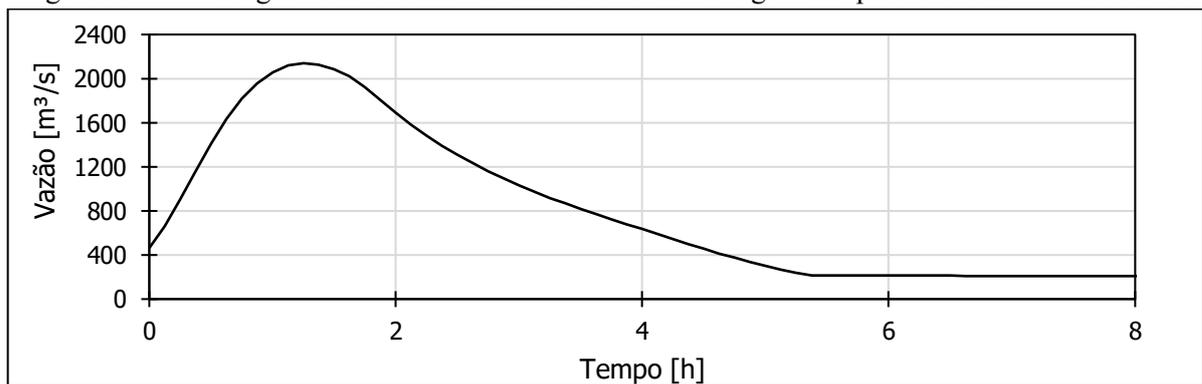
A Figura 5.11 ilustra a localização da hidrografia principal da área de estudo e dos locais de entrada dos hidrogramas adotados no aquecimento do modelo. A Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14 representam graficamente o hidrograma de entrada no reservatório da Barragem Sul para cheia de TR 1.000 anos e os hidrogramas das cheias históricas (1983 e 2011), respectivamente. Complementarmente, na Figura 5.15 e Figura 5.16, apresentam-se os cotogramas das cheias históricas convertidos em dados absolutos de elevação, amarrados aos levantamentos das seções topobatimétricas conduzidos por Máxima (2017a).

Figura 5.11 – Localização da hidrografia principal e dos locais de entrada dos hidrogramas no modelo hidráulico



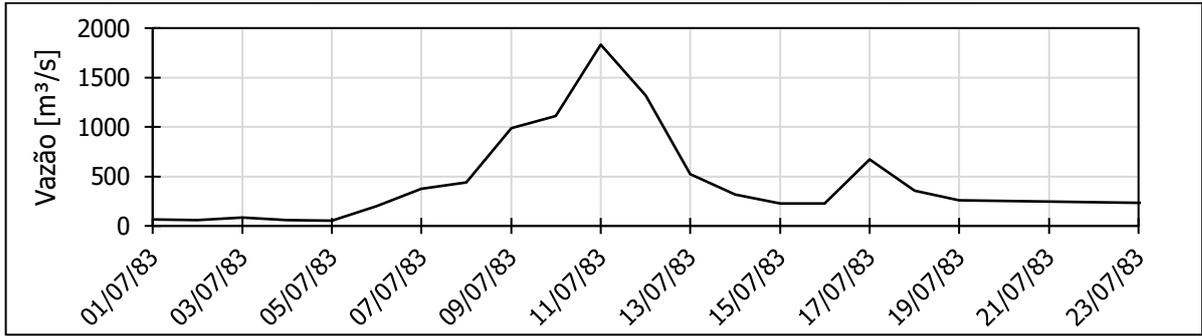
Fonte: Própria do autor

Figura 5.12 – Hidrograma de entrada no reservatório da Barragem Sul para cheia de TR 1.000 anos



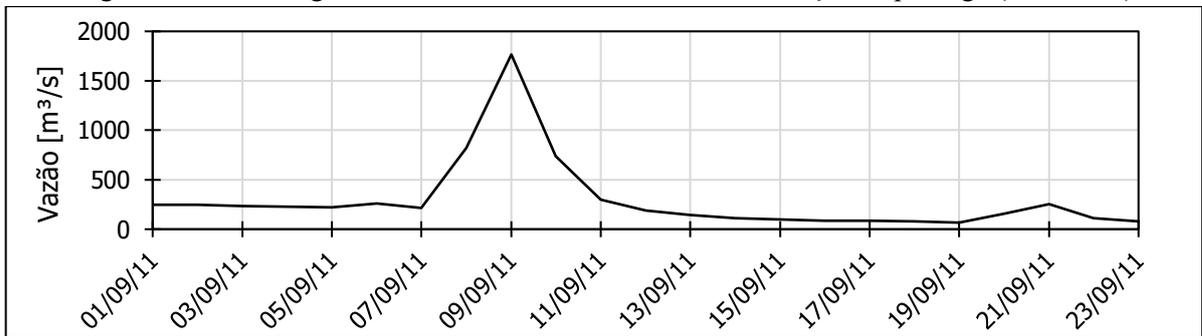
Fonte: DCSC (2017)

Figura 5.13 – Hidrograma da Cheia de 1983 observado na estação Ituporanga (83250000)



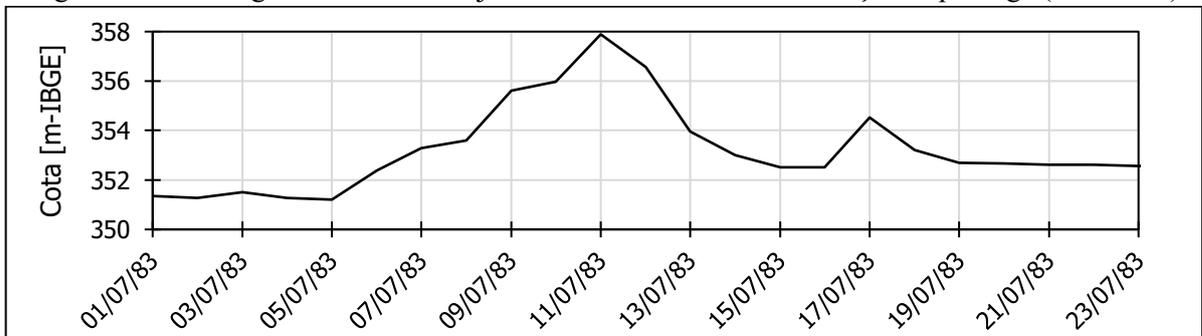
Fonte: Própria do autor

Figura 5.14 – Hidrograma da Cheia de 2011 observado na estação Ituporanga (83250000)



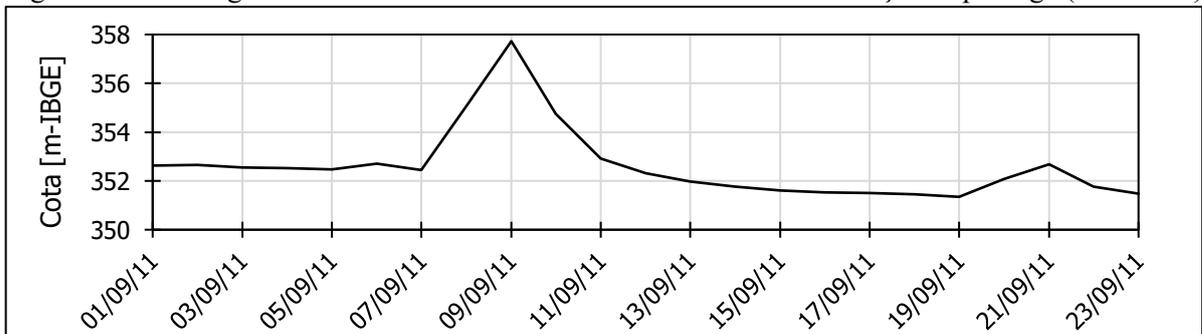
Fonte: Própria do autor

Figura 5.15 – Cotagrama da Cheia de julho de 1983 observado na estação Ituporanga (83250000)



Fonte: Própria do autor

Figura 5.16 – Cotagrama da Cheia de setembro de 2011 observado na estação Ituporanga (83250000)



Fonte: Própria do autor

### 5.2.2 Definição dos Parâmetros de Resistência

Para a simulação da propagação de ondas hipotéticas de ruptura comumente utilizam-se modelos matemáticos hidrodinâmicos bidimensionais, ou modelos de águas rasas. Suas equações são obtidas com a integração das equações de conservação de massa e as componentes horizontais de Navier-Stokes ao longo da profundidade ou da vertical. A componente vertical de Navier-Stokes é empregada para relacionar o gradiente de pressões com a coordenada vertical, desprezando a aceleração vertical (CHAUDHRY, 2008). Também conhecidas como equações de Saint-Venant, estas não incluem os termos de dispersão e turbulência, sendo sua dissipação de energia considerada apenas pela aplicação do parâmetro de rugosidade de Manning ( $n$ ) nas equações de *momentum* (ZHEN-GANG, 2008).

No presente estudo, os seguintes procedimentos foram adotados para a determinação dos coeficientes de rugosidade: (i) definição do mapa de uso e ocupação do solo através de dados da Coleção 6 do ano de 2020 do Projeto MapBiomias de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil, cujas classificações são baseadas em dados de imagens de satélite LANDSAT (MAPBIOMAS, 2022), com resolução espacial de 30 m; e (ii) atribuição dos coeficientes de rugosidade a partir de valores reportados em bibliografia (CHOW, 1959), considerando-se o julgamento de engenharia aplicado às variações da cobertura do solo, conforme Tabela 5.5.

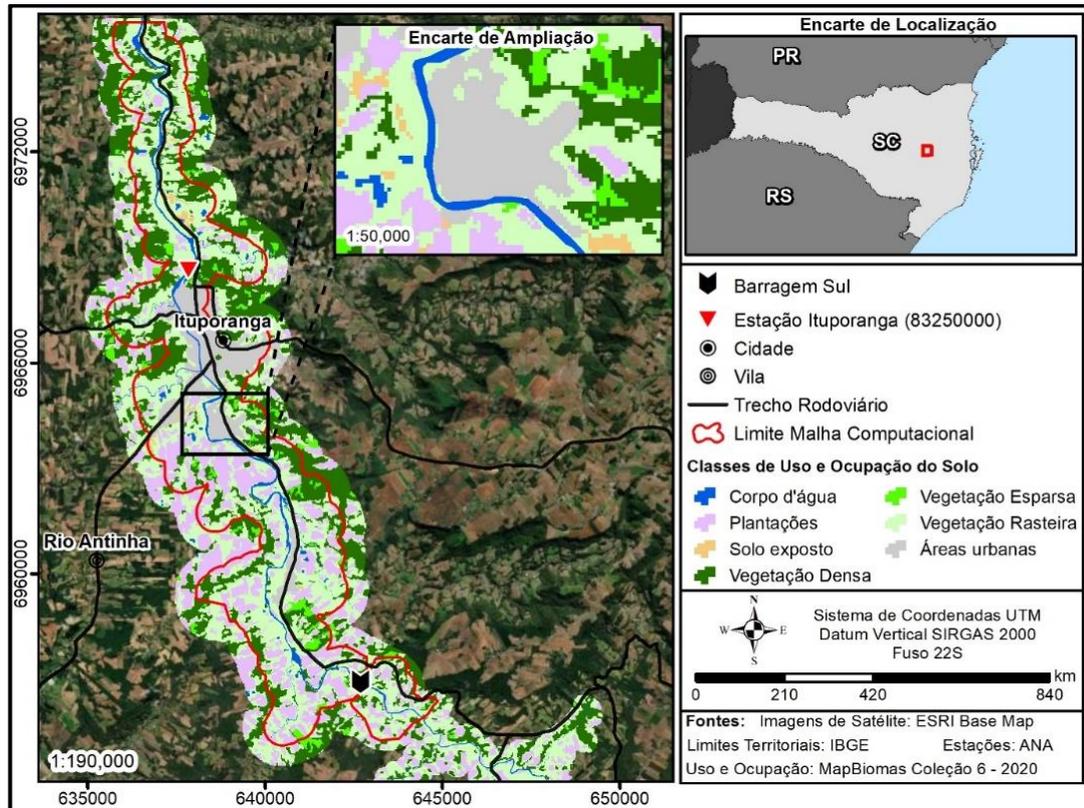
A Figura 5.17, por fim, ilustra o mapa de uso e ocupação do solo utilizado para atribuição dos valores de coeficiente de rugosidade de Manning.

Tabela 5.5 – Parâmetros de rugosidade de Manning “ $n$ ”

Tipologia	Coefficiente de rugosidade de Manning “ $n$ ” [s/m <sup>1/3</sup> ]
Corpo d'água	0,025
Solo exposto	0,035
Áreas urbanas	0,065
Vegetação densa	0,070
Vegetação esparsa	0,050
Vegetação rasteira	0,045
Plantações	0,050
Vias asfaltadas	0,015

Fonte: Chow (1959), adaptado pelo autor

Figura 5.17 – Mapa de uso e ocupação do solo utilizado para atribuição dos valores de coeficiente de rugosidade de Manning



Fonte: Própria do autor

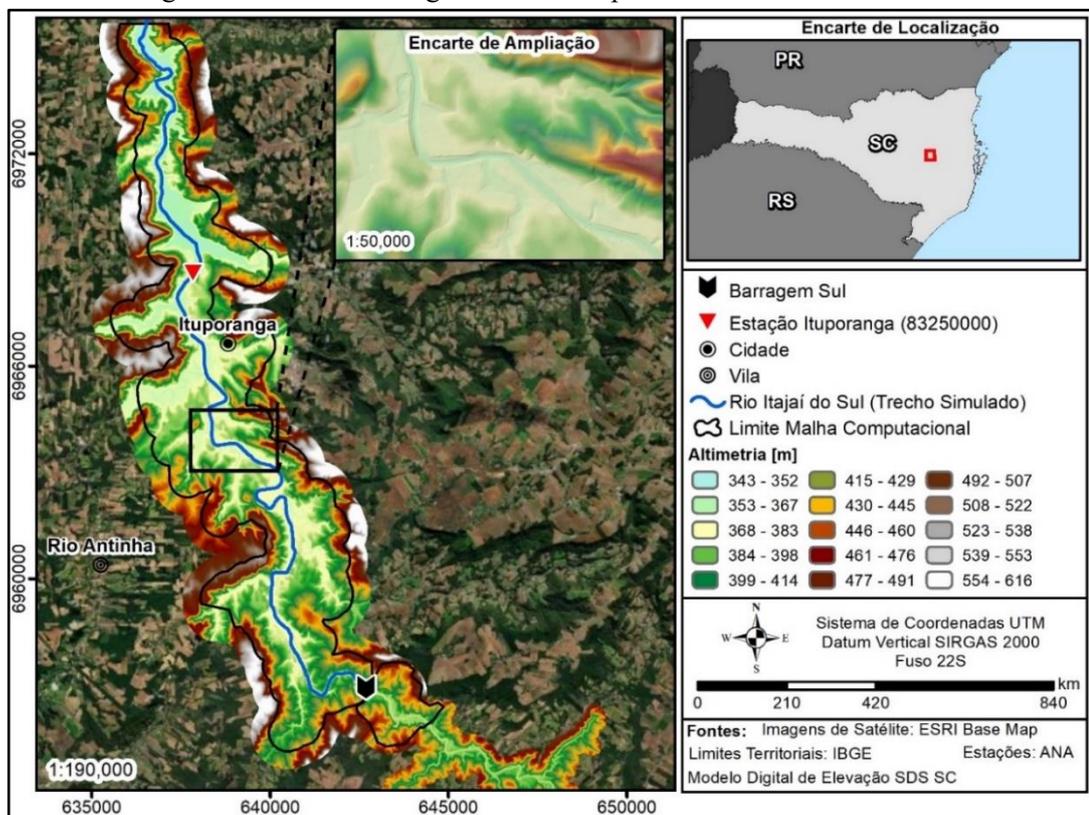
### 5.2.3 Seleção do Modelo Digital de Terreno do Vale a Jusante

A base topográfica é um dos principais dados de entrada dos modelos hidrodinâmicos utilizados para a propagação de ondas de ruptura, uma vez que a definição dos parâmetros geométricos das seções de escoamento e do perfil longitudinal da calha do talvegue é realizada a partir das informações topográficas. Essas informações são primordiais para a definição da capacidade de vazão dos vales e, sendo assim, a acurácia da modelagem hidrodinâmica está diretamente relacionada à resolução da base topográfica utilizada.

Os dados topográficos adotados neste estudo são provenientes do levantamento aerofotogramétrico do estado de Santa Catarina, efetuado pela empresa Engemap Geoinformações entre os anos de 2010 e 2013. O referido projeto foi contratado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) com objetivo de construção de uma base cartográfica de alta precisão para gestão de recursos hídricos (SDS, 2016a). Entre os diversos produtos derivados do levantamento, o presente trabalho limitou-se a utilização do Modelo Digital de Terreno (MDT), com resolução espacial de 1,00 metro (SDS, 2016b).

Complementarmente, seções topobatimétricas procedentes dos produtos de JICA (2010), Cedro (2014) e Máxima (2017b) foram utilizadas para a caracterização da calha dos cursos d'água, empregando-se, ao todo, 10 seções topobatimétricas localizadas no Rio Itajaí do Sul. O processamento para inserção da calha de fundo partiu da interpolação da geometria entre as seções, com posterior elaboração do modelo de terreno do leito do rio e sobreposição do dado matricial na topografia do vale a jusante. O processamento foi conduzido com aplicação das ferramentas disponíveis no HEC-RAS 5.0.7. O Modelo Digital de Terreno processado adotado no estudo é ilustrado na Figura 5.18.

Figura 5.18 – Modelo digital de terreno processado adotado no estudo



Fonte: Própria do autor

#### 5.2.4 Desenvolvimento da Modelagem Hidráulica

Para o desenvolvimento da modelagem hidráulica foram definidos alguns critérios e parâmetros necessários para a configuração do modelo. O modelo matemático bidimensional (2D) HEC-RAS 5.0.7 foi escolhido para a realização da simulação hidráulica da propagação da onda de ruptura da Barragem Sul, ao longo do vale a jusante. O modelo é amplamente empregado e recomendado em estudos de ruptura hipotética (FEMA, 2013; ANA, 2016; CWC, 2018), permitindo a simulação de escoamento bidimensional (2D) de fluidos newtonianos em

regime não-permanente. O modelo utiliza a Equação de Águas Rasas, obtida por meio da integração vertical da equação de Navier-Stokes, e emprega soluções numéricas através do método de aproximação por volumes finitos (USACE, 2021). Ainda, o modelo HEC-RAS versão 5.0.7 permite a comunicação e controle com o modelo probabilístico de formação de brecha McBreach (KLEINSCHMIDT, 2019a).

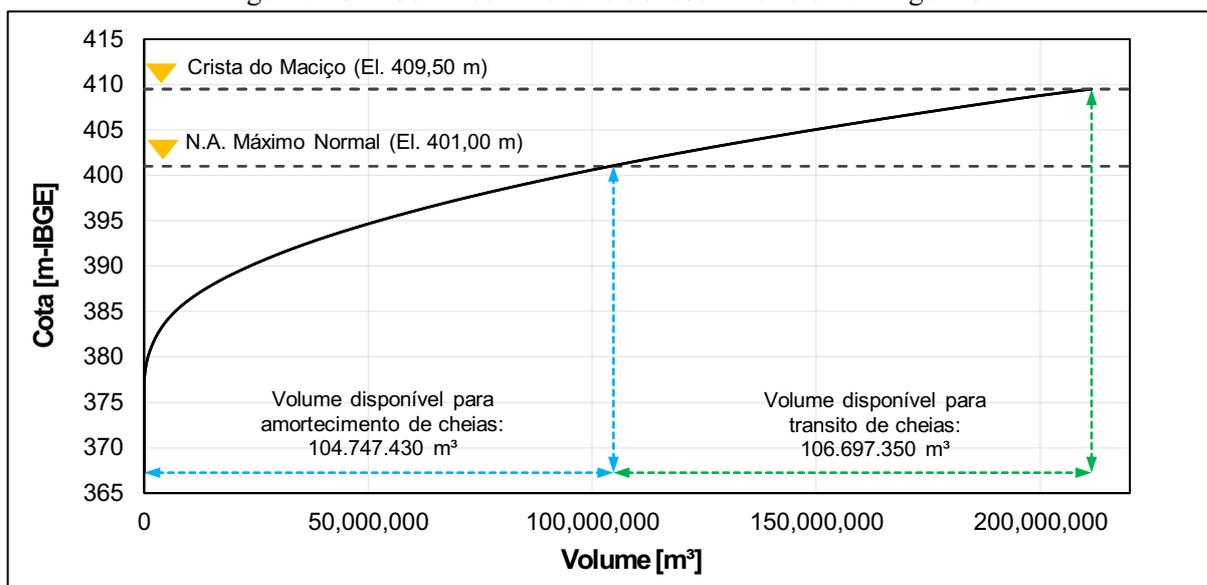
Conforme metodologia descrita na Seção 5.1.2, além da construção de um modelo hidráulico completo para simulação da inundação proveniente da ruptura, foi também necessário confeccionar um modelo hidráulico truncado, de modo a garantir uma execução rápida o suficiente para tornar a aplicação do software McBreach exequível.

A Seção 5.2.4.1 apresenta as principais premissas adotadas para construção do modelo hidráulico completo. Fundamentado nesse produto, a Seção 5.2.4.2 descreve as adaptações conduzidas para construção do modelo hidráulico truncado.

#### 5.2.4.1 *Modelo Hidráulico Completo*

A partir do Modelo Digital de Terreno elaborado, foi definida a área computacional para o modelo hidrodinâmico completo, que abrange o terreno do reservatório a montante da Barragem Sul, seguindo o percurso do Rio Itajaí do Sul até cerca de 10 km a jusante do centro da cidade de Ituporanga. Também foram incluídas as regiões de remanso dos cursos d'água afluentes ao rio Itajaí do Sul, objetivando-se a avaliação de potenciais impactos do fenômeno. A malha computacional foi conformada em células retangulares de 10 m de resolução, que discretizam as informações médias de elevação e localização do terreno base para a definição de parâmetros hidráulicos. O refinamento e alinhamento da malha foi realizado em áreas com necessidade de maior detalhamento nos resultados, como a calha e margens dos rios e aterro de pontes. Para implementação das regiões de refinamento e alinhamento foram utilizadas as funcionalidades de “*Breakline*” e “*Refinement Regions*” presentes no programa HEC-RAS 5.0.7. Ainda, para a região do reservatório da Barragem Sul, adotou-se o método numérico de “*storage area*” (USACE, 2021), com inserção da curva cota-volume atualizada do reservatório (DCSC, 2021f) (Figura 5.19).

Figura 5.19 – Curva cota-volume do reservatório da Barragem Sul



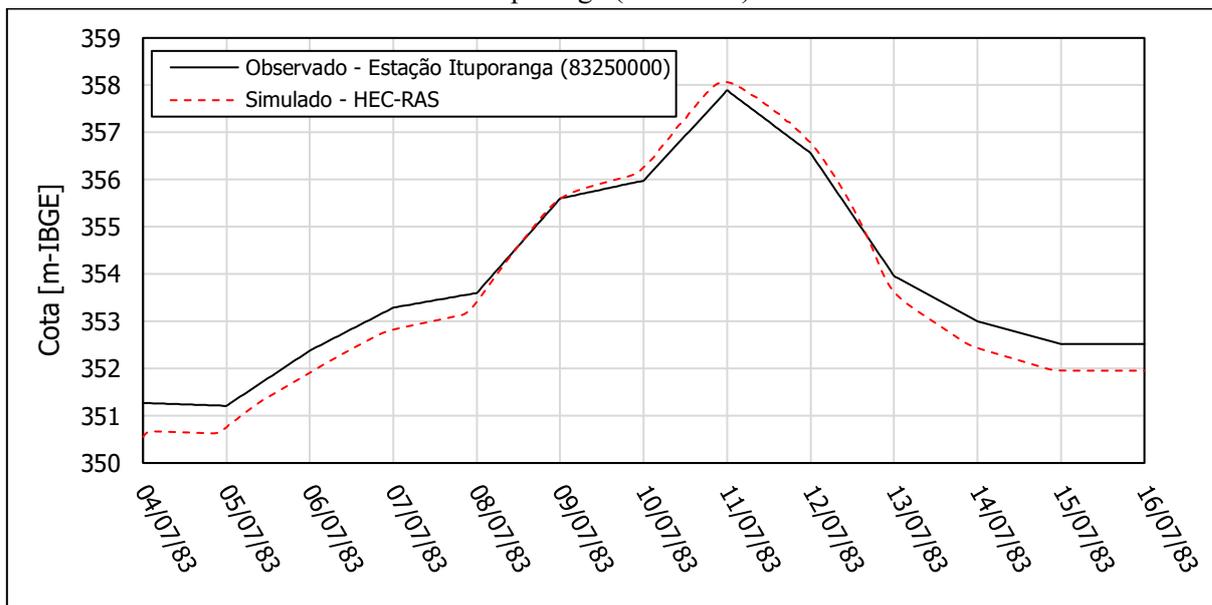
Fonte: Própria do autor

A calibração do modelo hidráulico foi feita com base no ajuste dos coeficientes de Manning atribuídos com a metodologia descrita na Seção 5.2.2. Foram utilizados dois períodos das maiores cheias históricas para calibração e validação do modelo, ocorridos respectivamente nos anos de 1983 e 2011. Ambos os eventos registrados ocorreram posteriormente a construção da barragem, finalizada em 1976 (DCSC, 2018a). Conforme apresentado na Seção 5.2.1, estes eventos foram registrados na estação fluviométrica Ituporanga (código ANA 83250000) existente no município, permitindo a utilização de seus dados para calibração do modelo e validação da curva-chave.

Realizada a calibração para o evento de 1983, apresenta-se na Figura 5.20 a comparação visual dos cotagramas observado e simulado. Os resultados simulados apresentaram boa conformação com os dados observados em campo durante o evento, com coeficiente de Nash<sup>8</sup>  $NSE=0,952$  (NASH & SUTCLIFFE, 1970). Os dados da curva-chave na seção da estação, para a cheia simulada, apresentaram boa aderência aos dados históricos de medição de descarga líquida na estação, conforme apresentado na Figura 5.21.

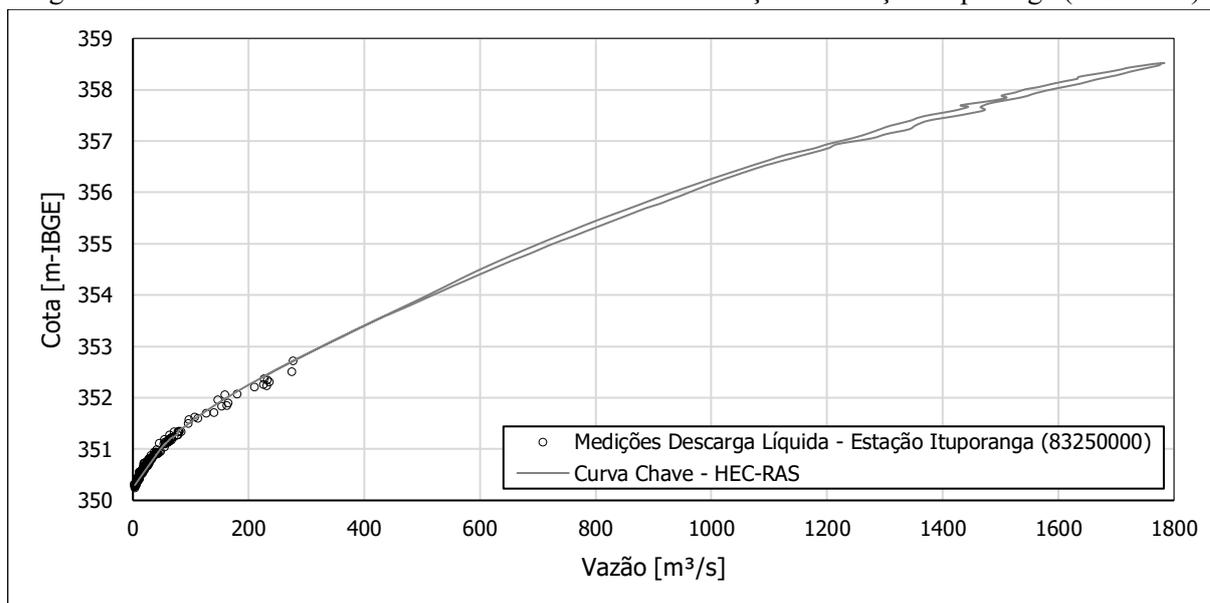
<sup>8</sup> Calculado como um menos a razão da variância do erro da série temporal modelada dividida pela variância da série temporal observada.

Figura 5.20 – Comparação dos cotogramas observado e simulado da cheia de 1983 na Estação Ituporanga (83250000)



Fonte: Própria do autor

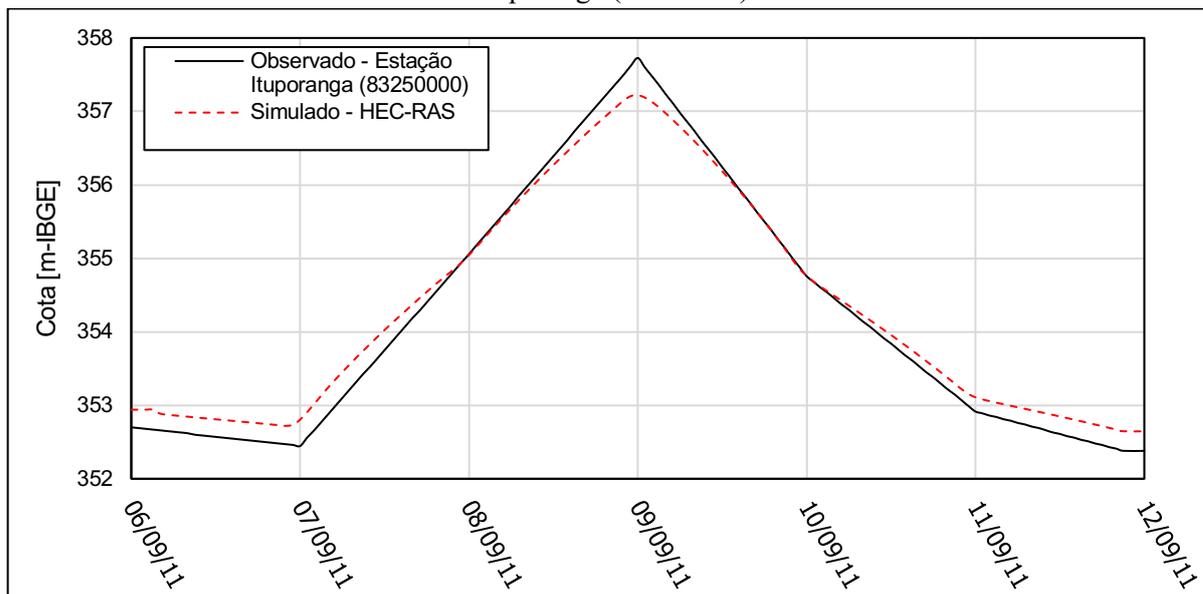
Figura 5.21 – Curva-chave do modelo hidráulico obtido na seção da estação Ituporanga (83250000)



Fonte: Própria do autor

A validação do modelo hidráulico deu-se pela simulação da cheia de 2011 sob as mesmas condições de rugosidade definidas para o modelo anterior. O resultado para o período de validação foi também representativo, com coeficiente de Nash  $NSE=0,984$  e boa conformação visual dos cotogramas, conforme apresentado na Figura 5.22.

Figura 5.22 – Comparação dos cotogramas observado e simulado da cheia de 2011 na Estação Ituporanga (83250000)



Fonte: Própria do autor

Para avaliação propriamente dos cenários de ruptura da Barragem Sul, a condição inicial das simulações hidrodinâmicas foi definida pelo aquecimento do modelo com estabelecimento da vazão de TR 2 anos nos cursos d'água pertencentes à área de estudo. A condição de contorno a montante do reservatório foi definida pela inserção do hidrograma de inundação com TR de 1.000 anos. Os dados de vazão e os locais de entrada dos hidrogramas no modelo hidráulico estão descritos na Seção 5.2.1.

Como condição interna do modelo, após o processo de calibração, foi inserido as regras operativas da Barragem Sul. Fundamentado no Manual de Operação dos Reservatórios de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí DCSC (2021g), as curvas de descarga dos descarregadores de fundo, túnel de descarga e vertedouro foram inseridas no modelo e a operação das estruturas extravasoras ao longo da simulação obedeceu a seguinte lógica:

- **Nível em Ituporanga menor que 1,9 m-IBGE:** 5 comportas de fundo permanecem abertas;
- **Nível em Ituporanga entre 1,9 e 2,6 m-IBGE:** 4 comportas de fundo fechadas e 1 aberta.
- **Nível em Ituporanga acima de 2,6 m-IBGE:** 5 comportas de fundo permanecem fechadas;
- **Canal Extravasador:** permanece fechado ao longo de todo o evento de enchimento.

A geração do hidrograma de ruptura deu-se pela simulação hidráulica do reservatório em associação a avaliação de abertura de brecha, conforme os conjuntos de parâmetros de brecha associados as probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e ao cenário determinístico de condição mais desfavorável, conforme descrito na Seção 5.1.2.

A influência dos pilares de pontes não foi verificada na simulação, dando-se enfoque apenas ao detalhamento da malha computacional junto ao aterro das referidas estruturas. A condição de jusante foi definida pela profundidade normal no Rio Itajaí do Sul, cuja declividade média do talvegue em seu trecho final é de aproximadamente 0,001 m/m. Cabe destacar que em função do objetivo do presente estudo ser a verificação das consequências dos cenários de inundação apenas no município de Ituporanga, optou-se pela limitação do domínio de simulação até cerca de 10 km a jusante da cidade, sendo a extensão total do modelo de aproximadamente 25 km. Os impactos da onda de ruptura, todavia, estendem-se a jusante do ponto final de simulação, conforme é possível observar nos estudos de Colferai (2018) e DCSC (2019b).

O modelo foi ajustado conforme as recomendações de USACE (2014), de modo a atingir uma simulação estável e precisa. O módulo de cálculo considerado na propagação hidráulica da onda de ruptura da Barragem Sul adotou o equacionamento completo das equações de Saint Venant 2D (*“Full Momentum Equations”*). O passo de tempo de cálculo computacional de 1 segundo foi baseado no número de Courant, adotando-se um limite máximo aproximado de 1,0. O tempo da janela de simulação foi de 48h.

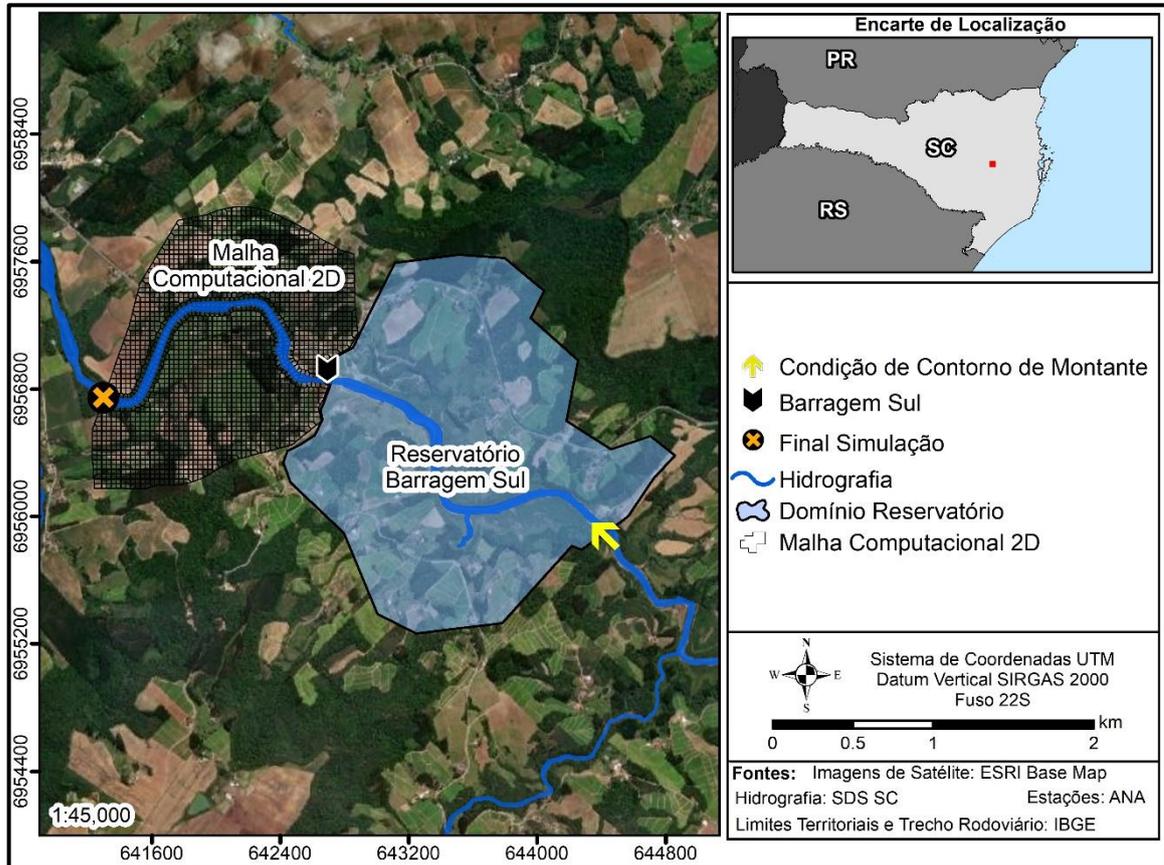
#### 5.2.4.2 *Modelo Hidráulico Truncado*

Adotando o modelo hidráulico completo e as recomendações de KLEINSCHMIDT (2019a), desenvolveu-se um modelo hidráulico truncado para aplicação do Modelo probabilístico de brecha de ruptura McBreach em conjunto com os parâmetros de entrada descritos na Seção 5.1.2.

A área de simulação a montante da Barragem Sul foi mantida com sua condição de *“Storage-Area”* no modelo, representando um método numérico de rápido processamento (USACE, 2021). Para a área de simulação a jusante, a maior parte da malha 2D de simulação foi removida, mantendo-se uma pequena área com cerca de 1,5 km de extensão para configuração das condições de contorno hidráulicas a jusante da estrutura. A distância para o

ponto final da simulação foi definida através de testes de sensibilidade, de forma que os efeitos causados pela condição de contorno não influenciassem nos hidrogramas de ruptura simulados pelo McBreach. A Figura 5.23 ilustra o domínio de simulação do modelo truncado.

Figura 5.23 – Domínio de simulação para o modelo truncado da Barragem Sul



Fonte: Própria do autor

Em função da diminuição do domínio de simulação, o passo de tempo de cálculo computacional foi aumentado para 5 s. A validade dos resultados obtidos foi verificada por meio da comparação dos hidrogramas de ruptura dos modelos truncado e completo para uma variedade de conjuntos de parâmetros de brecha.

Para o domínio da malha de simulação bidimensional a jusante, adotou-se o conjunto de equações de “Onda Difusa” ou “*Diffusion Wave*” (USACE, 2021). Para tanto, verificou-se a capacidade de replicação dos hidrogramas de vazão de ruptura do modelo truncado em relação ao modelo completo para a faixa de conjuntos de parâmetros de brecha.

Por fim, o tempo de simulação total foi cortado para um intervalo de 3 h. Este valor demonstrou ser longo do suficiente para capturar os picos dos hidrogramas de ruptura associados aos parâmetros de brecha com maior tempo de formação possível.

Nesse contexto, o tempo de para simulação de cada iteração do modelo McBreach foi de 4 s, totalizando um período de cerca de 11h para a rodada das 10.000 iterações e obtenção da convergência estatística no modelo. No presente trabalho, a convergência estatística foi garantida para uma variação menor do que 1% da média da vazão de pico em relação à faixa de variação das vazões entre mínimo e máximo amostrado, conforme sugerido por Goodell (2012).

### 5.2.5 Pós Processamento da Modelagem Hidráulica e Mapeamento dos Parâmetros da Inundação Potencial

O mapeamento da inundação foi realizado a partir das informações e resultados gerados para os cenários associados aos parâmetros de brecha com probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e ao cenário determinístico de condição mais desfavorável de brecha. Com o intuito de melhorar a interpretação e leitura dos resultados, selecionaram-se seções transversais ao eixo dos cursos de água em regiões de interesse para as quais se atribuíram parâmetros de inundação pertinentes, a saber: (i) Hidrograma de propagação da onda de cheia; (ii) Tempo de chegada da frente de onda e tempo para vazão máxima do hidrograma; (iii) Velocidades máximas atingidas; e (iv) Profundidades máximas atingidas.

Ao todo, foram selecionadas 13 seções de referência. Seus posicionamentos foram selecionados de modo a representarem a inundação em pontos de interesse relevante ao longo do vale a jusante, como locais habitados, rede viária e pontes. O Quadro 5.1 descreve os pontos de interesse de cada seção e a Figura 6.5 ilustra suas localizações.

Quadro 5.1 – Seções de Referência

Seção de Referência	Distância da Barragem Sul [km]	Local de Interesse	Seção de Referência	Distância da Barragem Sul [km]	Local de Interesse
S-01	0,0	Barragem Sul	S-08	14,5	Ponte Vitorio Sens, Centro Urbano de Ituporanga
S-02	3,0	Moradias, Comércio, SC-350; Estr. Geral Três Barras,	S-09	15,5	Ponte José Boabaid, Centro Urbano de Ituporanga
S-03	4,0	Moradias, Comércio, SC-350; Estr. Geral Três Barras	S-10	17,0	Ponte Pênsil
S-04	5,0	Ponte R. Carlos Bilk	S-11	20,0	Ponte Santa Tereza (Aurora/SC)
S-05	7,5	Moradias, Comércio, SC-350; Estr. Geral Três Barras,	S-12	23,0	Ponte Pênsil

Seção de Referência	Distância da Barragem Sul [km]	Local de Interesse	Seção de Referência	Distância da Barragem Sul [km]	Local de Interesse
S-06	10,0	Limite ZAS, Início Centro Urbano de Ituporanga	S-13	25,0	Final Simulação, Ponte Pênsil
S-07	13,5	Ponte BR-486, Centro Urbano de Ituporanga			

Fonte: Própria do autor

Em relação ao mapeamento da inundação potencial, será gerado o mapa integrado de envoltórias máximas para os cenários associados aos parâmetros de brecha com probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e ao cenário determinístico de condição mais desfavorável de brecha. No mapa, será apresentado o limite da Zona de Autossalvamento (ZAS), a qual seguirá a definição da Resolução ANA nº 236/2017: “(...) adotar, no mínimo, a menor das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km”. Para o presente estudo, o limite da ZAS será fixado na distância de 10 km.

### 5.3 MODELAGEM DE PERDA DE VIDA

Em posse dos resultados numéricos da modelagem hidráulica, conduziram-se as metodologias de aplicação do modelo HEC-LifeSim. Para o presente trabalho, adotou-se a versão 2.1.2, que atualmente encontra-se sob desenvolvimento do US Army Corps of Engineers Risk Management Center (USACE - RCM). Embora o modelo tenha tido seu nome rebatizado para “LifeSim”, no presente estudo admitiu-se a fixação do nome original para referência ao software (“HEC-LifeSim”).

Previamente a execução da modelagem, foi realizada uma análise de vulnerabilidade e exposição da população em risco a jusante da Barragem Sul, no município de Ituporanga (SC), com objetivo de construção de um inventário de estruturas e pessoas. O referido produto descreve a localização geoespacial das edificações, características construtivas, estatísticas populacionais de idade e ocupação durante o dia e a noite dos indivíduos alocados. Configurando-se como um dado de entrada necessário para aplicação do modelo, sua metodologia de construção é descrita na Seção 5.3.1.

Na sequência, a metodologia de desenvolvimento da modelagem de perda de vida é descrita na Seção 5.3.2 e, por fim, os procedimentos adotados para análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos são apresentados na Seção 5.3.3.

### 5.3.1 Análise de Vulnerabilidade e Exposição

Para a análise de vulnerabilidade e exposição da população em risco a jusante da Barragem Sul, a principal base de dados populacionais e domiciliais adotada foram os produtos desenvolvidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Dentro do universo de dados disponibilizados, destaca-se nesse trabalho quatro fontes de informação que foram aplicadas de forma integrada: (i) Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE) (IBGE, 2013a); (ii) Base de Faces de Logradouros do Censo Demográfico (IBGE, 2010a); (iii) Microdados do Universo do Censo Demográfico (IBGE, 2010b); e (iii) Grade Estatística (IBGE, 2016).

Uma breve descrição sobre cada produto e uma avaliação das variáveis passíveis de utilização para conversão em dados de entrada no HEC-LifeSim é desenvolvida na Seção 5.3.1.1. Posteriormente, a metodologia de processamento e integração dos dados é descrita na Seção 5.3.1.1.

Cabe ainda destacar as limitações associadas aos setores censitários, que não foram objetos da presente análise. Embora caracterizados como a menor unidade de análise dos dados do censo demográfico, sua distribuição não necessariamente apresenta conformidade espacial com as áreas de risco de desastres, condição que dificulta a associação e distribuição de suas informações censitárias (IBGE, 2018a). Complementarmente, importantes informações de entrada no modelo HEC-LifeSim não estão disponíveis nos resultados agregados dos setores censitários. Desta forma, justificasse a necessidade: (i) da utilização da Grade Estatística, que permite maior flexibilidade e resolução na avaliação espacial; e (ii) da distribuição das informações dos microdados, que embora estejam agregadas as zonas de ponderação (constituídas por conjuntos de setores censitários), fornecem valiosos dados referentes a características construtivas dos domicílios e ao comportamento laboral da população.

#### 5.3.1.1 Seleção da Base de Dados Populacionais e Domiciliais

O Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE), é um banco de dados de endereços de abrangência nacional mantido pelo IBGE. Este repositório possui mais de 78 milhões de endereços e foi produzido com o intuito de subsidiar a realização de pesquisas domiciliares da própria instituição IBGE (2013a). Os registros estão disponíveis publicamente e apresentam uma classificação das espécies de endereços quanto ao seu uso, sendo composto por 35 variáveis explicativas. Embora sua natureza seja de caráter operacional, seus dados

configuram uma relevante fonte de informação a respeito da configuração populacional dos municípios brasileiros (PORTO-SALES *et al.*, 2014). Ainda, visando a preservação do sigilo, não é divulgado nenhum atributo associado ao endereço que tenha sido obtido por meio de entrevista, ou seja, são divulgadas apenas informações públicas, obtidas por meio de observação direta do agente de coleta (IBGE, 2018b).

O cadastro individualmente não é suficiente para a definição da geolocalização, a medida em que os endereços urbanos, diferentemente dos rurais, não possuem coordenadas geográficas associadas. Estes elementos são localizados nos registros através de um geocódigo constituído do código da região, unidade da federação, município, distrito, subdistrito, quadra e face. Assim, por meio de processamento dos dados do cadastro em associação aos arquivos gráficos referentes aos segmentos ou faces de logradouros (IBGE, 2010a), é possível associar coordenadas geográficas aproximadas aos endereços urbanos coletados (GUARDA, 2020; LEITE, 2013; 2015).

No escopo de aplicação ao inventário de dados do HEC-LifeSim, as variáveis do CNEFE (IBGE, 2013b) relacionadas a: (i) tipo de elemento (estrutura); (ii) espécie de endereço; (iii) identificação de estabelecimento; (iv) indicador de endereço; e (v) identificação do domicílio coletivo possuem significativa correlação. Deste modo, os dados foram utilizados como base para identificação do tipo de ocupação.

Os Microdados consistem no menor nível de desagregação dos dados de uma pesquisa, retratando, sob a forma de códigos numéricos, o conteúdo dos questionários, preservado o sigilo estatístico com vistas à não individualização das informações (IBGE, 2010b). Esta informação refere-se a coleta do Censo Demográfico 2010, realizada no período de 1º de agosto a 30 de outubro de 2010 utilizando a base territorial que se constituiu de 316.574 setores censitários, unidade territorial criada de controle cadastral da coleta. O método de coleta dos dados foi realizado por meio de pesquisa amostral através de entrevista presencial realizada pelos recenseadores ou pelo preenchimento do questionário via internet. Para aplicação, foram definidas cinco frações de amostragem considerando os tamanhos dos municípios, em termos da população estimada em 1º de julho de 2009, e critérios de validação estatística (IBGE, 2010b). Assim, a nível nacional, cerca de 11% dos domicílios brasileiros foram amostrados para composição dos resultados.

O IBGE (2012) esclarece que em pesquisas realizadas por amostragem probabilística, cada unidade selecionada na amostra representa, também, outras unidades que fazem parte da população-alvo. Assim, para cada unidade domiciliar selecionada na amostra do Censo Demográfico 2010, foi associado um fator de expansão ou peso obtido através de ajuste estatístico. O peso obtido para uma determinada unidade domiciliar foi atribuído também a cada um de seus moradores. Ainda, de maneira a preservar o sigilo em relação aos informantes da pesquisa, a menor unidade geográfica para identificação dos microdados da amostra é a área de ponderação, sendo esta uma unidade geográfica formada por um agrupamento de setores censitários. A área de ponderação é também utilizada para a aplicação dos procedimentos de calibração das estimativas com as informações conhecidas para a população como um todo (IBGE, 2018b).

Desse modo, os resultados obtidos considerando as áreas de ponderação e seus respectivos pesos amostrais podem ser rearranjados de maneira proporcional e distribuídos de forma homogênea dentro de uma região de estudo. Importante destacar que os dados são disponibilizados em quatro conjuntos, relacionados aos resultados da amostragem de domicílio, pessoas, emigração e mortalidade, configurando os dois primeiros como objeto de interesse deste trabalho. Retomando o objetivo de aplicação das informações, apresenta-se no **Apêndice B** as variáveis selecionadas das amostragens de domicílios e pessoas, para utilização como suporte informativo nos dados de entrada do modelo HEC-LifeSim.

A Grade Estatística é caracterizada como um sistema de células regulares utilizado como base para a geração de um suporte geográfico estável para a disseminação de dados IBGE (2016). A geração deste sistema consiste em uma operação de transferência de suporte espacial de dados, onde os dados básicos existentes em um suporte, como pontos ou polígonos, são transferidos para outro suporte, tais como polígonos ou superfícies. Nesse contexto, a medida em que foram empregados, no Censo Demográfico 2010, equipamentos de coleta eletrônicos com dispositivos GPS acoplados, foi possível a captura de informações de localização dos domicílios visitados. Nas áreas rurais, foram capturadas as coordenadas geográficas de cada edificação e nas áreas urbanas, por meio da associação com as informações do Cadastro de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE), foi possível atribuir um geocódigo relacionado a cada quadra/face acoplado ao setor censitário, permitindo a localização espacial dos endereços.

A existência desta base de dados georreferenciados, em associação com os microdados do universo, permitiu, por meio de processos estatísticos de agregação e desagregação, a

construção da Grade Estatística. Para o propósito de disseminação dos dados, IBGE (2016) adotou células com dimensões de 1 km x 1 km nas áreas rurais e 200 m x 200 m nas áreas urbanas. Metodologicamente, a abordagem de agregação consiste em somar os dados básicos que se encontram dentro da unidade desejada. A abordagem de desagregação, por sua vez, engloba técnicas que transferem os dados existentes em um suporte espacial para outro suporte espacial, através da criação de um denominador espacial comum entre as unidades de origem e de destino (PLUMEJEAUD et al., 2010).

Conforme IBGE (2016), a técnica de agregação é a solução ideal para os problemas decorrentes das alterações nos limites das unidades espaciais utilizadas para agregar dados estatísticos. Para sua aplicação, entretanto, é necessário que os microdados das pesquisas domiciliares estejam corretamente georreferenciados. Nos dados censo, constatou-se a existência de uma quantidade significativa de registros sem dados de localização, fazendo com que uma única abordagem não fosse suficiente para tratar a totalidade dos dados. Assim, a utilização de uma abordagem híbrida, combinando agregação e desagregação, tornou-se necessária. A determinação do limite para utilização de cada abordagem e método de desagregação, bem como maiores detalhes relacionados a concepção e processamento do produto podem ser verificados nas publicações de IBGE (2016) e Bueno (2014).

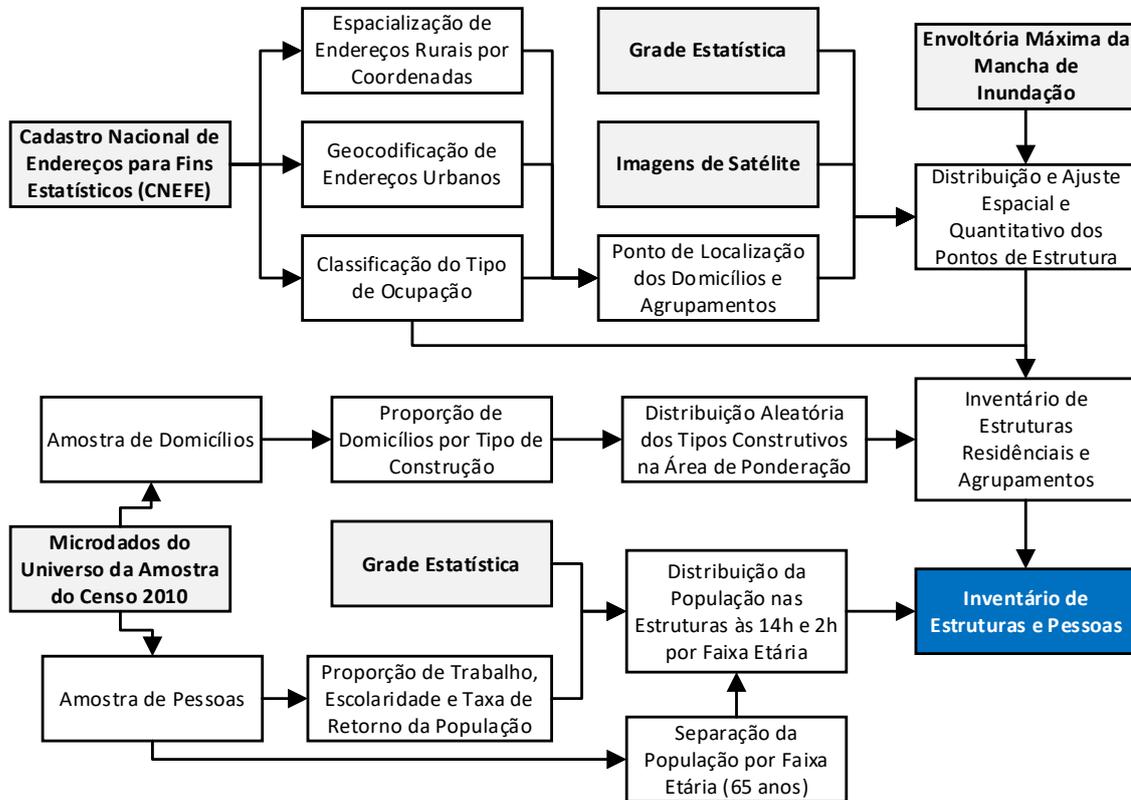
No âmbito deste trabalho, determina-se através da grade estatística a população base e a quantidade de domicílios em cada célula. Para a alocação geográfica das estruturas, pode-se utilizar imagens de satélite como suporte. A população por domicílio foi determinada por meio da distribuição homogênea entre os domicílios existentes na célula analisada.

#### *5.3.1.2 Metodologia de Processamento e Integração dos Dados no Inventário de Estruturas e Pessoas*

Objetivando-se a configuração de uma compreensão global das informações e o estabelecimento de uma metodologia para utilização dos produtos indicados, apresenta-se na Figura 5.24 um fluxograma de manipulação dos dados para criação do inventário de estruturas e pessoas, fonte de entrada do modelo de perda de vida. Esta proposição parte da análise do estado da arte de aplicação de dados do censo em microescala no Brasil, onde destacam-se os trabalhos de Matos e Eleutério (2019), Silva (2020), Sales (2020), Silva *et al.* (2020) e Silva *et al.* (2021). Destaca-se ainda que a construção do inventário seguiu a estrutura proposta por USACE (2020b), contendo os parâmetros e formatação necessária para entrada no modelo

HEC-LifeSim (Quadro 3.9). No **Apêndice C** apresentam-se alguns dos principais itens da convenção adotada para definição dos atributos dos tipos de ocupação do inventário de estruturas.

Figura 5.24 – Fluxograma de manipulação dos dados para criação do inventário de estruturas e pessoas



Fonte: Própria do autor

O processo proposto iniciou-se com o emprego dos dados do CNEFE. Através das coordenadas dispostas para os endereços rurais e do processamento dos dados geocodificados do cadastramento urbano sobre a base de faces de logradouros (GUARDA, 2020), definiram-se os pontos de localização aproximados dos domicílios (estruturas residenciais) e agrupamentos (estruturas comerciais, industriais e públicas). Empregando imagens dos Ortofotomosaicos de Composição Colorida (RGB) do Estado de Santa Catarina (SDS, 2016b), com resolução espacial de 0,39 metros, realizou-se a distribuição e o ajuste espacial das estruturas visualmente identificadas. Com auxílio da envoltória máxima da mancha de inundação, delimitou-se a área necessária para avaliação das informações. A grade estatística foi empregada como parâmetro de referência para o número de construções residenciais, assim, a distribuição dos cadastros do CNEFE foi realizada em duas fases: (i) primeiramente, buscando-se atender o quantitativo de estruturas residenciais da célula da grade, e (ii)

posteriormente, buscando-se alinhar as estruturas comerciais as imagens de satélite observadas e ao quantitativo indicado na quadra/face do cadastro (IBGE, 2010a). Para classificação do tipo de ocupação de cada estrutura, utilizaram-se as informações complementares dos endereços do CNEFE, conforme a variável de “Espécie de Endereço”. Fundamentado nos referidos dados, o presente estudo classificou os endereços de domicílio entre: (i) estabelecimentos residenciais multifamiliares (apartamentos); e (ii) unifamiliares (casas) e os demais endereços entre estabelecimentos: (i) agropecuários; (ii) educacionais; (iii) comerciais; (iv) de saúde; e (v) coletivos.

Conjuntamente, utilizou-se as amostras de domicílios dos microdados do universo da amostra do censo de 2010 para complementação das informações dos materiais estruturais. Através da referida amostra, empregou-se a variável “Material predominante, paredes externas”, com auxílio do peso amostral das entrevistas, para definição da proporção de cada tipo de construção na área de ponderação (IBGE, 2012), cujo presente estudo classificou em duas categorias: (i) alvenaria; e (ii) madeira. Em posse das proporções definidas, realizou-se a distribuição aleatória dos dois tipos construtivos entre as estruturas existentes. Os dados até então associados conceberam o inventário de estruturas e agrupamentos.

Na sequência, a avaliação das informações populacionais foi realizada com a amostra de pessoas dos microdados. Por meio do tratamento estatístico dos dados de trabalho, escolaridade e taxa de retorno definiram-se as proporções de distribuição da população nos horários das 2h e 14h (horário padrão estipulado para entrada no modelo HEC-LifeSim). Em maiores detalhes, as seguintes considerações foram empregadas: (i) através dos parâmetros de educação (curso, série/ano que frequenta e município que estuda) verificou-se a proporção de pessoas que estudam nos períodos matutinos (5<sup>a</sup> a 8<sup>a</sup> série e ensino médio) e vespertinos (1<sup>a</sup> a 4<sup>a</sup> série) e a proporção de pessoas que estudam fora no município; (ii) por meio das variáveis de trabalho (ocupação e local de trabalho) verificou-se, em função da atividade laboral (IBGE, 2010c), a proporção da população alocada nas principais tipologias de construção existentes no inventário de estruturas e agrupamentos, bem como também avaliou-se a proporção da população que trabalha em outros municípios, realiza o trabalho no próprio domicílio ou, então, que não trabalha; e (iii) mediante a variável de “retorno de trabalho para casa diariamente”, definiu-se a proporção da população presente nas residências no período noturno. Por fim, em função da variável de idade, realizou-se a separação da população com mais e menos de 65 anos para cada uma das avaliações conduzidas.

Metodologicamente, destaca-se que a base adotada para aplicação das proporcionalidades nas residências são os dados iniciais de população do polígono da grade estatística. Deste modo, apenas após a definição dos quantitativos de população nos horários das 2h e 14h e nas faixas etárias acima e abaixo dos 65 anos para cada célula da grade, é então conduzida a distribuição uniforme entre os pontos de domicílios presentes na feição, respeitando o quantitativo total e adotando-se números inteiros. Para os casos onde a proporção de pessoas por domicílio da faixa é menor que 1 (um), conduziu-se uma distribuição aleatória entre o universo de dados. A distribuição da população nas estruturas comerciais, industriais e públicas (agrupamentos), por sua vez, é conduzida de forma homogênea entre as tipologias de estruturas por meio da correlação com a proporção de atividades de trabalho e ensino, considerando a totalidade da população do município. O tratamento estatístico dos dados foi realizado no *software* MS Access por meio da construção de um código em SQL de divisão tipológica da população. Em posse dos resultados, as proporcionalidades foram alocadas aos atributos das feições do inventário de estruturas e agrupamentos com emprego do *software* livre QGIS 3.16. O produto, ao fim, compreende o inventário de estruturas e pessoas.

### **5.3.2 Desenvolvimento da Modelagem de Perda de Vida**

A metodologia de aplicação do modelo HEC-LifeSim é apresentada na sequência. Os cenários base adotados foram fundamentos: (i) nos resultados da modelagem hidráulica computacional para os eventos associados aos parâmetros de brecha com probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e a ao evento (determinístico) mais desfavorável de brecha (Seção 5.2); (ii) na análise de vulnerabilidade e exposição da área de risco de inundação em Ituporanga, por meio da utilização do inventário de estruturas e pessoas (Seção 5.3.1); e (iii) na avaliação da condição de preparação do município, conforme informações apresentadas nos documentos do Plano de Ação de Emergência (PAE) da Barragem Sul e do Plano de Contingência de Defesa Civil (PLANCON) de Ituporanga (DCSC, 2019b; COMPDEC, 2015).

A caracterização do sistema de alerta fundamentou-se na linha do tempo de alerta e evacuação, onde devem ser definidos os tempos de identificação e comunicação da ameaça, emissão e difusão do aviso e iniciação das ações de mobilização (Seção 3.4.3.3).

Para definição do atraso na identificação e na comunicação da ameaça, conduziu-se uma avaliação do sistema de alerta associado a Barragem Sul e ao Município de Ituporanga. Sumariamente, os aspectos favoráveis ao processo constituem-se da (i) presença física de

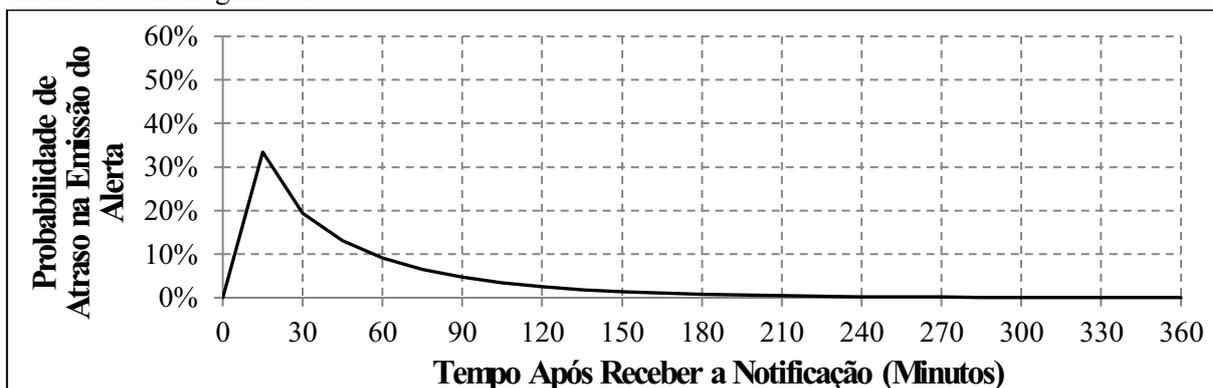
equipe 24h no local do barramento; (ii) existência de sistema de comunicação via rádio, em redundância ao sistema de comunicação via celular; (iii) permanência de equipe da DCSC de monitoramento e alerta 24h durante os períodos de operação da barragem; (iv) Capacidade de emissão de alertas SMS via sistema IDAP; e (iv) existência de COMPDEC ativa no município de Ituporanga/SC. Os aspectos desfavoráveis resumem-se a (i) inexistência de sistema de alerta por sirenes na ZAS da Barragem Sul; (ii) dificuldade de adesão da população aos serviços de alerta de SMS; (iii) ausência de sistema de instrumentação para identificação automática de possíveis gatilhos de ruptura. Em vista das informações apresentadas e das características de progressão do gatilho de formação definido para ruptura (*piping*), adotou-se uma distribuição uniforme de -30 a +0 minutos para o tempo de identificação da ameaça. Para o atraso da comunicação da ameaça, uma distribuição uniforme de 0 a 5 min foi definido em função das características de preparação do empreendedor.

A caracterização dos tempos de emissão do alerta, difusão do alerta e iniciação da mobilização ocorreu por meio da construção de curvas específicas em função das características do empreendedor da Barragem Sul. Para tanto, um processo de elicitação foi conduzido, fundamentado na metodologia proposta por Sorensen & Mileti (2015a). Assim, um guia de entrevista com 52 perguntas foi conduzido com os responsáveis pela Coordenação de Monitoramento e Alerta e pela Gerência de Monitoramento Hidrológico da Defesa Civil de Santa Catarina. Os dados foram processados com base em um sistema de pontuação (SORENSEN & MILETI, 2015b) e na utilização do aplicativo “*Warning and Mobilization Curve Generator Version 1.12*” de geração de curvas elaborado por USACE–RCM (2022). As curvas resultantes, inseridas como entrada no modelo, são apresentadas da Figura 5.25 a Figura 5.27. Os resultados numéricos das curvas encontram-se no **Apêndice D**.

As Zonas de Planejamento de Emergência (ZPE), entradas no modelo definidas como áreas geoespaciais onde as características de alerta e evacuação são homogêneas, foram definidas como uma única zona homogênea. Esta condição parte da verificação da homogeneidade da eficiência do sistema de alerta presente nas regiões de ZAS e ZSS e da presença de um único órgão responsável pela gestão da emergência (Defesa Civil).

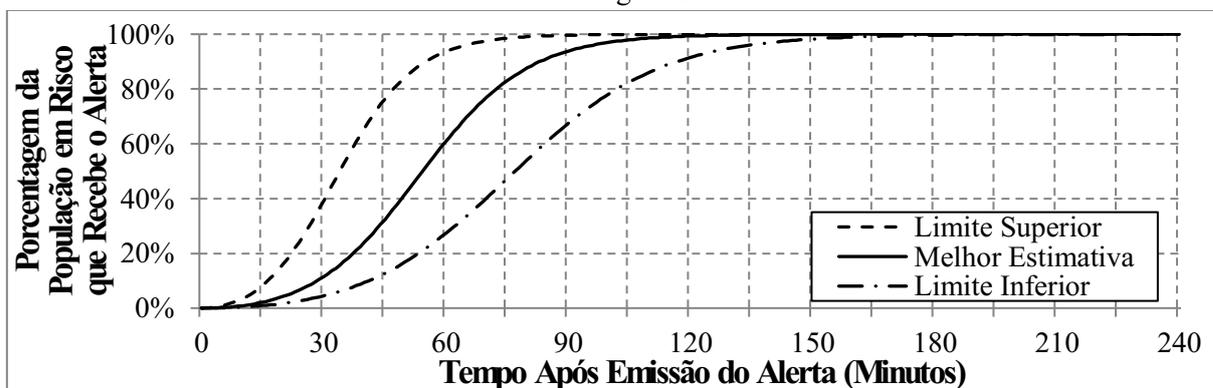
A rede viária foi caracterizada através da importação dos dados de arruamento existente na base do serviço web *OpenStreetMap*<sup>9</sup>. A informação obtida foi posteriormente validada, sendo verificadas as informações de sentido da via, velocidade máxima e deslocamentos verticais (pontes e viadutos).

Figura 5.25 – Curva de distribuição de probabilidade de atraso na emissão do alerta para a população em risco da Barragem Sul



Fonte: Própria do autor

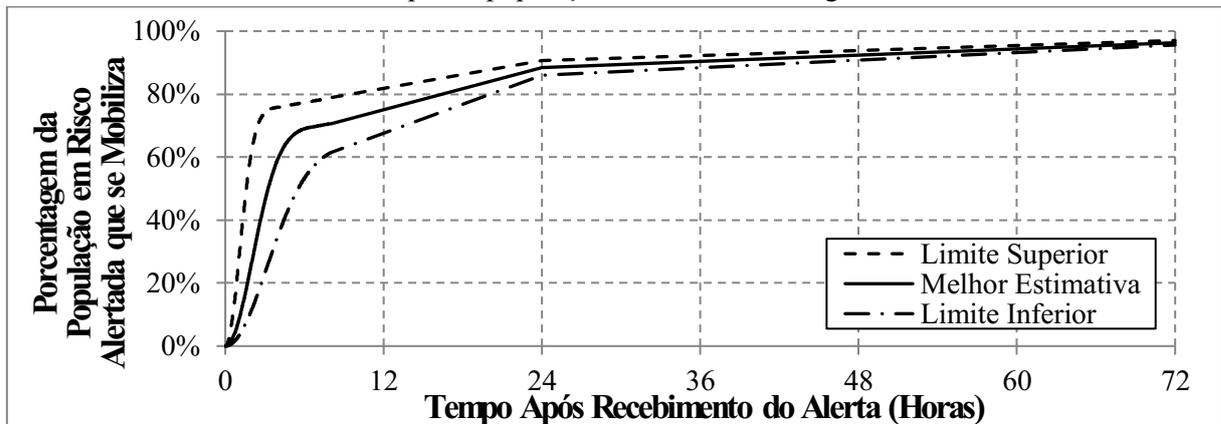
Figura 5.26 – Curvas de distribuição de probabilidade de difusão do alerta para a população em risco da Barragem Sul



Fonte: Própria do autor

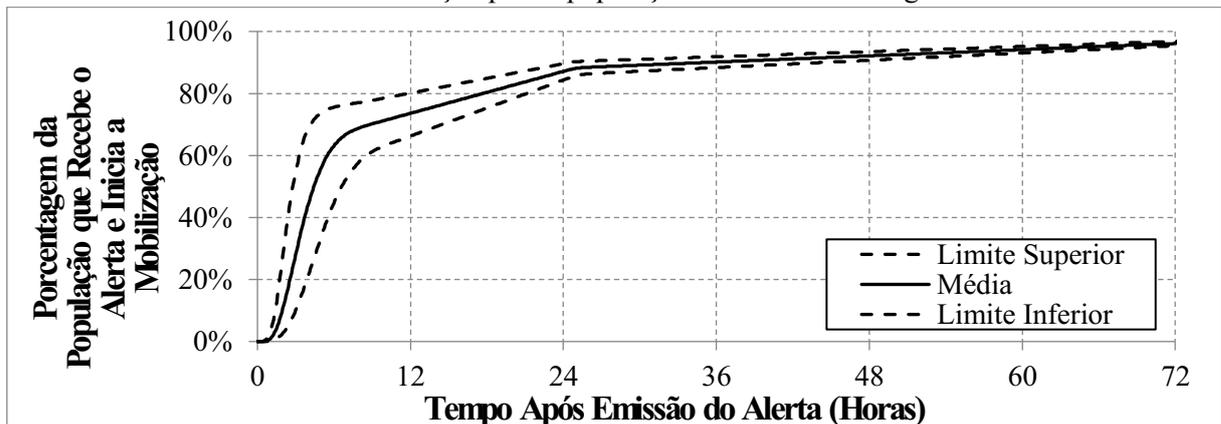
<sup>9</sup> <https://www.openstreetmap.org/>.

Figura 5.27 – Curvas de distribuição de probabilidade de início da mobilização da população em risco alertada para a população em risco da Barragem Sul



Fonte: Própria do autor

Figura 5.28 – Curvas de distribuição de probabilidade combinada das etapas de difusão do alerta e início da mobilização para a população em risco da Barragem Sul



Fonte: Própria do autor

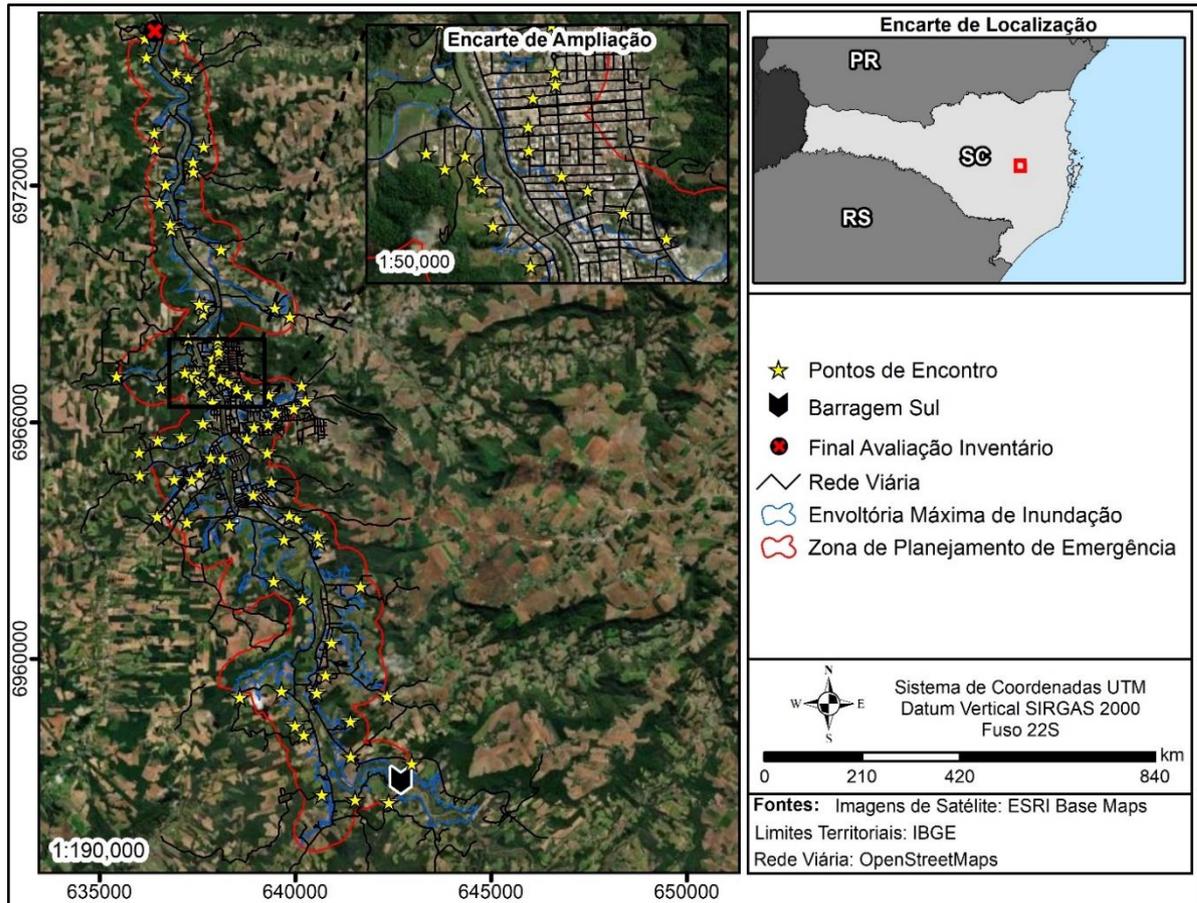
Os pontos de encontro, não definidos explicitamente no PAE da Barragem Sul (DCSC, 2019b) e PLANCON de Ituporanga/SC (COMPDEC, 2015), foram propostos conforme orientações de CENAD (2016) e CEDEC (2021). Assim, os pontos foram alocados em diferentes regiões objetivando-se o atendimento aos diversos centros populacionais no vale a jusante. De modo geral, buscou-se a definição de locais elevados, que tivessem uma distância mínima de 10 m da mancha de inundação máxima calculada e fácil acesso por estradas. Ao total 87 pontos de encontro foram estabelecidos ao longo dos 25 km de extensão modelados. A Figura 5.29 ilustra as Zonas de Planejamento de Emergência (ZPE), rede viária e pontos de encontro adotados no modelo.

No Quadro 5.3, apresentam-se também os principais parâmetros de evacuação adotados em função de cada categoria de entrada de dados: (i) Parâmetros de ocupação das

estruturas; (ii) Parâmetros populacionais; e (iii) Parâmetros de trânsito. Os valores foram definidos com base em recomendações e boas práticas sugeridas por USACE (2020b) e no julgamento de engenharia, em função das características da área de estudo.

Por fim, apresenta-se no Quadro 5.4 os parâmetros de simulação adotados no modelo, referentes a definição da hora de ocorrência do evento e ao número de iterações executadas.

Figura 5.29 – ZPE, rede viária e pontos de encontro adotados no modelo



Fonte: Própria do autor

Quadro 5.2 – Parâmetros de evacuação adotados no modelo para o Cenário Base

Categoria	Parâmetro	Descrição	Valor Adotado	Observação
Parâmetros de Ocupação das Estruturas	População em cada estrutura é alertada ao mesmo tempo	Determina se a população dentro de uma estrutura é avisada de forma independente ou em conjunto.	Ativado	Aplicado em todos os tipos de ocupação, exceto residências multifamiliares
	População em cada estrutura toma ação protetora ao mesmo tempo	Determina se a população dentro de uma estrutura pode se mobilizar independentemente	Ativado	Aplicado apenas em estruturas residenciais, dormitório institucionais e asilos

<b>Categoria</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor Adotado</b>	<b>Observação</b>
	Probabilidade de acesso ao telhado ou sótão	Parâmetros baseado no acesso à estrutura e não na mobilidade da população.	95%	-
	Fração para telhado vs sótão	Parâmetro baseado no acesso à estrutura e não na mobilidade da população. Variável com percentagem de estruturas com sótãos.	90%	-
	Fração da população que evacua em veículos vs a pé	Uso da rede viária para pedestres. Dependente do local e da disponibilidade de transporte público.	65% <sup>10</sup>	-
	Tamanho do grupo de evacuação	Parâmetro baseado na capacidade do veículo usado para evacuação.	3	Aplicado em todos os tipos de ocupação, exceto dormitórios institucionais
Parâmetros Populacionais	Fração da população abaixo dos 65 anos com limitação de mobilidade	Determina a capacidade de evacuar verticalmente.	5,1%	-
	Fração da população acima dos 65 anos com limitação de mobilidade	Determina a capacidade de evacuar verticalmente.	22,6%	-
	Fração da População com capacidade de nadar	Aplica-se a população que evacua a pé da qual é atingida pela inundação.	45%	-
Parâmetros de Trânsito	Velocidade dos pedestres a pé	O padrão é a velocidade de caminhada rápida (aprox. 1,07 m/s). Variáveis como habilidade, terreno, distância, motivação e cargas podem influenciar o parâmetro.	6,44 km/h	-
	Fração em carros vs SUVs/caminhões	Define a porcentagem de pessoas que serão evacuadas por carros ou por SUVs e caminhões.	50%	-
	Fração que redireciona no congestionamento	Fração de pessoas que procurará rotas mais rápidas para qualquer destino quando confrontada com um engarrafamento	80%	-
	Distância à frente do veículo	Distância para determinação da densidade à frente para um segmento de estrada. A densidade calculada é utilizada para definição da velocidade do veículo.	402 m	-
	Comprimento efetivo do veículo	Representa o comprimento médio de um veículo mais um pequeno buffer para contabilizar o espaço entre os veículos em condições paradas	6,1 m	-

<sup>10</sup> Fração definida em função da variável “V0222 - Automóvel para uso particular, existência” da amostra de domicílios dos microdados do universo do censo demográfico de 2010 do IBGE.

<b>Categoria</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor Adotado</b>	<b>Observação</b>
	Profundidade de Não-Evacuação	Profundidade a partir da qual um grupo de evacuação não escolherá mais não deixar a estrutura.	0,61 m	-
	Intervalo de Tempo de Evacuação	Dentro de um intervalo de tempo de evacuação, são calculadas as ações de mobilização, as velocidades de pessoas e veículos e as correções de posições no trânsito em função de engarrafamentos.	10 s	-
	Intervalo de atualização ao vivo do trânsito	O intervalo de atualização de tráfego ao vivo determina a quantidade máxima de atraso para atualizar as condições de tráfego atuais. Durante uma evacuação, os motoristas provavelmente terão informações do <i>Google Maps</i> , <i>Waze</i> ou outros aplicativos que fornecem informações em tempo real.	5 min	-

Fonte: Própria do autor

Quadro 5.3 – Parâmetros de simulação adotados no modelo para o cenário base

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor Adotado</b>	<b>Observação</b>
Hora de ocorrência do evento	Define o momento em que o evento de ruptura inicia	14h	2h e 14h representam as seleções padrão, representando condições diurnas e noturnas. (USACE, 2020b)
Número de Iterações	Cada iteração fornece um novo conjunto de parâmetros amostrados da distribuição de incerteza	1.000	Valor do parâmetro adotado em função de sua aplicação e recomendação em estudos anteriores de análise de perdas de vidas (HILL <i>et al.</i> , 2018; SILVA, 2020)

Fonte: Própria do autor

### 5.3.3 Análise de Sensibilidade

A condução da análise de sensibilidade objetivou a verificação das principais incertezas atribuídas a diferentes variáveis de entrada na saída das simulações. Em posse destes resultados, se tornará possível a avaliação das principais limitações e incertezas associadas aos resultados de perda de vida. As informações obtidas pela análise de sensibilidade são altamente relevantes para auxílio de tomada de decisões em investimentos, podendo ser utilizadas para verificação do desempenho e escolha de medidas estruturais ou não-estruturais presentes no planejamento de emergência (GOULDBY *et al.*, 2010; SILVA, 2020).

Tomando-se como referência o Cenário Base (C00) apresentado na Seção 5.3.2, foi avaliado a sensibilidade aos parâmetros de alerta e mobilização, evacuação e simulação através da proposição de 13 cenários (C01 a C13).

Os parâmetros de alerta e mobilização tiveram sua influência verificada a partir das curvas pré-definidas existentes no modelo HEC-LifeSim (cenários C06 a C13). Para os tempos de emissão do alerta ( $T_E$ ), difusão ( $T_D$ ) e mobilização ( $T_M$ ), foram selecionadas as curvas associadas as condições de preparo máximo e mínimo, fundamentado nos estudos de Sorensen & Mileti (2014a, 2014b, 2014c) apresentados na Seção 3.4.3.3. Para verificação do impacto do atraso na identificação ( $T_I$ ) e comunicação da ameaça ( $T_C$ ), foram propostas faixas de tempo com antecedência e subsequência em relação ao início do evento (gatilho de ruptura).

A sensibilidade dos parâmetros de evacuação foi verificada através da alteração dos parâmetros de maior sensibilidade (cenários C03 a C05). Assim, a fração da população que evacua em veículos ou a pé ( $F_{VP}$ ) e a fração da população abaixo e acima dos 65 anos com limitação de mobilidade ( $F_M$ ) tiveram seus valores alterados para diferentes condições.

Para os parâmetros simulação (cenários C01 e C02), foram verificados: (i) a influência da alteração da hora de ocorrência do evento ( $H_E$ ) para o período do dia oposto ao cenário base; e (ii) o impacto nos resultados devido a alteração do número de iterações ( $N_I$ ).

Os demais parâmetros adotados no modelo foram mantidos constantes, conforme informações apresentadas no Quadro 5.2 e Quadro 5.3. A análise de sensibilidade foi conduzida para os eventos de ruptura simulados com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o evento determinístico. Um resumo dos cenários analisados é apresentado no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Cenários simulados para análise de sensibilidade do modelo HEC-LifeSim

Cenário – Sigla/Descrição	Parâmetros de Alerta e Mobilização					Parâmetros de Evacuação			Parâmetros de simulação	
	$T_I$	$T_C$	$T_E$	$T_D$	$T_M$	$F_{VP}$	$F_M$	$F_{M65}$	$H_E$	$N_I$
C0–CenárioBase	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000
C1– $N_I$ .5000	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	CP	65	5,1	22,6	14h	<b>5.000</b>
C2– $H_E$ .02h	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	CP	65	5,1	22,6	<b>02h</b>	1.000
C3– $F_M$ .10  $F_{M65}$ .45	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	CP	65	<b>10,0</b>	<b>45,0</b>	14h	1.000
C4– $F_{VP}$ .30	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	CP	<b>30</b>	5,1	22,6	14h	1.000
C5– $F_{VP}$ .0	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	CP	<b>0</b>	5,1	22,6	14h	1.000
C6– $T_M$ . $C_D$	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	<b><math>C_D</math></b>	65	5,1	22,6	14h	1.000
C7– $T_M$ . $C_A$	-30 a 0	0 a 5	CP	CP	<b><math>C_A</math></b>	65	5,1	22,6	14h	1.000
C8– $T_D$ . $C_L$	-30 a 0	0 a 5	CP	<b><math>C_L</math></b>	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000
C9– $T_D$ . $C_R$	-30 a 0	0 a 5	CP	<b><math>C_R</math></b>	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000
C10– $T_E$ . $C_{MP}$	-30 a 0	0 a 5	<b><math>C_{MP}</math></b>	CP	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000
C11– $T_E$ . $C_{BP}$	-30 a 0	0 a 5	<b><math>C_{BP}</math></b>	CP	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000
C12– $T_I$ .0a10  $T_C$ .5a10	<b>0 a +15</b>	<b>5 a 10</b>	CP	CP	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000
C13– $T_I$ .-60a-30  $T_C$ .0a2	<b>-60 a -15</b>	<b>0 a 1</b>	CP	CP	CP	65	5,1	22,6	14h	1.000

Onde:  $T_I$  – Tempo de identificação da ameaça (distribuição uniforme) [min]<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Valores negativos indicam o tempo anterior a ocorrência do gatilho de ruptura. Os positivos indicam tempo posterior.

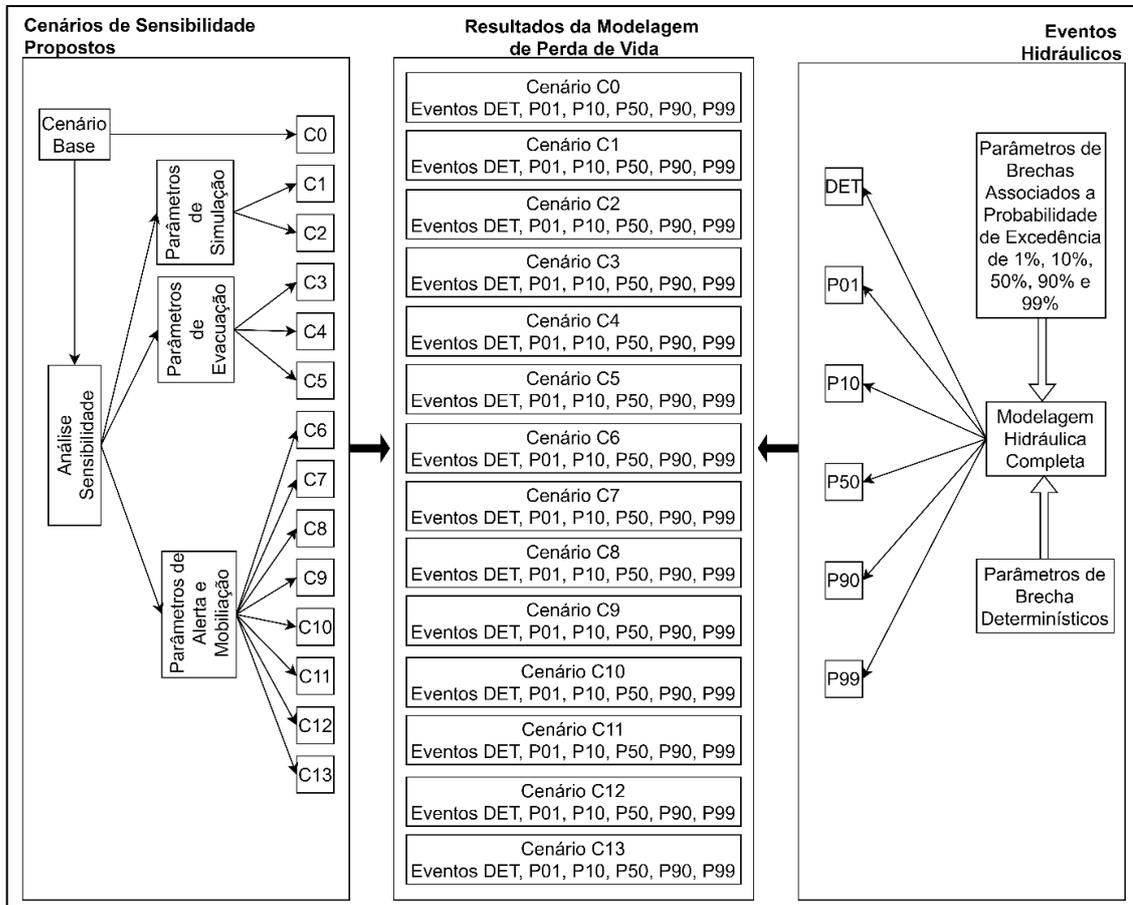
- T<sub>C</sub> – Tempo de comunicação da ameaça (distribuição uniforme) [min]
- T<sub>E</sub> – Tempo para emissão do alerta, conforme curvas propostas por Sorensen & Mileti (Seção 3.4.3.3). Onde: CP é a Curva Personalizada para a região de estudo (Figura 5.25), e C<sub>MP</sub> e C<sub>BP</sub> são as Curvas Padrão de Atraso na Emissão do Alerta de condição “Minimamente Preparado” e “Bem Preparado”, respectivamente (Tabela 3.6).
- T<sub>D</sub> – Tempo de difusão do alerta, conforme curvas propostas por Sorensen & Mileti (Seção 3.4.3.3). Onde: CP é a Curva Personalizada para a região de estudo (Figura 5.26), e C<sub>L</sub> e C<sub>R</sub> são as Curvas Padrão de Difusão do Alerta do tipo “Lenta” e “Rápida”, respectivamente (Tabela 3.7).
- T<sub>M</sub> – Tempo de inicialização da mobilização, conforme curvas propostas por Sorensen & Mileti (Seção 3.4.3.3). Onde: CP é a Curva Personalizada para a região de estudo (Figura 5.27), e C<sub>D</sub> e C<sub>A</sub> são as Curvas Padrão de Mobilização do tipo “D” (Percepção: Baixa / Preparação Baixa) e “A” (Percepção: Alta / Preparação Alta), respectivamente (Tabela 3.8).
- F<sub>VP</sub> – Fração da população que evacua em veículos vs a pé [%]
- F<sub>M</sub> – Fração da população abaixo dos 65 anos com limitação de mobilidade [%]
- F<sub>M65</sub> – Fração da população acima dos 65 anos com limitação de mobilidade [%]
- H<sub>E</sub> – Hora de ocorrência do evento
- N<sub>I</sub> – Número de Iterações

Fonte: Própria do autor

### 5.3.4 Manipulação dos Cenários

Muitas simulações foram realizadas neste estudo, sendo a avaliação dos resultados composta de muitos cruzamentos entre os eventos hidráulicos e os cenários de simulação de perda de vida. Um esquema dos resultados das modelagens de perda de vida gerados é apresentado na Figura 5.30.

Figura 5.30 – Esquema dos resultados gerados da modelagem de perda de vida



Fonte: Própria do autor

Os eventos hidráulicos representam os resultados das modelagens hidrodinâmicas referentes a cada uma das brechas de ruptura associadas as probabilidades de excedência selecionadas e a avaliação determinística. A análise de sensibilidade do modelo de perda de vida, por sua vez, se baseou na variação de apenas um dado de entrada e fixação dos demais, conforme proposição inicial do Cenário Base. O cruzamento entre todas informações gerou um total de 84 simulações no modelo HEC-LifeSim.

A Seção 6 subsequente apresenta os principais resultados dos parâmetros hidráulicos de cada evento simulado de ruptura hipotética. Da mesma forma, são também apresentados os principais resultados de fatalidades proveniente do cruzamento dos cenários de modelagem de perda de vida com os eventos hidráulicos avaliados.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo é dividido em seis partes: (i) sendo a primeira referente a apresentação dos parâmetros de brechas associados a probabilidade de excedência (Seção 6.1); (ii) a segunda referente aos resultados da modelagem hidráulica obtidos para a Barragem Sul (Seção 6.2); (iii) a terceira referente aos resultados da análise de vulnerabilidade e exposição da população em risco a jusante (Seção 6.3); (iv) a quarta referente aos resultados obtidos da aplicação dos modelos de perda de vida humana (Seção 6.3); (v) a quinta referente as conclusões das análises de sensibilidade dos parâmetros conduzidas para os modelos (Seção 6.5); (vi) e a sexta e última parte referente a discussão dos resultados obtidos (Seção 6.6).

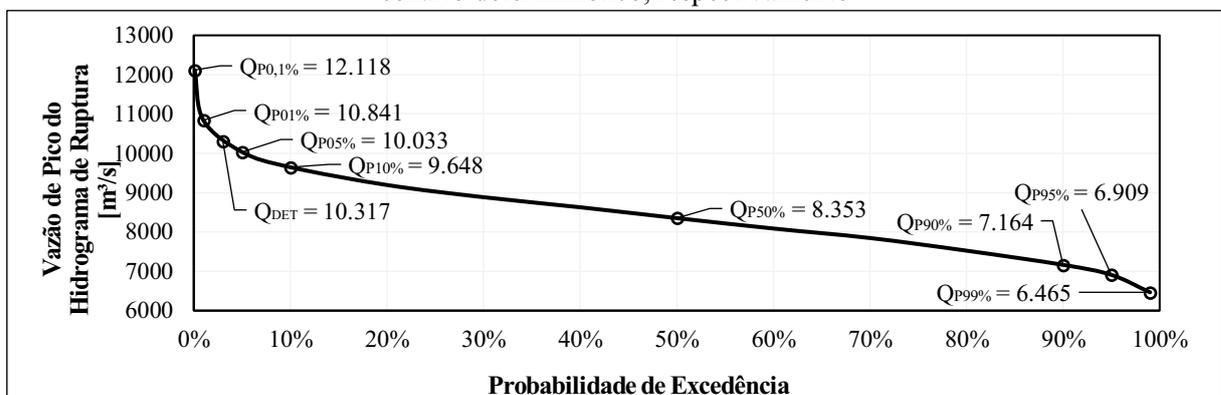
### 6.1 PARÂMETROS DE BRECHAS ASSOCIADOS A PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA

Os resultados das vazões de pico, parâmetros de brechas e hidrogramas de saída obtidos com o modelo hidráulico truncado, em associação com controle externo do MCBreach, são apresentados na sequência, da Seção 6.1.1 a Seção 6.1.3.

#### 6.1.1 Resultados das Vazões de Pico associados as Probabilidades de Excedência

A partir do número total das amostras conduzidas no modelo MCBreach, foram inferidas as probabilidades de excedência a partir da avaliação da curva de frequência dos resultados obtidos, conforme ilustrado na Figura 6.1. A vazão de pico obtida pelo método determinístico é também representada na curva de frequência, de modo a comparar os resultados.

Figura 6.1 – Curva de frequência das vazões de pico dos hidrogramas resultantes do MCBreach, onde, P99%, P95%, P90%, P50%, P10%, P05%, P01%, P0.1% e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 95%, 90%, 50%, 10%, 5%, 1% e 0,1% e para o cenário determinístico, respectivamente



Fonte: Própria do autor

Da mesma forma, os resultados das vazões de pico calculadas pelo processo de amostragem probabilística da ferramenta MCBreach são resumidos numericamente na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resumo das vazões de pico e dos parâmetros de brecha associados aos hidrogramas resultantes do MCBreach

<b>Probabilidade de Excedência</b>	<b>99%</b>	<b>90%</b>	<b>50%</b>	<b>10%</b>	<b>1%</b>	<b>Determinístico</b>
Vazão de Pico (m <sup>3</sup> /s)	6.465	7.164	8.353	9.648	10.841	10.317
Iteração	8.746	9.973	6.948	5.277	5.513	-
Elevação Inferior do Fundo (m)	366,15	366,62	366,63	366,38	366,36	366,00
Largura Final do Fundo (m)	76,50	80,04	85,80	91,35	85,27	100,00
Declividade Lateral Esquerda (H/V)	0,50	0,37	0,93	0,68	0,03	0,42
Declividade Lateral Direita (H/V)	0,06	0,01	0,10	0,38	0,91	0,42
Tempo de Formação (h)	1,30	1,37	0,97	0,59	0,53	0,98
Coefficiente de Descarga - Brecha	1,21	1,60	1,38	1,40	1,77	1,80
Progressão de Desenvolvimento	Senoidal	Linear	Senoidal	Senoidal	Senoidal	Linear
Coefficiente de Descarga - <i>Piping</i>	0,55	0,56	0,53	0,58	0,53	0,60
Elevação de Início do <i>Piping</i> (m)	368,40	368,38	368,38	367,77	367,56	367,00

Fonte: Própria do autor

Os resultados obtidos, admitindo-se as incertezas associadas as estimativas dos parâmetros de brecha de ruptura, indicam uma probabilidade de excedência de 1% para geração de um hidrograma de ruptura com vazão de pico superior a 10.841 m<sup>3</sup>/s. Da mesma forma, uma vazão de pico de 8.345 m<sup>3</sup>/s tem uma probabilidade de 50% de ser superada e uma vazão de pico de 6.465 m<sup>3</sup>/s tem 99% de probabilidade de excedência. O valor máximo observado foi de 13.328 m<sup>3</sup>/s e o mínimo foi de 5.709 m<sup>3</sup>/s.

Em relação ao resultado da metodologia determinística, o pico de vazão resultante foi de 10.317 m<sup>3</sup>/s. Comparativamente aos resultados probabilísticos, a vazão de pico estaria associada a uma probabilidade de excedência de aproximadamente 3%, indicando um resultado conservador de aplicação da referida metodologia.

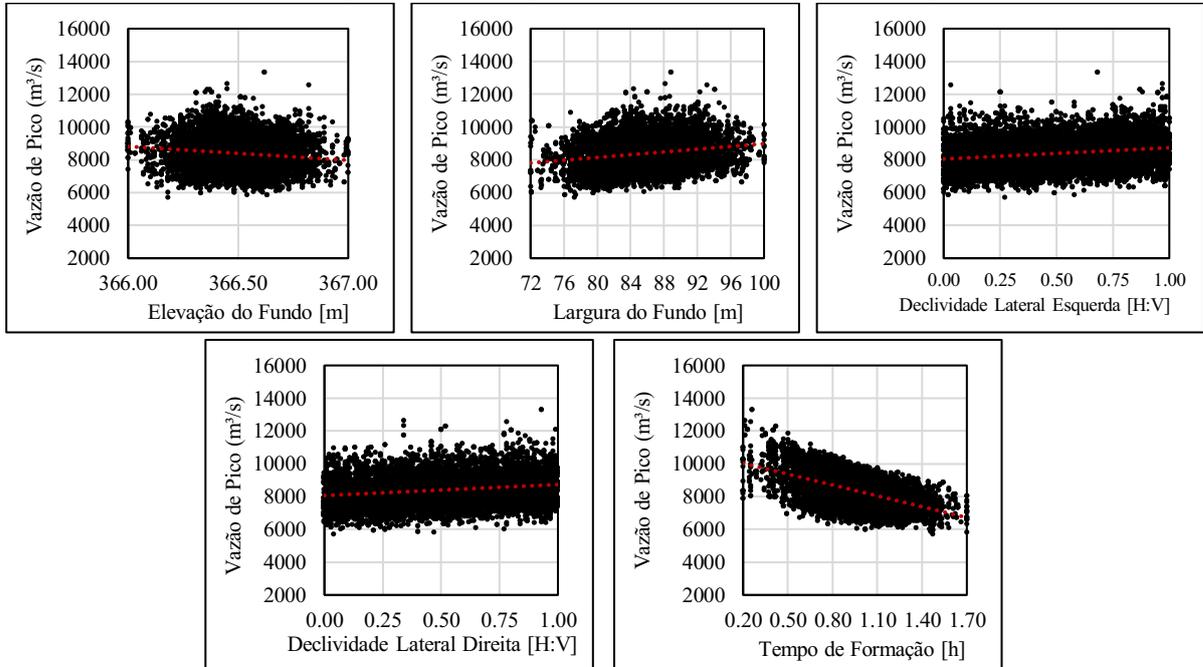
Nesse contexto, a análise probabilística apresenta como principal vantagem o estabelecimento de probabilidades de excedência, permitindo a comunicação das incertezas associadas aos parâmetros de brecha como um dos resultados do estudo de ruptura hipotética.

### **6.1.2 Relação entre os Parâmetros de Brecha de Ruptura, Vazão de Pico dos Hidrogramas e Avaliação do Índice ER/Hw**

A fim de se verificar as tendências entre os parâmetros de brecha de ruptura amostrados e as vazões de pico dos hidrogramas, apresenta-se na Figura 6.4 uma análise gráfica de dispersão dos valores de vazão de pico e os diferentes valores dos parâmetros de brecha.

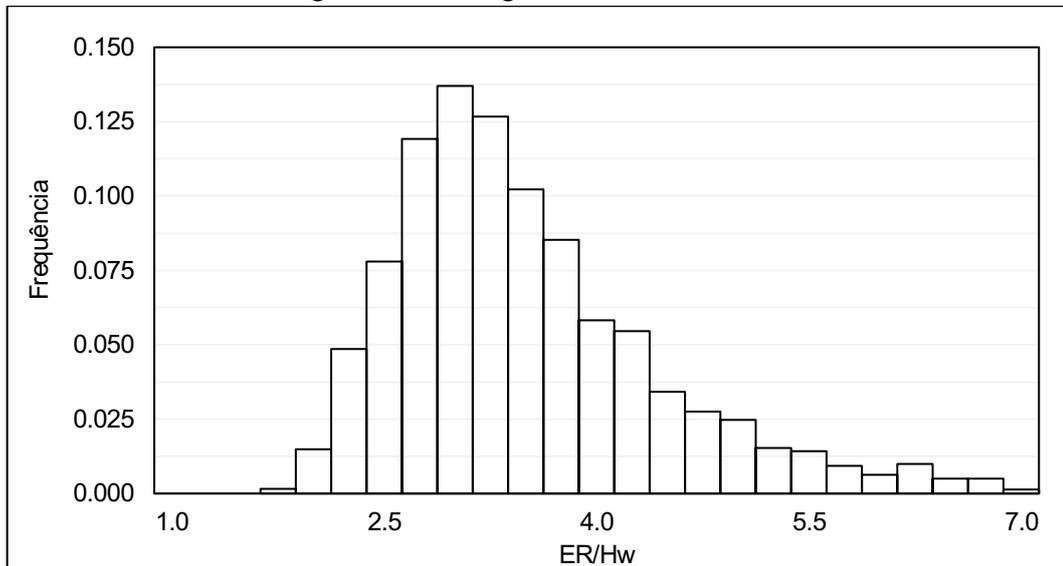
Complementarmente a análise, apresenta-se na Figura 6.3 a distribuição de frequência do índice ER/Hw, que representa a taxa de erosão linear do corpo do barramento (ER) dividido pela carga hidráulica acima do fundo da brecha (Hw).

Figura 6.2 – Gráfico de dispersão entre os parâmetros de brecha e vazões de pico dos hidrogramas



Fonte: Própria do autor

Figura 6.3 – Histograma do índice ER/Hw



Fonte: Própria do autor

Os gráficos de dispersão demonstram que a vazão de pico apresenta uma relação de tendência negativa com a cota de fundo e o tempo de formação da brecha. Já a relação de

tendência com a largura de fundo e declividade da parede lateral é positiva. Observa-se, ainda, que o tempo de formação da brecha foi o parâmetro que apresentou maior tendência de relação, seguido pela largura de fundo da brecha.

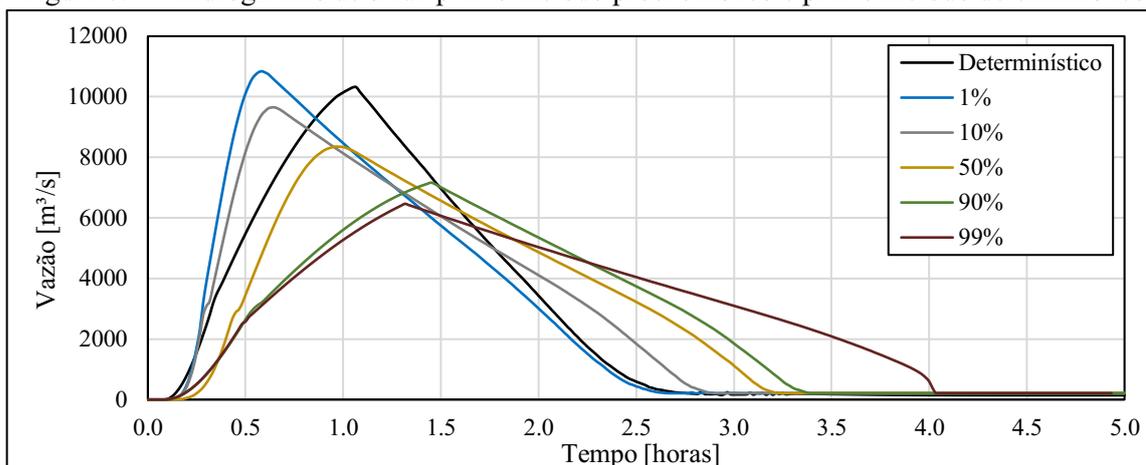
Quanto aos resultados dos valores de  $ER/H_w$ , a maior parte das brechas de ruptura estabelecidas apresentaram valores de  $ER/H_w$  entre 2,5 e 4,0. Segundo Von Thun e Gillette (1990), o atendimento do índice  $ER/H_w$  no intervalo de 1,6 até 21 garante que a brecha está sendo representada coerentemente.

Nesse contexto, o índice  $ER/H_w$  da abordagem determinística igual a 4,50 encontra-se dentro do limite sugerido para uma representação coerente. O valor representa uma condição menos célere de formação da brecha de ruptura, quando comparado aos eventos com probabilidade de excedência de 5% ( $ER/H_w = 2,52$ ) e de 1% ( $ER/H_w = 3,77$ ).

### 6.1.3 Hidrogramas Completos

A Figura 6.4 ilustra os hidrogramas completos de saída das brechas calculadas para os cenários de ruptura da Barragem Sul por mecanismo de *piping*, descrito na Seção 5.1 Os hidrogramas extraídos do processo de amostragem de Monte Carlo, pelo controlador MCBreach, estão associados a probabilidades de excedência 99%, 90%, 50%, 10% e 1%. O hidrograma resultante dos parâmetros de brecha do método determinístico encontra-se também representado.

Figura 6.4 – Hidrogramas de saída para o método probabilístico e para o método determinístico



Fonte: Própria do autor

Observa-se que além da variável da vazão de pico, os parâmetros de formação de brecha apresentam grande impacto na formatação dos hidrogramas completos de ruptura. Aspectos

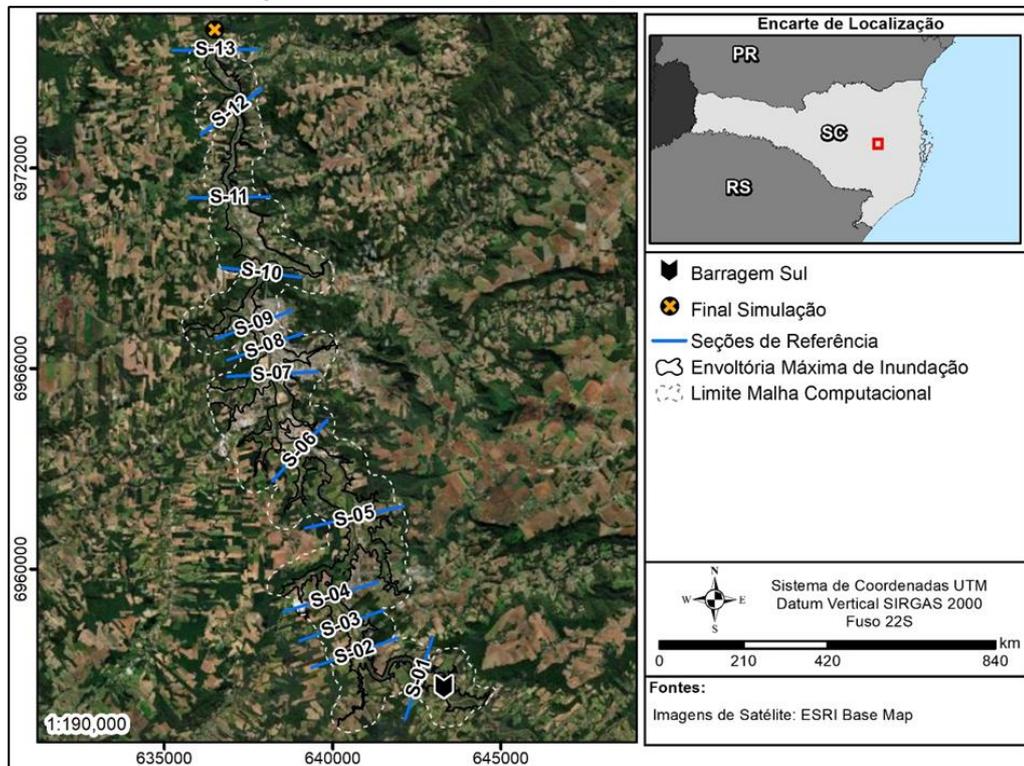
como o volume defluente e os tempos de base, ascensão e recessão apresentam sensibilidade nos efeitos de inundação a jusante. De modo geral, verifica-se que os tempos de chegada da inundação no vale a jusante são influenciados pelo tempo de pico dos hidrogramas. Da mesma forma, a duração da inundação e a extensão da mancha são influenciadas pelo tempo de base do hidrograma de ruptura e as profundidades e velocidades máximas de inundação são influenciadas pelo volume e pela vazão de pico dos hidrogramas de ruptura.

Os hidrogramas de saída obtidos demonstram também uma tendência de comportamento em relação a probabilidade de excedência. Os hidrogramas com maior vazão de pico e, portanto, menor probabilidade de excedência, apresentaram formatação mais alongada. A medida em que a vazão de pico decresce, e a probabilidade de excedência aumenta, verifica-se uma tendência de achatamento no formato dos hidrogramas.

## 6.2 MODELAGEM HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Os resultados da modelagem hidráulica referem-se à apresentação (i) das variáveis hidráulicas máximas decorrentes nas seções de referência; e (ii) do mapeamento dos parâmetros da inundação potencial. A Figura 6.5 apresenta a localização das seções de referência, estabelecidas na Seção 5.2.5, para a análise dos resultados da modelagem.

Figura 6.5 – Localização das seções de referência



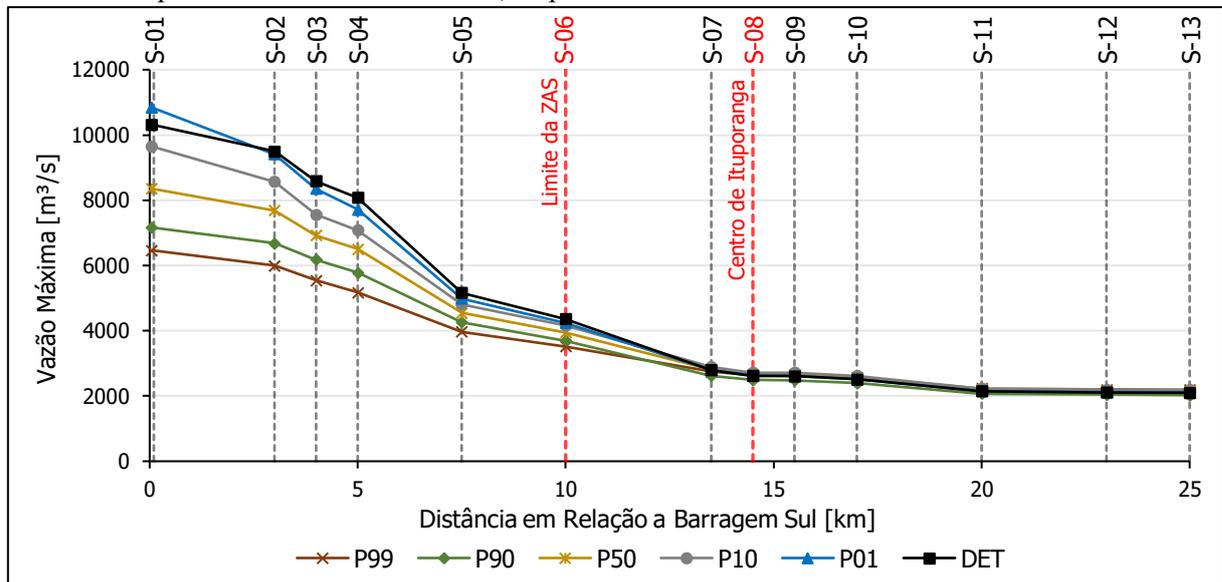
Fonte: Própria do autor

A Figura 6.6 apresenta as vazões máximas de inundação em cada uma das seções transversais de referência do vale a jusante. É possível observar o amortecimento das vazões de pico com o aumento da distância percorrida pela frente de onda. Especialmente até o limite da ZAS, verifica-se que os cenários de menor probabilidade de excedência e o cenário determinístico apresentam as maiores vazões de pico e, também, os maiores efeitos de amortecimento.

Observa-se também que significativa parte do efeito de amortecimento da vazão máxima da onda de cheia ocorre na distância percorrida até o início do centro da cidade de Ituporanga, na Seção S-07, distante cerca de 14 km da Barragem Sul.

A partir da Seção S-07, observa-se uma alteração do comportamento das vazões máximas. Os cenários com maior probabilidade de excedência, caracterizados por hidrogramas mais alongados (maior tempo de base) e menor vazão de pico, apresentaram capacidade ligeiramente superior de sustentação das vazões máximas a jusante.

Figura 6.6 – Vazões máximas para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.

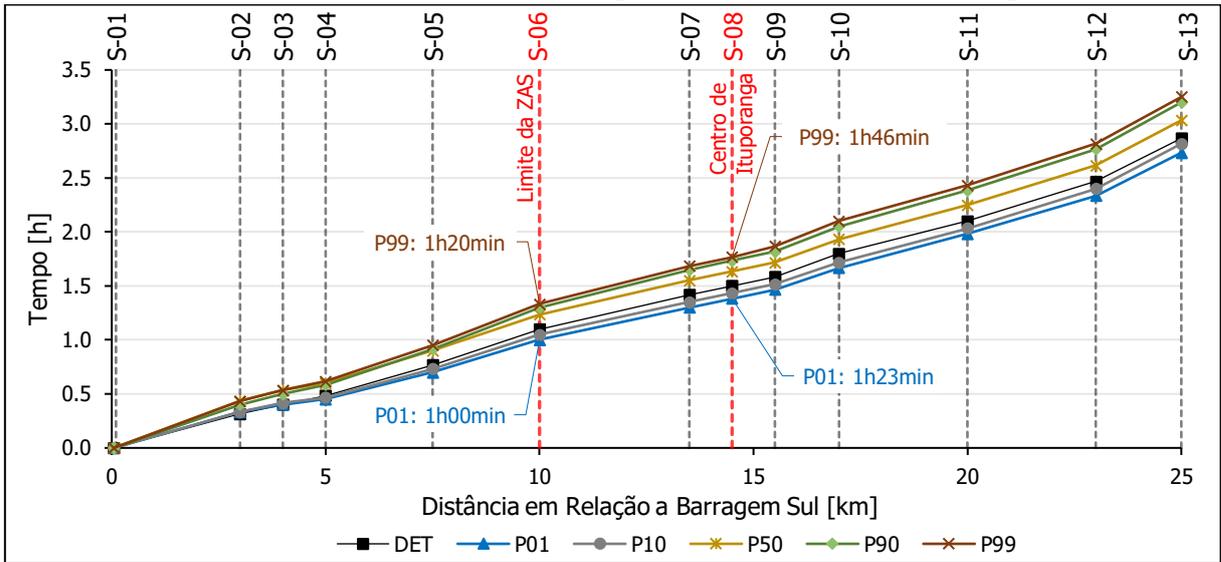


Fonte: Própria do autor

A Figura 6.7 apresenta o tempo de chegada e a Figura 6.8 o tempo para vazão máxima para cada uma das seções de referência a jusante da Barragem Sul. Para o pior cenário, referente a probabilidade de excedência de 1% (P01%), o tempo de chegada à seção localizada no centro da cidade de Ituporanga (S-08) é de 1h23min e o tempo para vazão máxima na mesma seção é

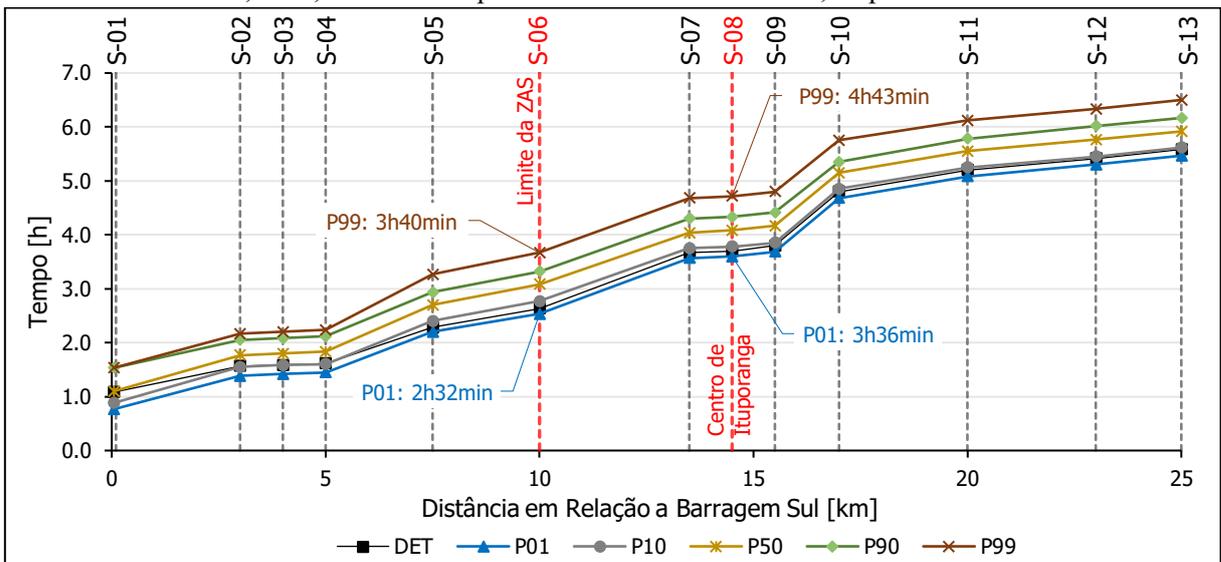
de 3h36min. Para o Cenário Determinístico (DET), o tempo de chegada à Seção S-08 é de 1h30min e o tempo para vazão máxima na mesma seção é de 3h42min . Por fim, para o cenário de menor magnitude avaliado, referente a probabilidade de excedência de 99% (P99%), tempo de chegada à Seção S-08 é de 1h46min e o tempo para vazão máxima na mesma seção é de 4h43min.

Figura 6.7 – Tempo de chegada da frente de onda (0,30 m) para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.



Fonte: Própria do autor

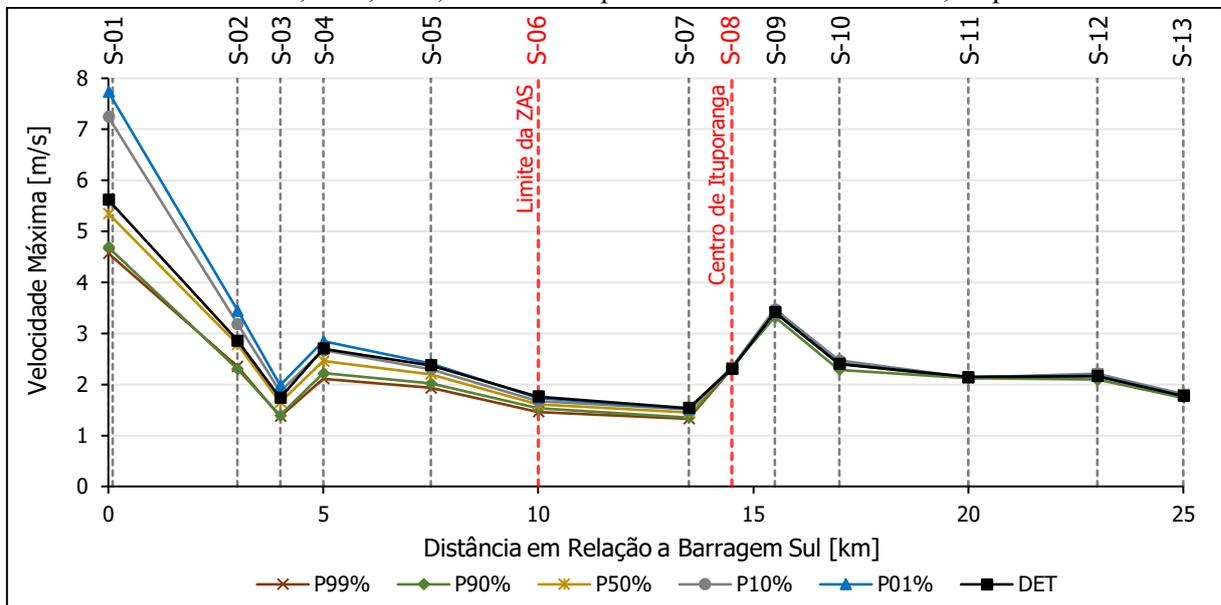
Figura 6.8 – Tempo para vazão máxima nas seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.



Fonte: Própria do autor

A Figura 6.9 apresenta as velocidades máximas atingidas pelo escoamento em cada uma das seções de referência do vale a jusante. Observa-se a tendência geral de redução da velocidade máxima atingida na seção transversal com o aumento da distância percorrida pela onda de inundação, devido ao efeito de amortecimento na propagação da onda. Destaca-se ainda o fenômeno de aumento da velocidade do escoamento próximos as seções S-04 e S-09, decorrente da configuração topográfica de encaixe do leito do rio, configurando um efeito de contração do escoamento que conduz aos efeitos observados.

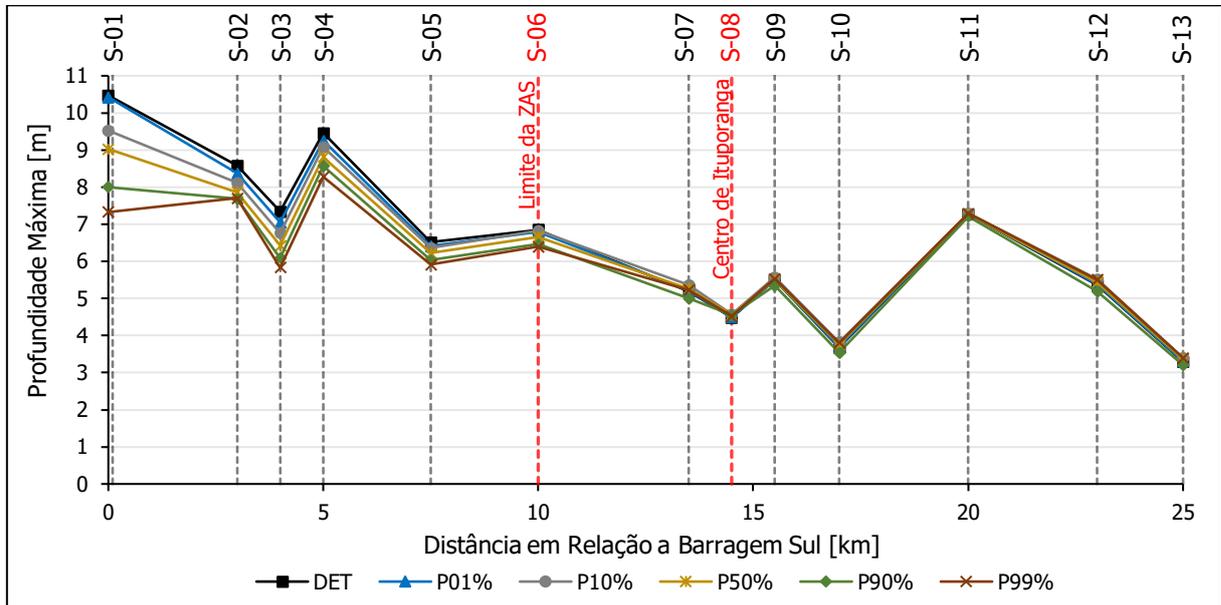
Figura 6.9 – Velocidade máxima do escoamento para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.



Fonte: Própria do autor

A Figura 6.10 apresenta as profundidades máximas atingidas pelo escoamento em cada uma das seções transversais de interesse do vale a jusante. Observa-se a tendência geral de redução da profundidade máxima atingida na seção transversal com o aumento da distância percorrida pela onda de inundação, devido aos efeitos de amortecimento. Próximos as seções S-04 e S-09, locais de ocorrência de contração do escoamento em função da configuração encaixada do vale, verifica-se também a ocorrência de aumento das profundidades máximas.

Figura 6.10 – Profundidade máxima do escoamento para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10%, 1% e para o cenário determinístico, respectivamente.



Fonte: Própria do autor

A Tabela 6.2 apresenta um resumo dos resultados da modelagem para as seções de referência, descrevendo numericamente os resultados gráficos acima apresentados.

Por fim, como mapeamento dos resultados do estudo de ruptura hipotética da Barragem Sul foi gerado o Mapa de Envoltórias Máximas (Figura 6.11), contendo os resultados integrados dos cenários probabilísticos e do cenário determinístico.

Tabela 6.2 – Resultados da modelagem hidráulica para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente

Seção	Distância da Barragem [km]	Vazão de Pico [m³/s]						Elevação Máxima [m]						Profundidade Máxima [m]					
		P99%	P90%	P50%	P10%	P01%	DET	P99%	P90%	P50%	P10%	P01%	DET	P99%	P90%	P50%	P10%	P01%	DET
S-01	0,0	6.465	7.164	8.353	9.648	10.841	10.317	383,96	384,83	386,18	386,90	388,23	388,27	7,33	8,00	9,03	9,52	10,42	10,47
S-02	3,0	5.996	6.674	7.686	8.572	9.412	9.498	378,61	379,04	379,39	379,73	380,01	380,28	7,70	7,68	7,87	8,11	8,37	8,58
S-03	4,0	5.539	6.182	6.921	7.558	8.348	8.582	378,46	378,92	379,29	379,64	379,96	380,25	5,83	6,09	6,43	6,76	7,05	7,34
S-04	5,0	5.173	5.777	6.503	7.075	7.720	8.076	378,05	378,48	378,83	379,16	379,46	379,73	8,28	8,57	8,81	9,08	9,25	9,46
S-05	7,5	3.967	4.260	4.546	4.814	4.987	5.165	375,11	375,29	375,57	375,78	375,85	375,96	5,91	6,03	6,22	6,36	6,41	6,51
S-06	10,0	3.515	3.691	3.949	4.165	4.243	4.359	373,27	373,33	373,62	373,80	373,77	373,82	6,40	6,46	6,66	6,82	6,80	6,85
S-07	13,5	2.744	2.622	2.815	2.890	2.795	2.793	369,42	369,17	369,46	369,55	369,40	369,39	5,23	5,00	5,27	5,36	5,21	5,20
S-08	14,5	2.635	2.486	2.661	2.721	2.625	2.619	368,47	368,19	368,51	368,61	368,45	368,44	4,51	4,55	4,55	4,57	4,49	4,48
S-09	15,5	2.630	2.480	2.654	2.714	2.619	2.613	364,77	364,58	364,78	364,85	364,74	364,73	5,54	5,35	5,50	5,57	5,51	5,50
S-10	17,0	2.567	2.392	2.571	2.621	2.522	2.514	358,58	358,23	358,52	358,59	358,42	358,40	3,80	3,54	3,76	3,82	3,69	3,68
S-11	20,0	2.224	2.069	2.196	2.231	2.153	2.145	357,15	356,77	357,07	357,16	356,97	356,95	7,28	7,21	7,27	7,29	7,29	7,27
S-12	23,0	2.194	2.036	2.162	2.197	2.118	2.109	354,41	354,06	354,35	354,42	354,25	354,23	5,51	5,19	5,44	5,52	5,38	5,36
S-13	25,0	2.184	2.025	2.151	2.187	2.107	2.099	349,18	348,99	349,14	349,19	349,09	349,08	3,40	3,20	3,36	3,40	3,30	3,29

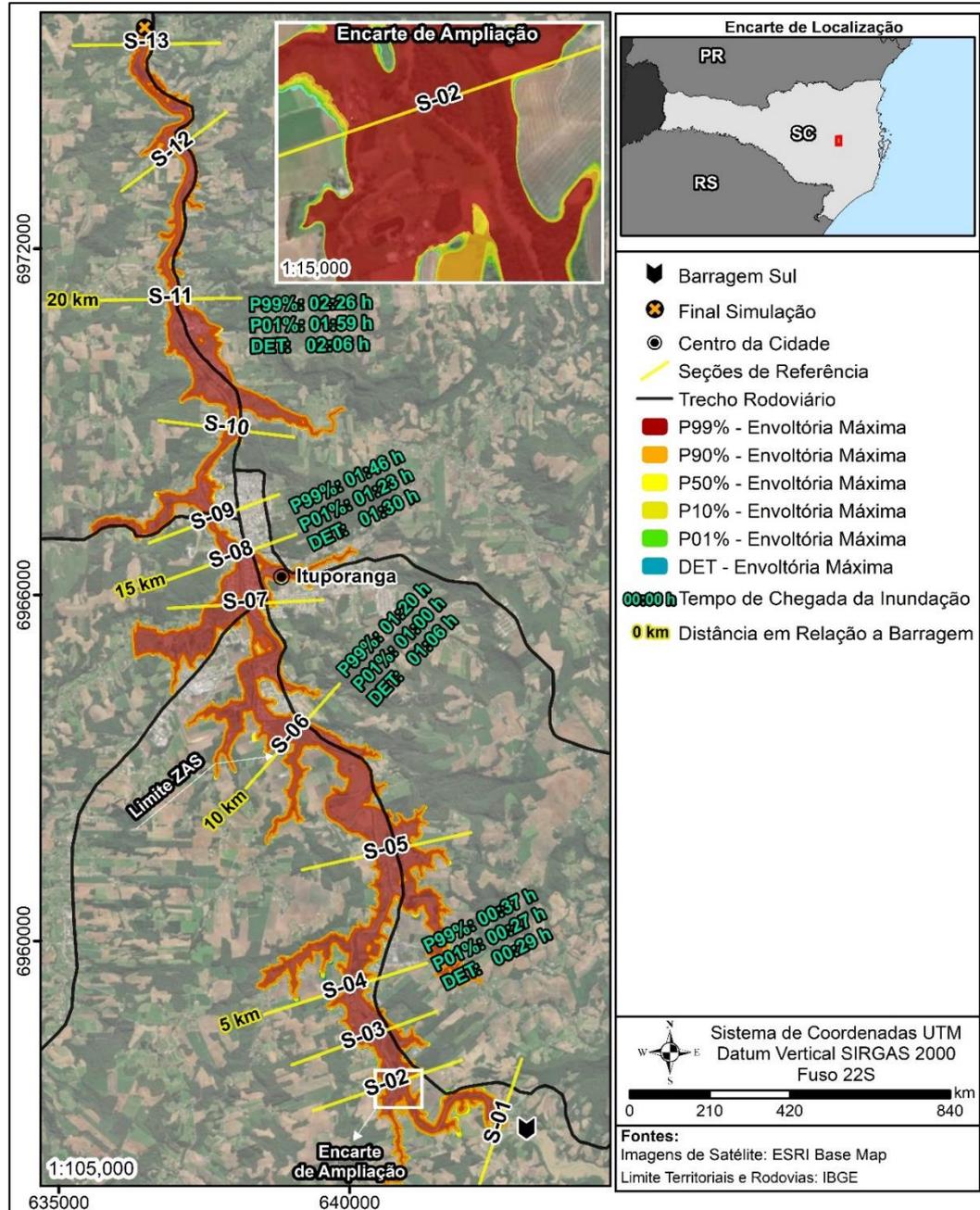
Fonte: Própria do autor

Tabela 6.3 – Resultados da modelagem hidráulica para as seções de referência S-01 a S-13, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente

Seção	Distância da Barragem [km]	Velocidade Máxima [m]						Tempo para 0,30 m de Inundação [hh:mm]						Tempo para Elevação Máxima de Inundação [hh:mm]					
		P99%	P90%	P50%	P10%	P01%	DET	P99%	P90%	P50%	P10%	P01%	DET	P99%	P90%	P50%	P10%	P01%	DET
S-01	0,0	4,57	4,69	5,35	7,24	7,73	5,61	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	01:32	01:32	01:06	00:53	00:46	01:05
S-02	3,0	2,35	2,30	2,78	3,18	3,44	2,86	00:26	00:24	00:26	00:20	00:20	00:19	02:10	02:03	01:46	01:33	01:23	01:34
S-03	4,0	1,38	1,39	1,65	1,86	1,98	1,74	00:32	00:30	00:32	00:25	00:24	00:24	02:12	02:05	01:48	01:35	01:25	01:35
S-04	5,0	2,11	2,22	2,45	2,67	2,84	2,70	00:37	00:35	00:36	00:28	00:27	00:29	02:14	02:07	01:50	01:36	01:27	01:37
S-05	7,5	1,93	2,02	2,20	2,30	2,40	2,38	00:57	00:55	00:54	00:44	00:42	00:46	03:16	02:56	02:42	02:24	02:12	02:17
S-06	10,0	1,46	1,53	1,61	1,68	1,73	1,76	01:20	01:18	01:14	01:03	01:00	01:06	03:40	03:19	03:05	02:46	02:32	02:38
S-07	13,5	1,33	1,35	1,45	1,51	1,52	1,53	01:41	01:39	01:33	01:21	01:18	01:25	04:41	04:18	04:02	03:45	03:34	03:40
S-08	14,5	2,31	2,34	2,33	2,33	2,31	2,30	01:46	01:44	01:38	01:26	01:23	01:30	04:43	04:20	04:05	03:47	03:36	03:42
S-09	15,5	3,42	3,32	3,42	3,47	3,42	3,41	01:52	01:49	01:43	01:31	01:28	01:35	04:48	04:25	04:10	03:51	03:41	03:48
S-10	17,0	2,41	2,28	2,42	2,47	2,40	2,40	02:06	02:03	01:56	01:43	01:40	01:48	05:45	05:21	05:09	04:51	04:41	04:48
S-11	20,0	2,12	2,11	2,13	2,14	2,14	2,14	02:26	02:23	02:15	02:02	01:59	02:06	06:07	05:47	05:33	05:15	05:05	05:12
S-12	23,0	2,20	2,09	2,18	2,21	2,17	2,16	02:49	02:46	02:37	02:24	02:20	02:28	06:20	06:01	05:46	05:27	05:18	05:25
S-13	25,0	1,80	1,74	1,79	1,80	1,77	1,77	03:15	03:12	03:02	02:49	02:44	02:52	06:30	06:10	05:55	05:37	05:28	05:35

Fonte: Própria do autor

Figura 6.11 – Envoltória máxima da inunda o associada a ruptura hipotética da Barragem Sul, onde: P99, P90, P50, P10, P01 e DET representam os resultados para os cenários com probabilidade de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e para o cenário determinístico, respectivamente



Fonte: Própria do autor

Sumariamente, verificam-se pequenas altera es incrementais da área inundada entre os resultados de envoltória máxima de inunda o dos cenários simulados. A condi o observada está associada aos hidrogramas de ruptura propostos, os quais também apresentam pequenas altera es incrementais de vazão de pico entre si. De forma a exemplificar, evidencia-se que a vazão do Cenário P99% ( $6.465 \text{ m}^3/\text{s}$ )   apenas 37% inferior em rela o ao Cenário

P01% (10.317 m<sup>3</sup>/s). Também, observa-se que a envoltória de ruptura para o cenário de menor magnitude avaliado (P99%) já apresenta condição de ocupação das regiões de planícies de inundação disponíveis no vale a jusante, assim, o incremento das áreas inundadas para os demais cenários refere-se à ocupação incremental de regiões encaixadas do vale.

Ainda, as alterações incrementais das áreas de inundação são maiores nos primeiros quilômetros a jusante da Barragem Sul, junto a Zona de Autossalvamento. Como pode-se observar nos resultados das seções transversais (Figura 6.6, Figura 6.9 e Figura 6.10), há uma tendência de amortecimento e convergência das vazões máximas e das variáveis hidráulicas (profundidade e velocidade) a medida em que ocorre a propagação da onda de ruptura para jusante. A partir da Seção S-07 (km 14), verifica-se que as vazões máximas nas seções e, portanto, as envoltórias máximas de inundação, apresentam condições quase equivalentes.

Contudo, é importante destacar que, apesar do baixo incremento da área de inundação, as variáveis hidráulicas do escoamento apresentam significativas diferenças, especialmente em relação aos tempos de chegada entre os cenários. Para a Seção S-08, no centro de Ituporanga, observa-se que o tempo de chegada para o cenário mais severo (P01%) é de 01h23min e o tempo de chegada para o cenário de menor magnitude (P99%) é de 01h46min, representando uma variação de 23 minutos. Da mesma forma, para a ocorrência das vazões máximas na Seção S-08, observa-se uma variação da ordem de 01h07min entre os cenários P01% (03h36min) e P99% (04h43min).

### 6.3 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE E EXPOSIÇÃO

Conforme metodologia descrita na Seção 5.3, apresentam-se os resultados obtidos da análise de vulnerabilidade e exposição da população em risco localizada a jusante da Barragem Sul. Objetivando-se a caracterização do inventário de estruturas e pessoas adotado como entrada no modelo HEC-LifeSim, descreve-se na sequência: (i) O quantitativo de estruturas residenciais e agrupamento na área de risco; (ii) A distribuição da população alocada em cada tipologia de estrutura em função do horário do dia e da faixa etária; (iii) A definição dos materiais construtivos das estruturas e (iv) As características do número de andares e altura da fundação das edificações. Destaca-se ainda, como premissa do presente estudo, que a avaliação de vulnerabilidade e exposição e, por consequência, a análise de perda de vida restringiu-se aos primeiros 16 km da simulação, compreendendo a região a jusante da Barragem Sul até o final da região central da cidade de Ituporanga, local de maior concentração populacional no

município. Da mesma forma, o recorte da avaliação espacial lateral guiou-se pelas células da grade estatística que compreendem a envoltória máxima de inundação dos cenários avaliados. Para elaboração da referida envoltória máxima, admitiu-se a união das manchas de todos os eventos simulados, uma vez que as mesmas apresentam incrementos de área em diferentes regiões do vale a jusante.

O quantitativo total de estruturas identificadas na região de impacto da onda de ruptura foi de 3.649 estruturas. O processo de classificação dos dados agregou as estruturas em duas principais categorias: (i) endereços domiciliares, com um total de 2.792 edificações; e (ii) endereços de agrupamentos e estabelecimentos, com total de 857 edificações. Para cada categoria foram ainda realizadas subclassificações com objetivo de caracterização da tipologia de ocupação. Em geral, observa-se uma predominância de domicílios residenciais na área atingida, seguido por estabelecimentos comerciais e estabelecimentos agropecuários. A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos na construção do inventário.

Tabela 6.4 – Quantitativo por tipologia de ocupação das estruturas identificadas no município e na região de impacto da onda de ruptura

<b>Categoria das Estruturas</b>	<b>Tipo de Ocupação (Código)<sup>12</sup></b>	<b>Estruturas no Município de Ituporanga<sup>13</sup></b>	<b>Estruturas na Região Atingida<sup>14</sup></b>	<b>Estruturas na Região Atingida em Relação ao Total no Município</b>
Residencial	Residências unifamiliares (RES1)	6.765	2.449	25%
	Residências multifamiliares (RES3)	518	343	3,6%
Agrupamentos e Estabelecimentos	Estabelecimentos Agropecuários (AGR1)	1.222	136	1,4%
	Estabelecimentos de Ensino (EDU1)	24	10	0,1%
	Estabelecimentos Comerciais (COM1)	1.057	695	7,2%
	Estabelecimentos de Saúde (COM2)	21	16	0,2%
<b>Total</b>		<b>9.607</b>	<b>3.649</b>	<b>38%</b>

Fonte: Própria do autor

<sup>12</sup> Código referente as tipologias de ocupação adotadas como entrada no *software* HEC-LifeSim, conforme estrutura proposta por USACE (2020b).

<sup>13</sup> Quantitativo obtido com a avaliação dos dados do CNEFE para o município de Ituporanga (IBGE, 2013a).

<sup>14</sup> Quantitativo obtido pelo limite das células da grade estatística que compreendem a envoltória máxima de inundação dos cenários avaliados.

Conforme descrito na Seção 5.3, para definição do número de pessoas presentes nas estruturas inseridas na região atingida pela mancha de inundação, uma avaliação previa da distribuição populacional total do município foi desenvolvida fundamentada na amostra de pessoas dos microdados do censo demográfico do IBGE de 2010. A Tabela 6.5 apresenta a distribuição esperada da população de todo o município para diferentes tipos de ocupação, períodos do dia e faixas etárias.

Tabela 6.5 – Quantitativo e distribuição populacional em função das tipologias de ocupação das estruturas no município de Ituporanga/SC

Categoria das Estruturas	Tipo de Ocupação (Código) <sup>12</sup>	População no Município do Ituporanga (Porcentagem em relação a população total do município)					
		Distribuição às 14h			Distribuição às 02h		
		< 65 anos	> 65 anos	Total	< 65 anos	> 65 anos	Total
Residencial <sup>15</sup>	Residências unifamiliares (RES1)	13.117 (59,0%)	1.474 (6,6%)	14.590 (65,6%)	20.381 (91,6%)	1.572 (7,1%)	21.952 (98,7%)
	Residências multifamiliares (RES3)						
Agrupamentos e Estabelecimentos	Estabelecimentos Agropecuários (AGR1)	1.077 (4,8%)	19 (0,1%)	1.096 (4,9%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
	Estabelecimentos de Ensino (EDU1)	1.341 (6,0%)	58 (0,3%)	1.400 (6,3%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
	Estabelecimentos Comerciais (COM1)	4.319 (19,4%)	21 (0,1%)	4.340 (19,5%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
	Estabelecimentos de Saúde (COM2)	83 (0,4%)	0 (0%)	83 (0,4%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
<b>Total</b>		19.937 (89,6%)	1.572 (7,1%)	21.509 (96,7%) <sup>16</sup>	20.381 (91,6%)	1.572 (7,1%)	21.952 (98,7%) <sup>17</sup>

Fonte: Própria do autor

Verificada a distribuição populacional para área total do município, conduziu-se a distribuição das proporções observadas no universo de dados (população de Ituporanga) para a amostra populacional objeto de estudo (população presente na região atingida pela inundação de ruptura da Barragem Sul). A avaliação do quantitativo admitiu a adoção da grade estatística

<sup>15</sup> Em função da resolução das informações disponíveis nos microdados do IBGE, não foi possível definir a divisão de distribuição da população entre residências unifamiliares e multifamiliares (casas/apartamentos).

<sup>16</sup> Os 3,3% restantes da população referem-se a parcela que não trabalha ou estuda no município de Ituporanga (IBGE, 2010b).

<sup>17</sup> O 1,3% restante da população referem-se a parcela da população que não retorna do trabalho para casa diariamente (IBGE, 2010b).

que intersecciona a envoltória máxima de inundação dos cenários como o limite da área avaliada. Os resultados agregados obtidos são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Quantitativo e distribuição populacional na região atingida pela inundação de ruptura da Barragem Sul

Categoria das Estruturas	Tipo de Ocupação (Código) <sup>12</sup>	Estruturas na Região Atingida	População na Região Atingida <sup>18</sup>					
			Distribuição às 14h			Distribuição às 02h		
			< 65 anos	> 65 anos	Total	< 65 anos	> 65 anos	Total
Residencial	Residências unifamiliares (RES1)	2.449	5.228	587	5.815	8.117	626	8.743
	Residências multifamiliares (RES3)	343						
Agrupamentos e Estabelecimentos	Estabelecimentos Agropecuários (AGR1)	136	136	2	138	0	0	0
	Estabelecimentos de Ensino (EDU1)	10	559	24	583	0	0	0
	Estabelecimentos Comerciais (COM1)	695	2.840	14	2.854	0	0	0
	Estabelecimentos de Saúde (COM2)	16	63	0	63	0	0	0
<b>Total</b>		<b>3.649</b>	<b>8.826</b>	<b>627</b>	<b>9.453</b>	<b>8.117</b>	<b>626</b>	<b>8.743</b>

Fonte: Própria do autor

A proporção esperada dos materiais construtivos das estruturas no município de Ituporanga e na região atingida, conforme apresentado na Tabela 6.7, foi avaliada com base nos dados da amostra de domicílios dos microdados do censo demográfico do IBGE de 2010. Destaca-se que para definição do material construtivo das estruturas de agrupamentos e estabelecimentos, dada a inexistência de informação na resolução de análise adotada no estudo, foi adotada a classificação de “Madeira” para os Estabelecimentos Agropecuários e “Alvenaria” para as demais construções.

<sup>18</sup> O valor populacional base da categoria estrutural residencial foi definido com as informações presentes na grade estatística (IBGE, 2016). Para definição da população presente na categoria de agrupamentos e estabelecimentos, considerou-se a distribuição da totalidade da população do município nas estruturas, conforme proporções definidas na Tabela 6.5 – Quantitativo e distribuição populacional em função das tipologias de ocupação das estruturas no município de Ituporanga/SC

Tabela 6.7 – Quantitativo e distribuição populacional em função das tipologias de ocupação das estruturas na região atingida pela inundação de ruptura da Barragem Sul

Categoria das Estruturas	Tipo de Ocupação (Código)	Proporção do Material de Construção Predominante das Estruturas no Município <sup>19</sup>		Estruturas na Região Atingida por Material de Construção Predominante	
		Alvenaria	Madeira	Alvenaria	Madeira
Residencial	Residências unifamiliares (RES1)	58%	42%	1.420	1.029
	Residências multifamiliares (RES3)	100%	0%	343	0
Agrupamentos e Estabelecimentos	Estabelecimentos Agropecuários (AGR1)	0%	100%	0	136
	Estabelecimentos de Ensino (EDU1)			10	0
	Estabelecimentos Comerciais (COM1)	100%	0%	695	0
	Estabelecimentos de Saúde (COM2)			16	0

Fonte: Própria do autor

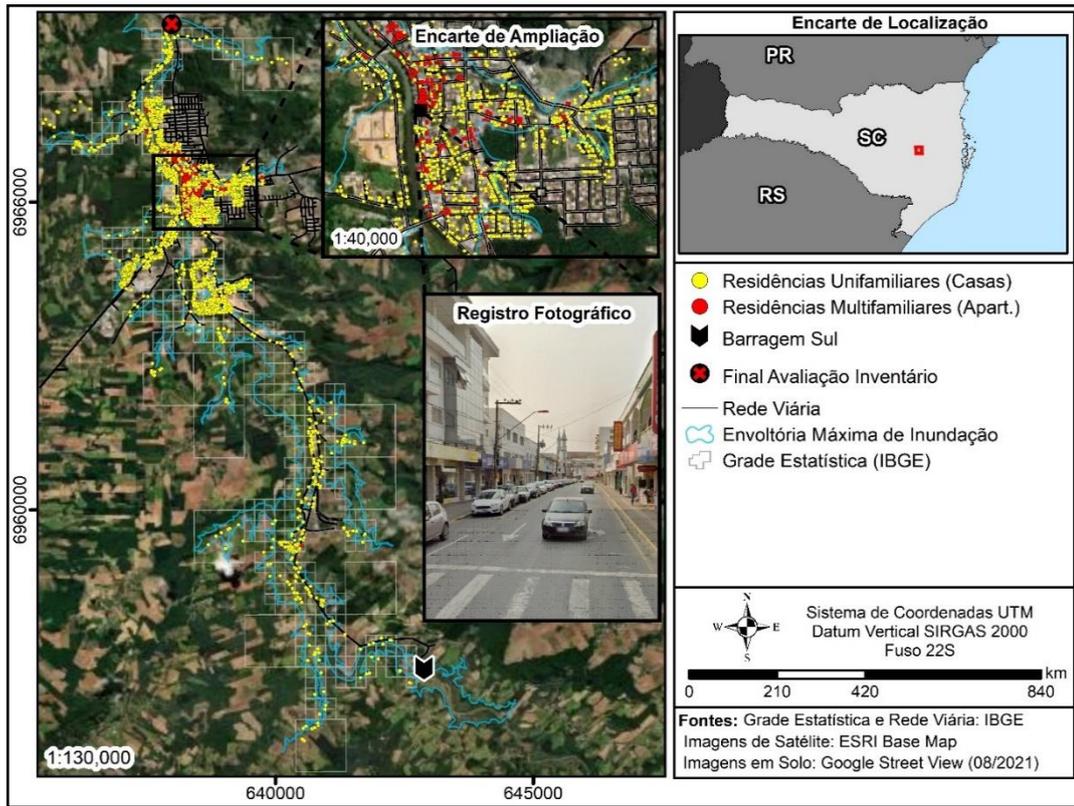
Quanto a caracterização do número de andares e altura da fundação das edificações<sup>20</sup>, em função da indisponibilidade de informações para a área de estudo, adotaram-se as seguintes premissas conservadoras: (i) As estruturas com tipo de ocupação “Residências multifamiliares” serão caracterizadas como construções de 2 andares e as demais estruturas serão caracterizadas como construções de 1 andar; (ii) A altura de fundação para todas as estruturas será considerada com o valor de 0,00 m, premissa conservadora em função da inexistência de dados do referido parâmetro.

Objetivando-se a ilustração dos resultados dos processos de distribuição uniforme e de seleção aleatória das variáveis estruturais e populacionais, apresenta-se na sequência o mapeamento das informações. A Figura 6.12 e Figura 6.13 apresentam a configuração locacional das estruturas das categorias avaliadas: (i) Residencial; e (ii) Agrupamentos e Estabelecimentos, respectivamente. De modo geral, observa-se uma alta concentração de estruturas comerciais e agrupamentos na região central da cidade. Em relação a distribuição de edificações residenciais, verifica-se uma distribuição com tendência mais uniforme ao longo da região avaliada, embora identifique-se também concentrações da categoria no centro urbano do município.

<sup>19</sup> Proporção obtida com a avaliação dos Microdados da Amostra de Domicílio de Censo de 2010 do município de Ituporanga (IBGE, 2010b).

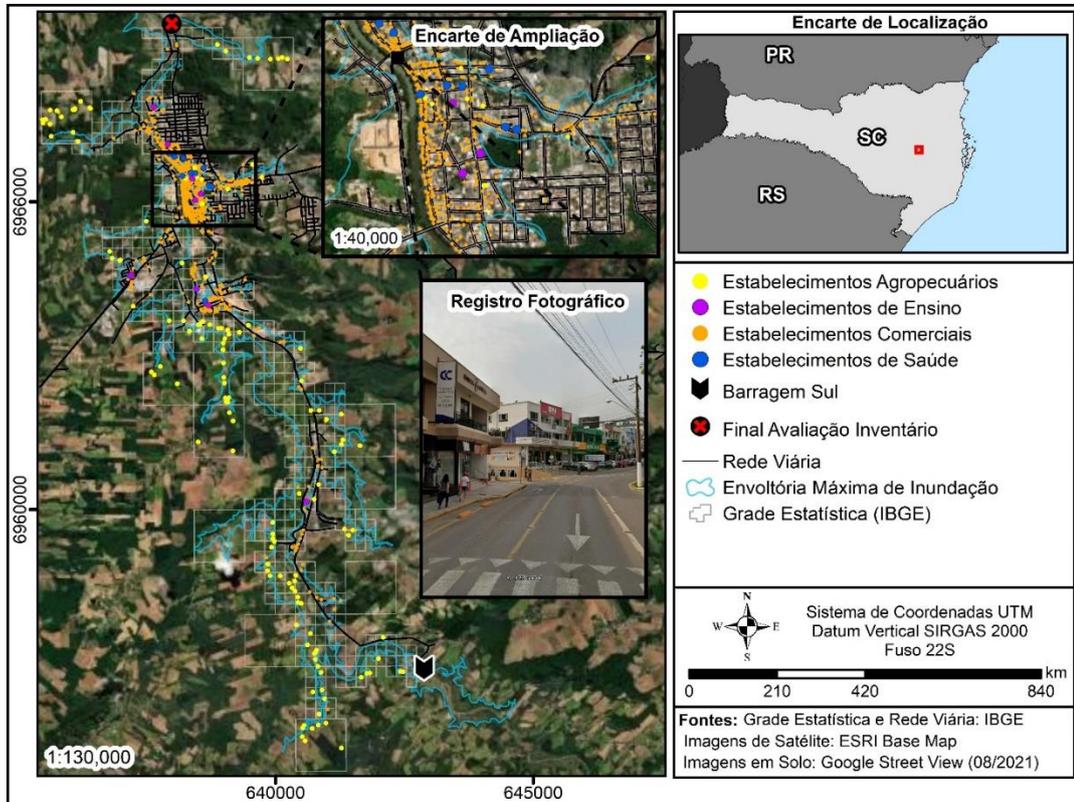
<sup>20</sup> Distância entre o nível do terreno e o nível do piso da estrutura.

Figura 6.12 – Localização das estruturas residenciais na região atingida



Fonte: Própria do autor

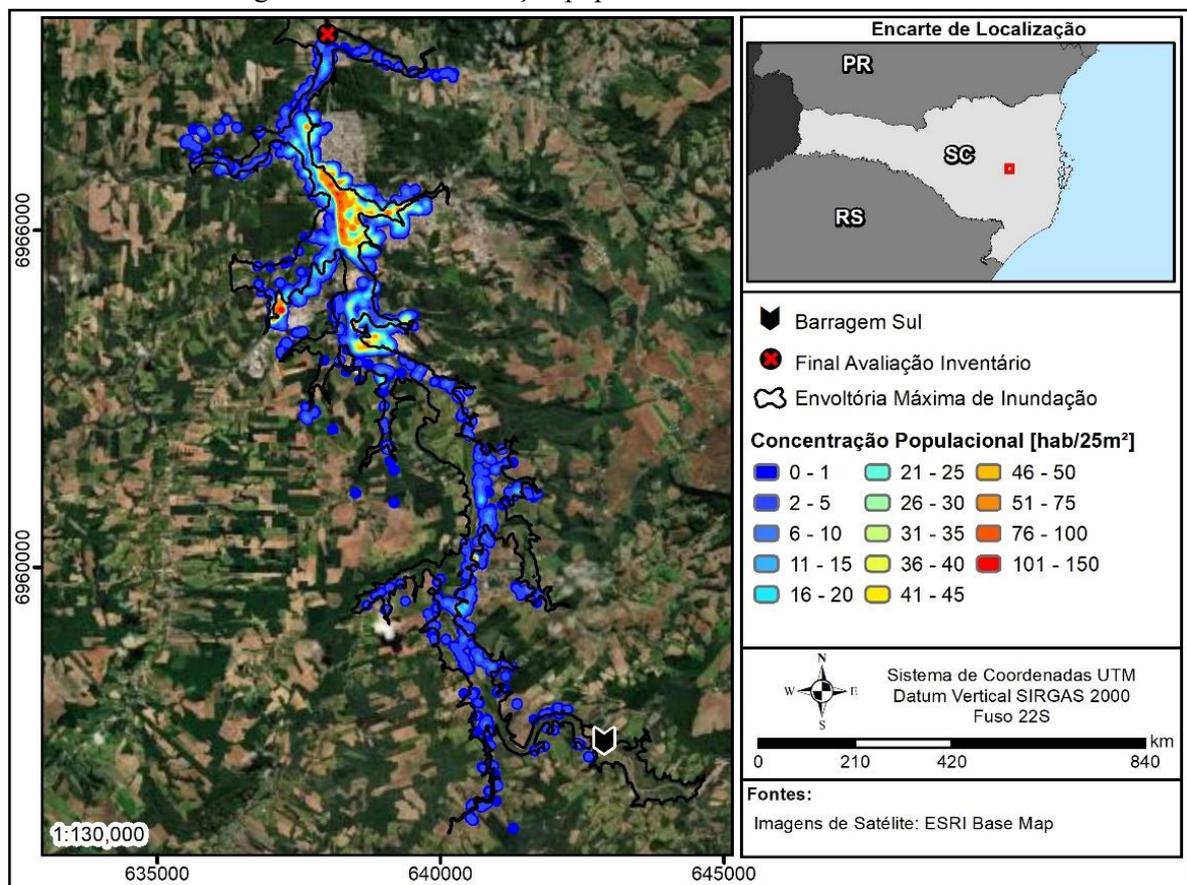
Figura 6.13 – Localização dos agrupamentos e estabelecimentos na região atingida



Fonte: Própria do autor

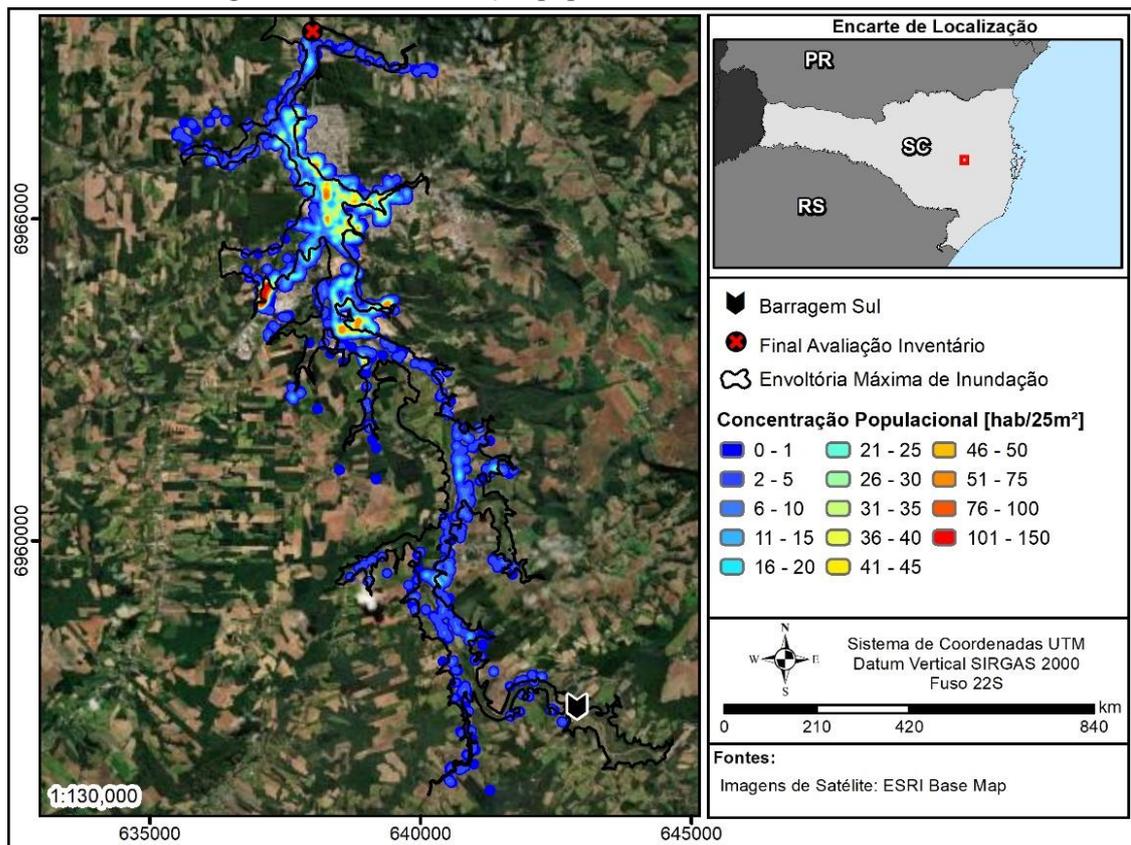
Por fim, apresenta-se na Figura 6.14 e Figura 6.15 os mapas de concentração populacional esperada nas estruturas residenciais e nos agrupamentos e estabelecimentos, respectivamente. Os resultados demonstram uma maior concentração populacional no centro do município no período da tarde (14h), fenômeno relacionado a concentração de estabelecimentos e a atividade laboral no centro da cidade. No período da noite (02h), verifica-se uma maior uniformidade de distribuição da população ao longo da região atingida, prevalecendo maiores concentrações populacionais em regiões de centros habitacionais e edificações.

Figura 6.14 – Concentração populacional nas estruturas às 14h



Fonte: Própria do autor

Figura 6.15 – Concentração populacional nas estruturas às 02h



Fonte: Própria do autor

#### 6.4 MODELAGEM DE PERDA DE VIDA

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento da modelagem de perda de vida no modelo HEC-LifeSim, conforme o cenário base de alerta e evacuação descrito na Seção 5.3.2 e os diferentes eventos de ruptura propostos.

Para cada um dos eventos simulados, associados aos hidrogramas com probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e ao hidrograma determinístico, é apresentado na Tabela 6.8 os valores dos quartis de fatalidades resultantes.

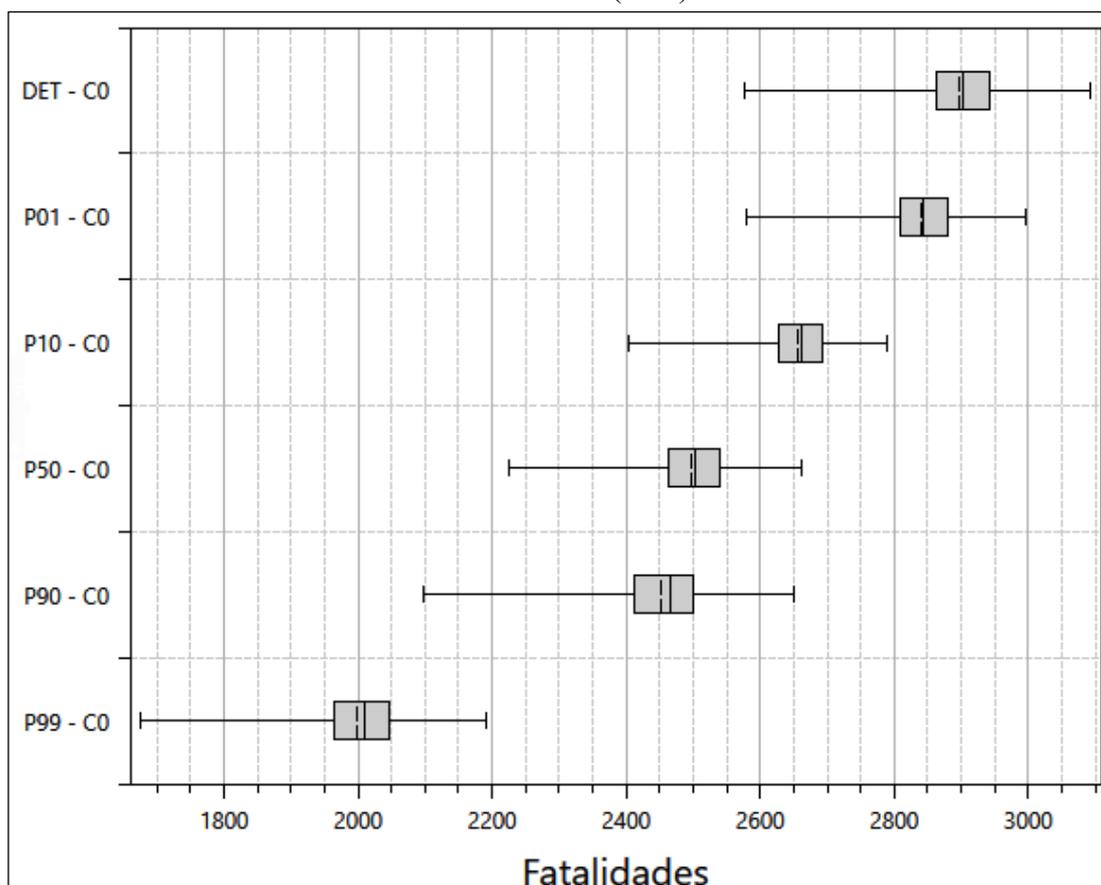
Tabela 6.8 – Quartis e médias de estimativa de perda de vidas para o Cenário Base (C0) com os eventos de probabilidades de excedência ( $P_E$ ) de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET)

Estimativa de Fatalidade (Quartis)	Evento					
	$P_{E99\%}$	$P_{E90\%}$	$P_{E50\%}$	$P_{E10\%}$	$P_{E01\%}$	DET
Menor	1.674	2.097	2.224	2.403	2.580	2.578
1º Quartil	1.964	2.413	2.464	2.629	2.809	2.862
Média	1.998	2.451	2.497	2.657	2.841	2.896
Mediana	2.010	2.467	2.502	2.662	2.844	2.904
3º Quartil	2.046	2.501	2.540	2.692	2.880	2.941
Maior	2.190	2.651	2.662	2.790	2.997	3.094

Fonte: Própria do autor

A Figura 6.16 ilustra graficamente os resultados de fatalidade em formato de diagrama de caixa<sup>21</sup>. Os resultados obtidos para os eventos com de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET) apresentaram fatalidades da ordem de 1.674 a 3.094.

Figura 6.16 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas do cenário Base Simulado (C0) com os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET)



Fonte: Própria do autor

O evento determinístico apresentou a amostra com maior número de fatalidades, com valor médio de 2.896 perdas de vida. Apesar do evento P01% apresentar maior vazão de pico de ruptura, observou-se que a formatação do hidrograma de ruptura do evento Determinístico resultou em maior capacidade de sustentação das vazões máximas a jusante e, portanto, maior

<sup>21</sup> O diagrama de caixa, também conhecido como diagrama de caixa e bigodes, exibe o resumo de cinco números de um conjunto de dados, composto pelo mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil, e máximo. No diagrama, uma caixa é representada limitando o intervalo do primeiro quartil ao terceiro quartil. Uma reta vertical passa pela caixa, indicando a mediana e outra reta pontilhada vertical representa o valor da média. Os “bigodes” saem de cada quartil para o valor mínimo e para o máximo da amostra

extensão da mancha junto a região de ZAS e do início do centro do município de Ituporanga. O efeito observado, contudo, levou apenas a um aumento da ordem de 2% da fatalidade média observada no evento P01%.

Verifica-se também a tendência de decréscimo do número de fatalidades em função do aumento da probabilidade de excedência dos eventos. Via de regra, com o aumento da probabilidade dos eventos, maiores são os tempos de chegada e menores são as extensões totais das envoltórias de rupturas e as magnitudes das variáveis hidráulicas do escoamento. Estes efeitos proporcionam maior tempo para sucessão dos eventos de alerta e mobilização, bem como implicam em um menor número de população em risco e em menor risco hidrodinâmico para as interações com o escoamento.

Contudo, mesmo para o evento P99%, observa-se ainda um alto número de ocorrência de fatalidades. Esta condição demonstra possíveis deficiências nos processos de alerta e evacuação. Para avaliação da condição, apresenta-se na Tabela 6.9 o detalhamento dos valores médios de população em risco, população alertada e mobilizada e ocorrência de fatalidades nos eventos avaliados para os eventos avaliados para o cenário base (C0).

Tabela 6.9 – Valores médios de população em risco alertada e mobilizada e de ocorrência de fatalidades para o Cenário Base (C0) com os eventos de probabilidades de excedência (PE) de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET)

Evento / Cenário	Estruturas atingidas	População em Risco				Fatalidades			Total
		Abaixo 65 anos	Acima 65 anos	Total Alertada	Total Mobilizada	Em Estruturas Abaixo 65 anos	Em Estruturas Acima 65 anos	Em Evacuação	
DET C0	2.399	5.875	394	2.870 (46%)	185 (3,0%)	2.688	189	19	2.896
P01 C0	2.382	5.834	393	2.506 (40%)	157 (2,5%)	2.638	186	17	2.841
P10 C0	2.325	5.720	383	2.645 (43%)	174 (2,8%)	2.462	174	20	2.657
P50 C0	2.296	5.654	376	3.065 (51%)	228 (3,8%)	2.312	161	24	2.497
P90 C0	2.291	5.644	375	3.678 (61%)	334 (5,5%)	2.258	157	36	2.451
P99 C0	2.173	5.378	358	3.754 (65%)	405 (7,1%)	1.825	130	43	1.998

Fonte: Própria do autor

Observa-se que o número de estruturas atingidas e a população em risco apresentam pequenas variações entre os eventos de ruptura. Esta condição está relacionada as pequenas alterações incrementais também observadas entre as envoltórias máximas de inundação dos eventos. Numericamente, o evento determinístico (DET) apresentou uma média de 2.399 estruturas atingidas e de 6.269 indivíduos em risco. Comparativamente ao evento P99%, o

resultado é 10% superior ao número médio de estruturas atingidas (2.173) e 9% superior ao número médio dos indivíduos em risco (5.736).

Em relação ao quantitativo de população alertada, observam-se ligeiras alterações entre os eventos. A taxa média da população total alertada cresce de 40%, no evento P01%, para 65% no evento P99%. O efeito está associado, principalmente, ao aumento do tempo de chegada para os eventos de maior probabilidade. Este acréscimo permite um maior intervalo para decorrência dos processos de identificação e comunicação da ameaça, emissão do alerta e difusão do alerta para população.

Verificando os quantitativos de população mobilizada, contudo, observa-se uma condição de baixa mobilização para todos os eventos simulados. Apesar de uma taxa média de população alertada de 40% a 65% entre os eventos, a taxa média de população mobilizada cresce de 2,5%, no evento P01% para apenas 7,1% no evento P99%. Os resultados apontam para uma possível deficiência no processo de mobilização e evacuação, a medida em que, para comunidades com boa preparação e percepção de risco, se esperaria um acompanhamento relativo do aumento das taxas de população alertada e população mobilizada.

Quanto as fatalidades observadas nos eventos do Cenário Base (C0), verifica-se uma relação de 46% entre a média de fatalidades e a média da população em risco para o evento DET. Para o evento P99%, esta relação reduz para 35%. Os eventos com maior probabilidade de excedência (PE) apresentam um menor número de fatalidades em estruturas e um maior número de fatalidades ocorridas no processo de evacuação, condição associada ao aumento das taxas médias de alerta e mobilização. Da mesma forma, os cenários com maior PE demonstram menor extensão total de mancha e inferior risco hidrodinâmico, levando a um menor número de interações com risco de fatalidade.

De modo geral, o aumento da probabilidade de excedência dos eventos está associado: (i) a diminuição do número de estruturas atingidas e da população total em risco; (ii) ao acréscimo dos tempos de chegada da onda de ruptura; (iii) a diminuição da extensão total da mancha de inundação e ao decréscimo do risco hidrodinâmico; (iv) ao aumento da população alertada e mobilizada; e (v) a diminuição do número total de fatalidades.

Em suma, os resultados obtidos demonstram uma necessidade de melhoria nas ações de preparação para o evento de ruptura Barragem Sul, com incremento da eficiência do sistema

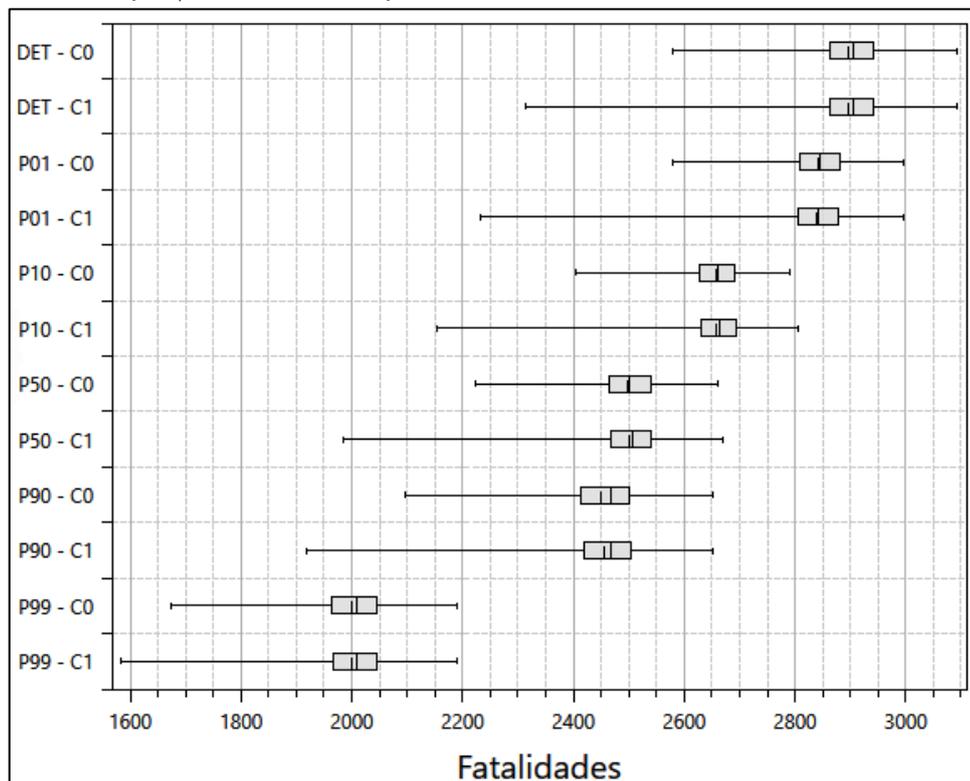
de alerta e das ações de mobilização, especialmente no que tange a percepção e a capacidade de resposta da população.

## 6.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os resultados das análises de sensibilidade, conduzidas para verificação das principais incertezas atribuídas aos parâmetros de entrada do modelo HEC-LifeSim, são apresentados na sequência, conforme metodologia proposta na Seção 5.3.3. Os resultados tabulares para todos os cenários e eventos são apresentados no **Apêndice E**.

A Figura 6.17 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0 e C1. O Cenário C1 objetivou verificar o impacto nos resultados de fatalidade devido a alteração do número de iterações do modelo HEC-LifeSim. Os resultados demonstraram que o aumento do número de 1.000 iterações para um valor de 5.000 iterações implica em uma diminuição dos valores mínimos de fatalidade amostrados para todos os eventos simulados. Os valores de quartis, médias e máximos, por outro lado, demonstram uma condição de convergência entre os dois cenários.

Figura 6.17 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Simulação | Número de Iterações: Cenário C0 = 1.000 e Cenário C1 = 5.000

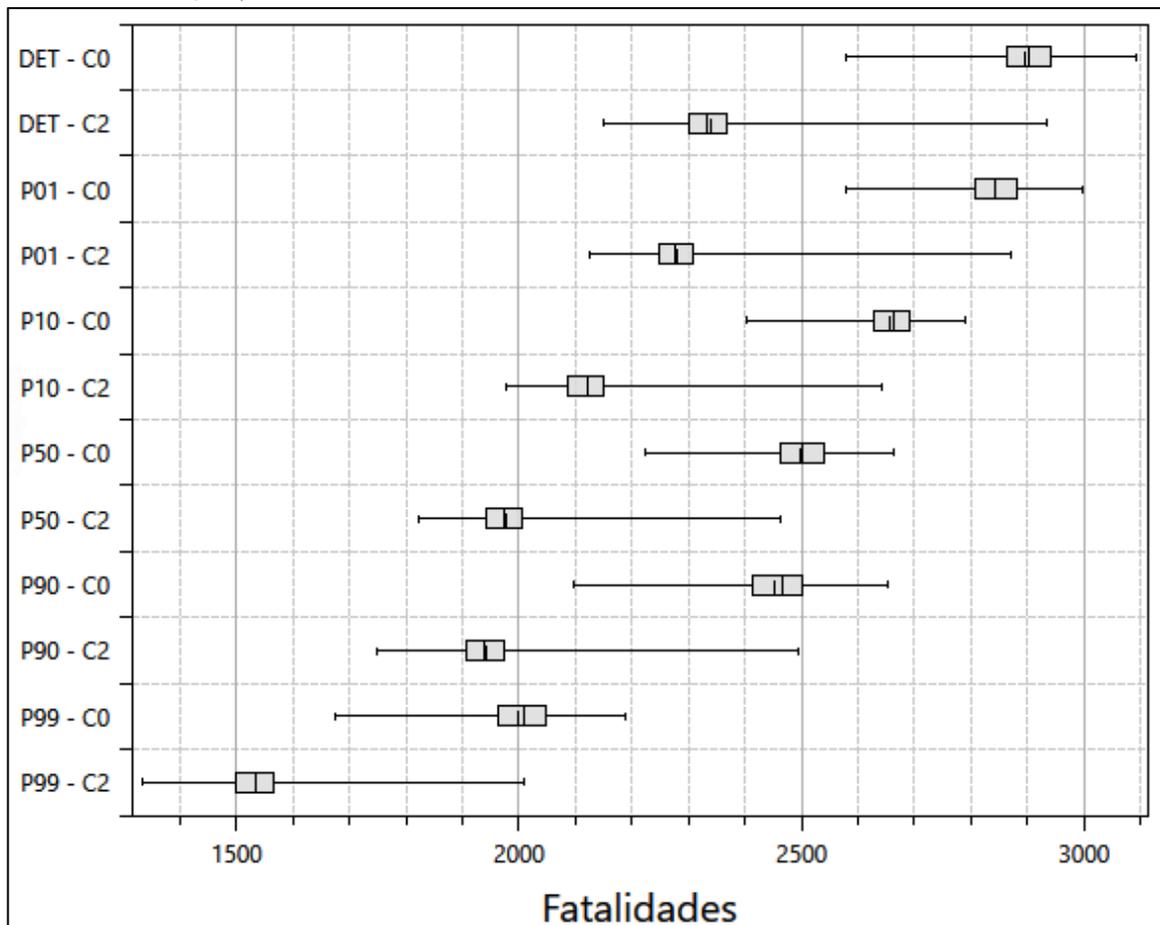


Fonte: Própria do autor

De modo geral, observa-se que um maior número de iterações implica na possibilidade de amostragem de parâmetros que levam a cenários com condições de menor severidade. Contudo, verifica-se que a ocorrência destes cenários é de baixa recorrência, de modo a não impactar nas estatísticas dos quartis.

A Figura 6.18 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0 e C2. O Cenário C2 objetivou verificar o impacto nos resultados de fatalidade devido a alteração da hora de ocorrência do evento para o período do dia oposto ao cenário base. Os resultados demonstraram que a ocorrência do evento no período noturno (02h00min) ocasiona uma diminuição das fatalidades médias amostradas para todos os eventos simulados. Para o Evento DET a média de fatalidades reduziu de 2.896 no Cenário Base C0 para 2.339 no Cenário C2. Para o Evento P99% a média de fatalidades reduziu de 1.998 no Cenário Base C0 para 1.534 no Cenário C2.

Figura 6.18 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Simulação | Hora de ocorrência do evento: Cenário C0 = 14h e Cenário C2 = 02h



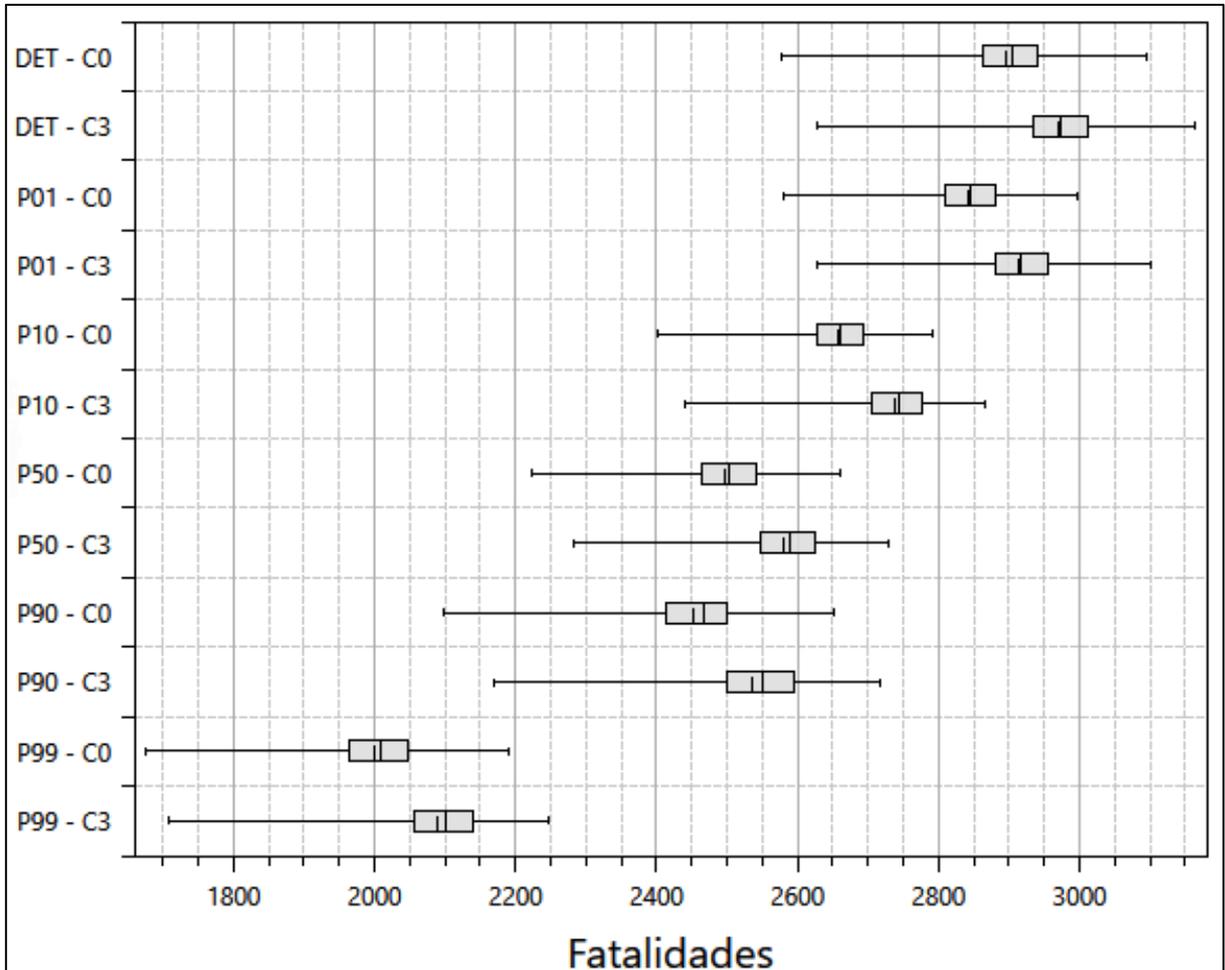
Fonte: Própria do autor

A troca do período de ocorrência do evento implica na alteração das curvas de difusão do alerta, com incremento no atraso de recebimento da informação. O efeito está relacionado a capacidade de recebimento do alerta pela população, que no período noturno encontra-se dormindo. Contudo, no presente estudo, é também importante atentar para a alteração da concentração populacional entre os períodos diurno e noturno. Conforme observa-se na Figura 6.14, no período diurno há maior concentração populacional no centro urbano de Ituporanga, condição que se alterna no período noturno (Figura 6.15), onde ocorre uma distribuição mais uniforme da população ao longo da extensão da mancha. Este fenômeno acaba por levar uma organização locacional favorável à redução de fatalidades, colocando-se a população mais próximo a regiões com maior tempo de chegada, maior proximidade dos pontos de encontro e menor risco hidrodinâmico. Da mesma forma, observa-se que parte da população no período noturno, que trabalha na região central do município, realoca-se para fora da região de risco (Tabela 6.6). Assim, o efeito que se verifica no Cenário C2 é uma redução do número médio de fatalidades no período noturno.

A Figura 6.19 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0 e C3. O Cenário C3 objetivou verificar o impacto nos resultados de fatalidade devido a alteração da fração da população abaixo e acima dos 65 anos com limitação de mobilidade. O Cenário Base C0 apresenta uma fração com limitação de mobilidade de 5,1% para a população abaixo dos 65 anos e de 22,6% para a população acima dos 65 anos. Para o Cenário C3, as frações alteram-se para 10% e 45% para a população abaixo dos 65 anos e acima dos 65 anos, respectivamente. Os resultados demonstraram que o aumento da fração da população com limitação de mobilidade ocasiona um aumento do número médio de fatalidades para todos os eventos simulados. Para o Evento DET, a média de fatalidades aumentou de 2.896 no Cenário Base C0 para 2.969 no Cenário C3. Para o Evento P99%, a média de fatalidades aumentou de 1.998 no Cenário Base C0 para 2.088 no Cenário C3.

A condição de limitação de mobilidade no modelo está relacionada a capacidade de evacuação vertical junto as estruturas inundadas. Em outros termos, os ocupantes com mobilidade reduzida apresentam limites inferiores de profundidade para se encontrarem em condições de risco dentro da estrutura. Os resultados do aumento de fatalidade, portanto, demonstram a ocorrência de um alto número de casos de não evacuação da população, indicando a necessidade de aprimoramento nos processos de mobilização.

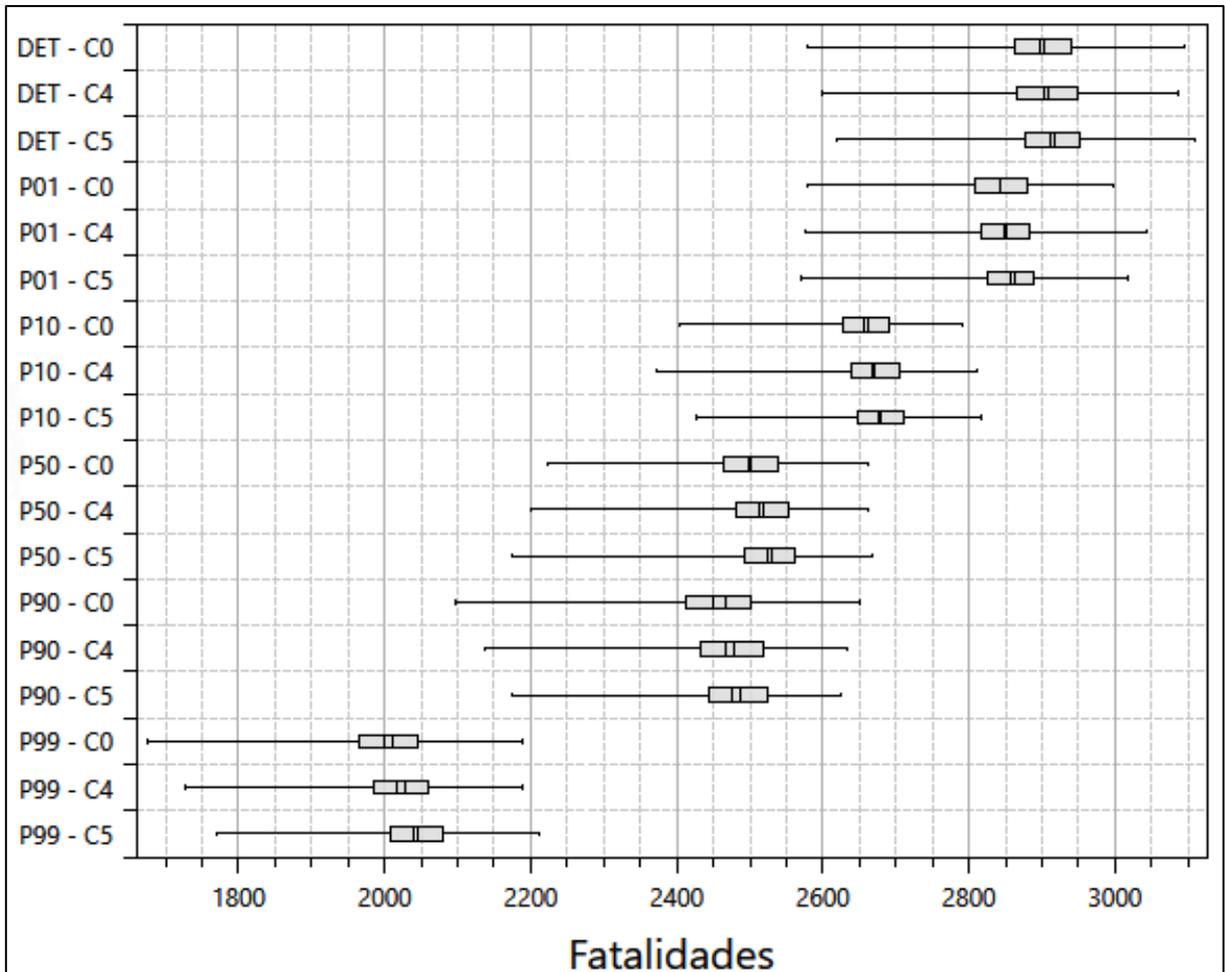
Figura 6.19 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Evacuação | Fração da população abaixo dos 65 anos com limitação de mobilidade: Cenário C0 = 5,1% e Cenário C3 = 10% | Fração da população acima dos 65 anos com limitação de mobilidade: Cenário C0 = 22,6% e Cenário C3 = 45%



Fonte: Própria do autor

A Figura 6.20 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0, C4 e C5. Os Cenários C4 e C5 objetivaram verificar os impactos nos resultados de fatalidade devido a alteração da fração da população que evacua em veículos ou a pé. O Cenário Base C0 apresenta uma fração da população de 65% que evacua em veículos. Para os Cenários C4 e C5, as frações alteram-se para 30% e 0%, respectivamente. Os resultados demonstraram que a redução da fração da população que evacua em veículos ocasiona um pequeno aumento do número médio de fatalidades para todos os eventos simulados. Para o Evento DET, a média de fatalidades aumentou de 2.896 no Cenário Base C0 para 2.903 no Cenário C4 e para 2.912 no Cenário C5. Para o Evento P99%, a média de fatalidades aumentou de 1.998 no Cenário Base C0 para 2.017 no Cenário C4 e para 2.038 no Cenário C5.

Figura 6.20 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Evacuação | Fração da população que evacua em veículos vs a pé: Cenário C0 = 65%, Cenário C4 = 30% e Cenário C5 = 0%

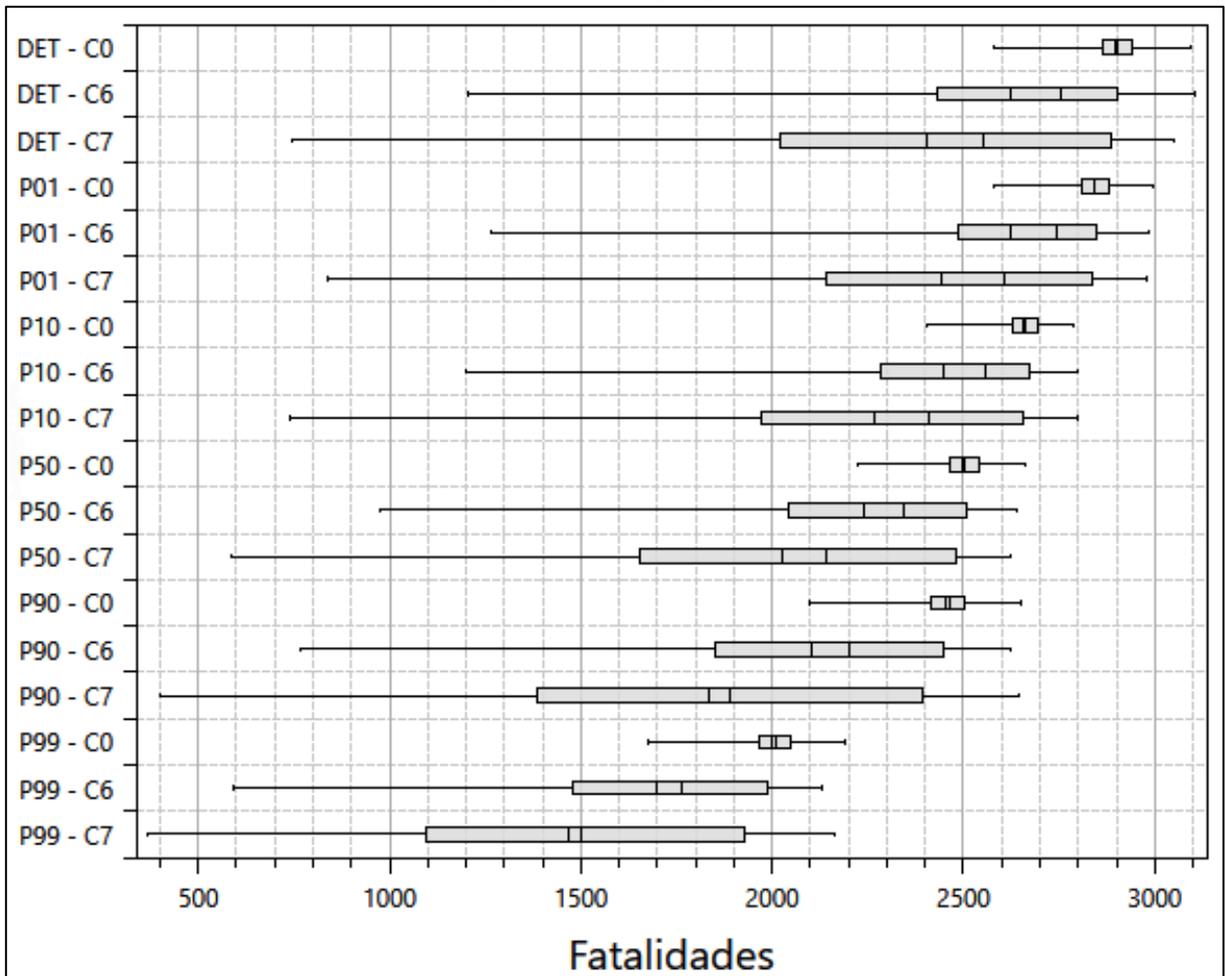


Fonte: Própria do autor

A redução da fração da população que evacua em veículos (e o aumento da população a pé) implica em menor velocidade de locomoção e, portanto, em um maior tempo necessário para evacuação com sucesso dos indivíduos mobilizados. Observa-se, contudo, que o acréscimo do número de fatalidades para os Cenários C4 e C5 apresentou baixa magnitude em função da alteração da população que evacua a pé. O efeito está associado, principalmente, a baixa taxa de mobilização da população, condição que levou a um alto número de fatalidades junto as estruturas para todos os eventos. Portanto, a medida em que não ocorre evacuação horizontal (em direção aos pontos de encontro), o impacto da velocidade de locomoção da população apresenta pequena influência no número de fatalidades.

A Figura 6.21 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0, C6 e C7. Os Cenários C6 e C7 objetivaram verificar os impactos nos resultados de fatalidade devido a alteração das curvas de mobilização da população. O Cenário Base C0 adotou a curva personalizada de mobilização para a região de estudo, construído a partir de metodologia proposta por Sorensen & Mileti (2015a). Para os Cenários C6 e C7, foram adotadas curvas padrões existentes no modelo, conforme estudos de Sorensen & Mileti (2014c). O Cenário C6 adotou uma curva para condições de baixa percepção e preparação de risco e o Cenário C7 para condições de alta percepção e preparação de risco.

Figura 6.21 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Alerta e Mobilização | Tempo de inicialização da mobilização: Cenário C0 = Curva Personalizada, Cenário C6 = Curva Padrão Tipo “D” (Percepção: Baixa / Preparação Baixa) e Cenário C7 = Curva Padrão Tipo “A” (Percepção: Alta / Preparação Alta)



Fonte: Própria do autor

Os resultados da Figura 6.21 demonstraram que para ambas as curvas adotadas há uma redução do número médio de fatalidades para todos os eventos simulados. Para o Evento DET,

a média de fatalidades diminuiu de 2.896 no Cenário Base C0 para 2.626 no Cenário C6 e para 2.402 no Cenário C7. Para o Evento P99%, a média de fatalidades diminuiu de 1.998 no Cenário Base C0 para 1.700 no Cenário C6 e para 1.470 no Cenário C7.

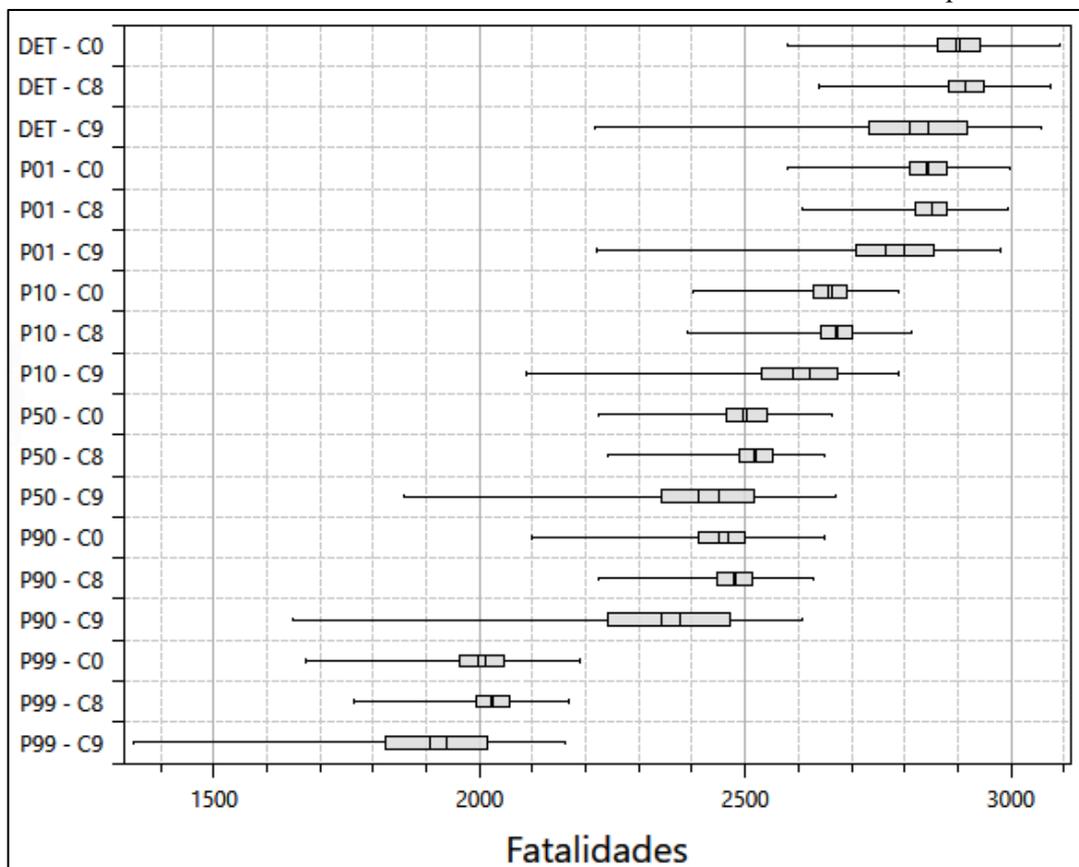
Em suma, evidencia-se um quadro de deficiência no processo de mobilização definido pela curva personalizada de mobilização. A condição é observada no Cenário Base (C0), que apresenta uma taxa média de população alertada de 50% e uma taxa média de população mobilizada de apenas 4% entre os eventos (Tabela 6.9). Fato é que, mesmo para curva padrão de baixa percepção e preparação, se observam reduções no número médio de fatalidade para todos os eventos, quando comparados ao Cenário Base. O efeito é reforçado ainda mais pelos resultados da curva de alta percepção e preparação de risco, que se apresentou como o parâmetro da análise de sensibilidade com maior efeito na diminuição do número de fatalidades.

A Figura 6.22 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0, C8 e C9. Os Cenários C8 e C9 objetivaram verificar os impactos nos resultados de fatalidade devido a alteração das curvas de difusão do alerta. O Cenário Base C0 adotou a curva personalizada de difusão do alerta para a região de estudo, construído a partir de metodologia proposta por Sorensen & Mileti (2015a). Para os Cenários C8 e C9, foram adotadas curvas padrões existentes no modelo, conforme estudos de Sorensen & Mileti (2014b). O Cenário C8 adotou uma curva de difusão do alerta do tipo “Lenta” e o Cenário C9 adotou uma curva de difusão do alerta do tipo “Rápida”. Os resultados demonstraram que a adoção da curva de difusão do alerta do tipo “Lenta” (Cenário C8) levou a um aumento do número de fatalidades em todos os eventos simulados. Para a adoção da curva de difusão do alerta do tipo “Rápida” (Cenário C9) verificou-se uma redução do número médio de fatalidades para todos os eventos simulados. Para o Evento DET, a média de fatalidades aumentou de 2.896 no Cenário Base C0 para 2.914 no Cenário C8 e diminuiu para 2.808 no Cenário C9. Para o Evento P99%, a média de fatalidades aumentou de 1.998 no Cenário Base C0 para 2.022 no Cenário C8 e diminuiu para 1.906 no Cenário C9.

De modo geral, sistemas de alerta mais eficazes apresentam maior rapidez na difusão da informação, levando a um maior número de população alertada em menor tempo. O aumento da taxa da população que recebe o alerta ao longo do tempo, por sua vez, fornece um maior intervalo para que um maior número de indivíduos inicie o processo de mobilização. Via de regra, é esperado que, em comunidades com boas condições de preparação para mobilização, o aumento da eficiência e da rapidez do sistema de alerta impacte significativamente na

diminuição do número de fatalidades. Contudo, o que se observa no presente estudo são pequenas alterações no número médio de fatalidades em função da alteração das curvas de difusão do alerta. Para o Cenário C8, associado a uma curva de difusão do alerta do tipo “Lenta”, os resultados de fatalidade apresentaram-se pouco superiores ao Cenário Base (C0), demonstrando que o atual sistema de alerta apresenta eficiência equivalente a referida curva. Para o Cenário C9, associado a uma curva de difusão do alerta do tipo “Rápida”, observa-se uma suave redução dos valores médios de fatalidade para todos os cenários. O Cenário C9 apresenta também maior dispersão nos resultados, demonstrando que para simulações com amostragens “favoráveis” a alteração da difusão do alerta pode levar a reduções mais significativas do número de fatalidades. Assim, conforme já observado nas análises de sensibilidade dos Cenários C7 e C8, a baixa eficiência da curva de mobilização adotada para a população a jusante influencia diretamente no potencial de redução de fatalidades proporcionado por eventuais melhorias nos sistemas de alerta.

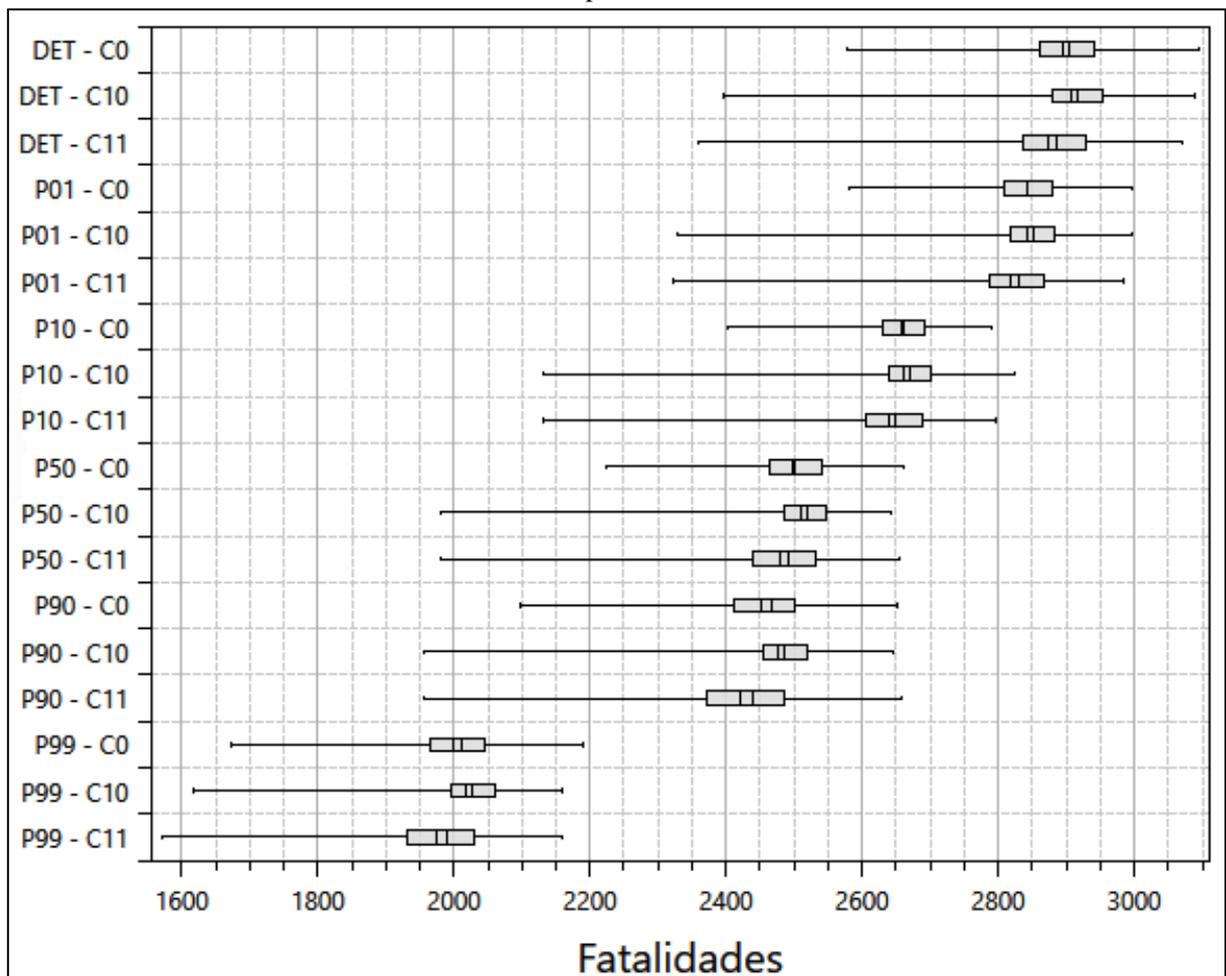
Figura 6.22 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Alerta e Mobilização | Tempo de difusão do alerta: Cenário C0 = Curva Personalizada; Cenário C8 = Curva Padrão de Difusão “Lenta” e Cenário C9 = Curva Padrão de Difusão “Rápida”



Fonte: Própria do autor

A Figura 6.23 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0, C10 e C11. Os Cenários C10 e C11 objetivaram verificar os impactos nos resultados de fatalidade devido a alteração das curvas de distribuição de probabilidade de atraso na emissão do alerta. O Cenário Base C0 adotou a curva personalizada de atraso na emissão do alerta para a região de estudo, construído a partir de metodologia proposta por Sorensen & Mileti (2015a). Para os Cenários C10 e C11, foram adotadas curvas padrões existentes no modelo, conforme estudos de Sorensen & Mileti (2014a). O Cenário C10 adotou uma curva de atraso na emissão do alerta para condições de planejamento do tipo “Minimamente preparado” e o Cenário C11 adotou uma curva de atraso na emissão do alerta do tipo “Bem Preparado”.

Figura 6.23 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Alerta e Mobilização | Tempo para emissão do alerta: Cenário C0 = Curva Personalizada; Cenário C10 = Curva Padrão Condição “Minimamente Preparado” e Cenário C11 = Curva Padrão Condição “Bem Preparado”



Fonte: Própria do autor

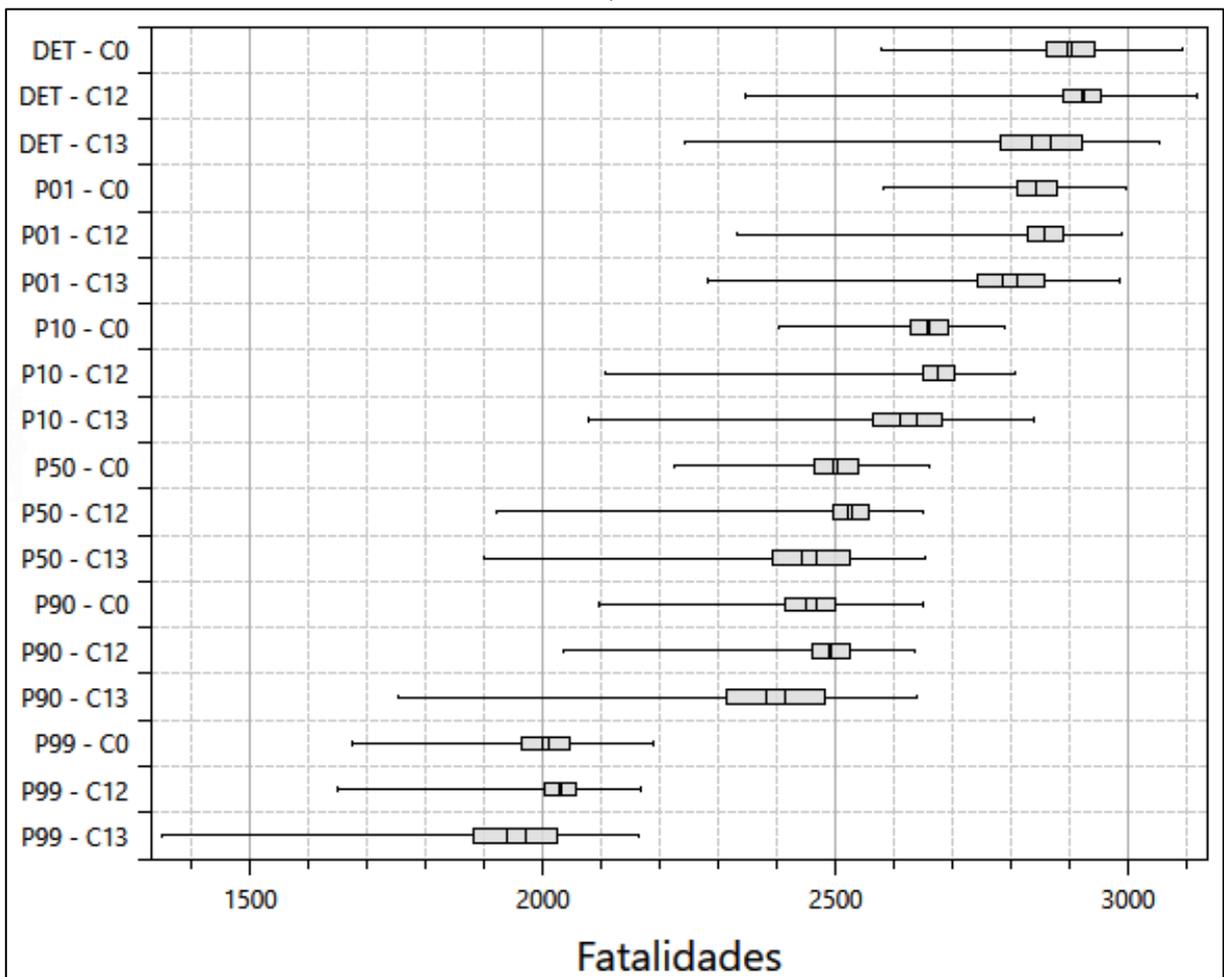
Os resultados demonstraram que a adoção da curva de atraso na emissão do alerta do tipo “Minimamente preparado” levou a um aumento do número de fatalidades em todos os eventos simulados. Para a adoção da curva de atraso na emissão do alerta do tipo “Bem Preparado” verificou-se uma redução do número médio de fatalidades para todos os eventos simulados. Para o Evento DET, a média de fatalidades aumentou de 2.896 no Cenário Base C0 para 2.907 no Cenário C10 e diminuiu para 2.873 no Cenário C11. Para o Evento P99%, a média de fatalidades aumentou de 1.998 no Cenário Base C0 para 2.019 no Cenário C10 e diminuiu para 1.974 no Cenário C11.

A alteração das curvas de distribuição impacta diretamente nas probabilidades de amostragem dos tempos de atraso para a emissão do alerta. Condições de planejamento com maior preparação levam a distribuições com maior probabilidade de ocorrência em menores intervalos de tempo, ao passo que, em condições de menor preparação, são esperadas distribuições com maior variabilidade e maiores intervalos de atraso amostrados para emissão do alerta. Para os resultados de fatalidade dos Cenários C10 e C11, observam-se pequenas variações dos parâmetros estatísticos de quartis em relação aos resultados obtidos no Cenário Base (C0). A condição demonstra que a alteração nos tempos de emissão não levou ao acréscimo de intervalos de tempo significativos para compensação dos demais atrasos nas ações de difusão do alerta e mobilização da população a jusante. Grandes reduções nos números de fatalidade são apenas observadas em eventos de baixa recorrência, representados pelos valores mínimos observados no Cenários C10 e C11, decorrentes da amostragem de tempos muito pequenos para identificação e comunicação da ameaça e emissão do alerta. As observações indicadas reforçam as considerações anteriormente apresentadas quanto a baixa eficiência da mobilização da população e de seu impacto na potencialidade de redução do número de fatalidade frente ao aprimoramento das demais ações de preparação.

A Figura 6.24 ilustra os resultados de perda de vida em diagramas de caixa para os Cenários C0, C12 e C13. Os Cenários C12 e C13 objetivaram verificar os impactos nos resultados de fatalidade devido a alteração dos tempos de identificação e comunicação da ameaça (ruptura). O Cenário Base C0 adotou uma distribuição uniforme para o tempo de identificação da ameaça, com intervalo entre os 30 minutos anteriores ao rompimento até o instante de ocorrência do gatilho de ruptura. Para o atraso na comunicação da ameaça o Cenário Base C0 adotou uma distribuição uniforme, com intervalo entre o instante identificação da ruptura e 5 minutos após. Os Cenários C12 e C13 mantiveram as distribuições uniformes de

probabilidade. O Cenário C12 adotou um intervalo entre 0 e 15 minutos após o gatilho de ruptura para a identificação da ameaça e entre 5 e 10 minutos após a identificação para a comunicação da ameaça. O Cenário C13 adotou um intervalo entre 60 e 15 minutos anteriores ao gatilho de ruptura para a identificação da ameaça e entre 0 e 1 minutos após a identificação para a comunicação da ameaça. Os resultados demonstraram um aumento do número de fatalidades para o Cenário C12 e uma diminuição do número de fatalidades para o Cenário C13 em todos os eventos simulados.

Figura 6.24 – Diagramas de caixa das estimativas de perda de vidas para os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e o evento determinístico (DET) | Parâmetros de Alerta e Mobilização | Tempo de identificação da ameaça: Cenário C0 = -30 a 0 min; Cenário C12 = 0 a +15 min; e Cenário C13 = -60 a -15 min | Tempo de comunicação da ameaça: Cenário C0 = 0 a +5 min; Cenário C12 = +5 a +10 min; e Cenário C13 = 0 a +1 min



Fonte: Própria do autor

Posteriormente aos processos de identificação e comunicação da ameaça, são iniciados os processos de emissão do alerta, difusão do alerta e mobilização. Por condições intrínsecas, os processos de identificação e comunicação apresentam grande incerteza em sua determinação,

uma vez que dependem da situação de ruptura, preparação do empreendedor, momento da ocorrência e tipo de ruptura, entre outras condições situacionais. Via de regra, processos rápidos ou antecipados de identificação e comunicação da ruptura permitem um maior tempo para decorrência das ações de alerta e evacuação, anteriormente ao avanço da onda de ruptura, e levam a um potencial de diminuição do número de fatalidades. O que se observa nos resultados obtidos acompanha a expectativa teórica, com aumento das fatalidades médias frente a ocorrência de maiores atrasos nos processos de identificação e comunicação da ameaça e diminuição das fatalidades médias na condição de ocorrência mais célere dos processos citados. Contudo, destaca-se que as alterações dos intervalos de identificação e comunicação da ameaça apresentam pouco impacto no número médio de fatalidades, condição que sugere falhas nos processos posteriores de alerta e evacuação. Os Cenários C12 e C13 apenas demonstram reduções significativas de fatalidades para as amostras mínimas, indicando que para eventos de baixa recorrência, com amostragens favoráveis de alerta e mobilização, pode-se obter resultados notáveis quanto a redução do número de perdas de vidas.

## 6.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os cenários analisados partem da premissa de ruptura da Barragem Sul por mecanismo de *piping*, com gatilho de ocorrência junto as galerias de fundo. A definição partiu da execução da metodologia de APMR (Análise de Potenciais Modos de Ruptura) e representa o resultado de um entendimento coletivo da equipe da DCSC participante. Assim, o mecanismo não representa o pior evento passível de ocorrência na barragem e sim aquele com maior entendimento coletivo quanto ao potencial de ocorrência. Uma vez selecionado, é importante destacar os impactos associados na definição dos posteriores parâmetros do estudo. A premissa de *piping* relaciona-se, primariamente, com os parâmetros de brecha de ruptura e com os tempos passíveis de identificação e comunicação da ameaça.

Para os parâmetros de brecha, admitiu-se a elevação do início do *piping* junto a região das galerias de fundo (El. 336,00 m a El. 367,00 m), bem como fixou-se o N.A. de Ruptura no Nível Máximo Normal (El. 401,00 m). Também, as estimativas dos parâmetros de largura e tempo de formação de brecha apresentam influência do mecanismo de ruptura, quando definidas pelas equações de Froehlich (2008) e Froehlich (2016). Estas definições, enquanto válidas como premissas para os presentes cenários de ruptura por *piping*, certamente apresentariam variações para demais modos de ruptura, as quais impactariam nas posteriores análises estatísticas. Ainda em relação a seleção do mecanismo de *piping*, sua gênese permite

eventuais observações visuais de seu desenvolvimento, de modo que sua identificação antecipada é passível de ocorrência. Isto posto, a definição do tempo de identificação da ameaça admitiu uma possibilidade de ocorrência para o cenário base com antecedência de até -30 min do início de abertura de brecha. Para outros mecanismos de ruptura este valor pode vir a apresentar sensível alteração, impactando posteriormente os resultados de fatalidade.

Quanto a avaliação probabilística das brechas de ruptura, a definição das distribuições estatísticas e dos limites de amostragem de cada parâmetro foram conduzidas com base em julgamentos de engenharia. Para o estudo, admitiu-se a utilização de equações empíricas para auxílio na definição dos valores médios, mínimos e máximos das principais dimensões de brecha (MACDONALD; LANGRIDGE-MONOPOLIS, 1984; VON THUN; GILLETTE, 1990; FROEHLICH, 2008; 2016). Os parâmetros também foram consistidos com base em recomendações de instituições e de estudos de referência (WAHL, 2004; USACE, 2014). As distribuições foram definidas como uniforme para os parâmetros identificados como de pouca previsibilidade, como as declividades laterais das brechas, coeficientes de descarga, progressão da brecha e elevação de início do *piping*. Para os parâmetros orientados por equacionamentos empíricos, foram admitidas distribuições normais. O presente estudo não teve como escopo a análise de sensibilidade para as distribuições adotadas.

Isto posto, observa-se que os picos dos hidrogramas de ruptura apresentaram maiores sensibilidades aos parâmetros de tempo de formação e largura de fundo. Estes parâmetros, por sua vez, tiveram seu domínio limitado em função do índice “ $ER/H_w$ ” e dos controles topográficos da seção do barramento. Ainda, ao passo em que alguns parâmetros amostrados apresentaram menor influência na formatação dos hidrogramas, como as declividades laterais das brechas e os coeficientes de descarga, alguns parâmetros tiveram sua influência impactada pelas premissas selecionadas para o modo de ruptura, como é o caso da fixação do N.A. de ruptura e da definição da região de ocorrência das elevações do início do *piping* e da cota de fundo das brechas. Para outras hipóteses de ruptura, a variação destes parâmetros poderia levar a alterações sensíveis nas alturas de brechas e nos volumes propagados de ruptura, circunstâncias que implicariam em alterações nos hidrogramas de ruptura resultantes.

Assim, o que se destaca frente as premissas do presente estudo são os limites de domínio adotados para os parâmetros de ruptura. Para o mesmo N.A. inicial e para ocorrência de elevação do fundo de brecha entre um pequeno intervalo (El. 366,00 m a El. 367,00 m), os parâmetros de maior sensibilidade puderam alterar de 72,00 m a 100,0 m para a variável de

largura final do fundo da brecha e de 12 min a 102 min para o tempo de formação. As maiores vazões de pico, portanto, relacionam-se aos eventos com combinações de menor tempo de abertura e maior largura de brecha e, as menores vazões de pico, relacionam-se aos eventos com combinações de maior tempo de abertura e menor largura de brecha. O impacto dos domínios e fixações definidos para os parâmetros com maior sensibilidade resultaram em picos dos hidrogramas de ruptura com variação na ordem de 37% entre as vazões de pico dos cenários P99% e P01%. Estes resultados, por sua vez, levaram as pequenas alterações incrementais observadas entre as envoltórias máximas de inundação dos eventos probabilísticos e do cenário determinístico avaliado. O aumento da área total inundação entre o Cenário P99% e o Cenário P01%, por exemplo, é de apenas 0,48 km<sup>2</sup> ou de cerca de 5%. Apesar disso, é importante atentar para as diferenças ocorridas nos resultados hidrodinâmicos dos eventos, especialmente em relação aos tempos de chegada. De modo a exemplificar, o tempo de chegada da frente de onda varia entre 01h46min, 01h30min e 01h23min entre os cenários P99%, DET E P01% para o centro da cidade de Ituporanga.

Ainda em relação aos hidrogramas de ruptura, observa-se uma tendência de comportamento relacionada a probabilidade de excedência. Os hidrogramas com maior vazão de pico e, portanto, menor probabilidade de excedência, apresentaram formatação mais alongada. A medida em que a vazão de pico decresce, e a probabilidade de excedência aumenta, verifica-se uma tendência de achatamento no formato dos hidrogramas. Este resultado está associado metodologia da análise probabilística conduzida pelo modelo McBreach, o qual utiliza a vazão de pico como variável explicativa para definição das probabilidades de excedência. Assim, justifica-se a correlação associada ao tempo de abertura de brecha como o parâmetro de maior sensibilidade, uma vez que o mesmo está diretamente relacionado a vazão de pico do hidrograma.

É importante atentar, contudo, que as características dos hidrogramas de ruptura como o volume defluente e os tempos de base, ascensão e recessão apresentam sensibilidade nos efeitos de inundação a jusante. Verifica-se que os tempos de chegada da inundação no vale a jusante são influenciados pelo tempo de pico dos hidrogramas. Da mesma forma, a duração da inundação e a extensão da mancha são influenciadas pelo tempo de base do hidrograma de ruptura e as profundidades e velocidades máximas de inundação são influenciadas pelo volume e pela vazão de pico dos hidrogramas de ruptura.

De forma exemplificar, destacam-se as diferenças observadas para os eventos P01% e DET do presente estudo. O evento P01% apresenta vazão de pico de 10.841 m<sup>3</sup>/s e tempo de pico do hidrograma de 32 min enquanto o cenário DET apresenta vazão de pico de 10.317 m<sup>3</sup>/s e tempo de pico do hidrograma de 59 min. Ao observar os hidrogramas amortecidas a jusante, verifica-se que o evento P01% apresenta maior amortecimento nos primeiros quilômetros a jusante da barragem, de forma que a partir da Seção S-02 (3,00 km) o evento DET sustenta maiores vazões de pico até, aproximadamente, a Seção S-07 (13,50 km). Para as seções posteriores, observa-se ainda que os demais eventos com maior Probabilidade de Excedência (PE), apesar das menores vazões de pico dos hidrogramas de ruptura, demonstram capacidade para sustentar hidrogramas com vazões máximas ligeiramente superiores aos eventos DET e P01% para os quilômetros seguintes a jusante. O evento P99%, por exemplo, apresenta vazão cerca de 4% superior ao evento P01% na última Seção (S-13) avaliada, cerca de 25 km a jusante da Barragem Sul.

Observa-se que mesmo com tempos de chegada inferiores para os eventos com menor PE, a sustentação de maiores vazões de pico a jusante implica também em maiores área inundadas a jusante, podendo levar a um maior número de população em risco. Embora o efeito observado entre os eventos deste estudo seja de pequena magnitude, o resultado sugere atenção quanto a relação em entre os formatos dos hidrogramas, o padrão de amortecimento da inundação e a densidade populacional a jusante. Por vezes, hidrogramas com formatação mais achatada e, portanto, menor vazão de pico e maior tempo de base, podem causar uma extensão de inundação maior a jusante. Ainda que estes hidrogramas levem a maiores tempos de chegada, sua identificação e avaliação pode ser relevante em função da concentração populacional a ser atingido pela extensão incremental provocada a jusante.

Quanto a análise de vulnerabilidade e exposição e a construção do inventário de estruturas e pessoas, destaca-se a utilização de informações censitárias e produtos cadastrais disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A base de dados é referente ao censo demográfico de 2010 e aos seus subprodutos, como o cadastro nacional de endereços para fins estatísticos, a base de faces de logradouros do censo demográfico, os microdados do universo do censo demográfico e a grade estatística (IBGE, 2010a, 2010b, 2013a, 2016). Para construção do inventário de estruturas e pessoas admitiu-se diversas hipóteses e simplificações envolvendo distribuições espaciais dos parâmetros populacionais. Os resultados, portanto, representam aproximações do quantitativo estrutural e populacional e

carregam, intrinsicamente, as limitações da resolução e da atualização dos dados de entrada. Embora o inventário apresente aderência aos principais parâmetros censitários disponíveis, como população total, idade, material construtivo das residências e distribuição laboral, é importante destacar que a distribuição espacial apresentada é uma estimativa construída a partir de técnicas de transferência de dados por desagregação. Deste modo, os resultados representam apenas uma das possibilidades de aproximação da distribuição e das características populacionais de Ituporanga.

Apesar disso, analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que o inventário demonstra a ocorrência de altas concentrações populacionais no centro da cidade, com concentrações pequenas à médias ao longo de toda sua área urbana, que acompanha o rio Itajaí do Sul. Também, a concentração no centro da cidade é maior no período da tarde, diminuindo e tornando-se mais homogênea ao longo da extensão do rio no período noturno. Este comportamento é similar ao observado na realidade em Ituporanga e permite inferir que a variação populacional do inventário é verossímil com o comportamento geral da população. Assim, ainda que o inventário não apresente boa aderência à localização real dos indivíduos, entende-se que sua adoção é válida para simulação hipotética dos eventos de alerta e evacuação da população frente a ocorrência da ruptura da Barragem Sul.

Em relação aos resultados da modelagem de perda de vida para o Cenário Base, verificou-se uma tendência de decréscimo do número de fatalidades em função do aumento da probabilidade de excedência dos eventos. O evento P99% apresentou um valor médio de 1.998 fatalidades e o evento P01% apresentou uma média de 2.841 fatalidades, os demais cenários apresentam valores intermediários. De modo geral, o aumento da probabilidade de excedência dos eventos esteve associado: (i) a diminuição do número de estruturas atingidas e da população total em risco; (ii) ao acréscimo dos tempos de chegada da onda de ruptura; (iii) a diminuição da extensão total da mancha de inundação e ao decréscimo do risco hidrodinâmico; (iv) ao aumento da população alertada e mobilizada; e (v) a diminuição do número total de fatalidades.

Contudo, mesmo para o evento P99%, referente ao evento com maiores tempos de chegada, observaram-se ainda altos números de fatalidade. De modo geral, o acréscimo dos tempos de chegada entre os cenários de menor para maior PE levou a um aumento da taxa média da população total alertada, que varia de 40%, no evento P01%, para 65% no evento P99%. Em contrapartida, a taxa média de população mobilizada variou apenas de 2,5%, no evento P01% para 7,1% no evento P99%. As baixas taxas de mobilização estão relacionadas,

principalmente, a curva de mobilização adotada no modelo. Construída por metodologia proposta por Sorensen & Mileti (2015a, 2015b), a curva descreve que uma taxa média de 2% população da população evacuará após 30 min do recebimento do alerta, bem como 10%, 20% e 60% da população evacuará em 70 min, 100 min e 240 min após o recebimento do alerta. Estes atrasos representam valores elevados quando comparados aos tempos de chegada observados nas seções de referência do estudo e justificam as baixas taxas de mobilização observadas para o Cenário Base.

Em relação a metodologia personalizada proposta por Sorensen & Mileti (2015a, 2015b), sua adoção tem por objetivo a construção de curvas de alerta e mobilização para diferentes características de preparação das comunidades avaliadas, de modo que por meio da comparação com curvas associadas a melhores preparações e fundamentando-se na orientação dos questionários de elicitação, torne-se possível a identificação de falhas, melhorias e aspectos positivos da preparação da população avaliada. Quanto a construção propriamente da curva de mobilização personalizada para o Cenário Base, os fatores de maior impacto para sua formação desfavorável estiveram ligados (i) a falta de padronização e de completude de informações previstas para as mensagens de alerta a serem emitidas; (ii) a falta de planejamento específico para alertar parcelas da população em condições diferenciadas, como em locais recreacionais, regiões agrícolas e população transiente, entre outras possibilidades; e (iii) a falta de preparação e de planejamento individual da população para o evento de ruptura. Assim, é importante destacar que os resultados observados para o Cenário Base trazem luz a existência de deficiências específicas nos processos de preparação e percepção da comunidade que impactariam na ocorrência de eventos reais, levando a um potencial alto de ocorrência de fatalidades. Por meio do conhecimento e da enunciação destas deficiências, torna-se possível estabelecer objetivos mais concretos para o aprimoramento das ações de preparação.

Relativamente a análise de sensibilidade, a metodologia conduzida partiu da alteração dos principais parâmetros do modelo HEC-LifeSim. As mudanças para cada cenário de sensibilidade admitiram a mudança de parâmetros específicos, mantendo os demais parâmetros equivalentes aos propostos para o Cenário Base. Deste modo, a medida em que se tornou possível verificar o impacto no número de fatalidades frente a alteração de cada variável de entrada do modelo, observou-se também que a deficiência do processo de mobilização, já identificado no Cenário Base, impactou sensivelmente nos resultados obtidos. Assim, observaram-se pequenos aumentos no número de fatalidade para os cenários de sensibilidade

relacionados ao agravamento dos parâmetros de entrada como, por exemplo, o acréscimo da fração da população com limitação de mobilidade (C03), o aumento da população a pé (C05) e o aumento dos intervalos de identificação e comunicação do evento de ruptura (C12). A taxa média de aumento do número de fatalidades entre todos os eventos dos cenários C03, C05 e C12 em relação ao cenário C0 foi de aproximadamente 2%, demonstrando que as ocorrências de fatalidade já se encontram próxima a faixa máxima de amostragem do modelo frente aos parâmetros selecionados.

Ainda assim, informações importantes foram identificadas pela análise de sensibilidade para contribuição nas ações de preparação. Especialmente em relação aos parâmetros que podem contribuir para melhora no processo de preparação da comunidade para o evento de ruptura. A variação da concentração populacional entre o período diurno e noturno avaliada pelo Cenário C02, por exemplo, demonstrou desempenhar um importante fator na ocorrência de fatalidades para todos os eventos simulados. Conforme anteriormente destacado, a concentração populacional no centro do município observada no período diurno está relacionada principalmente a localização dos estabelecimentos laborais na região e acaba por se dispersar no período noturno, com distribuição mais uniforme dos indivíduos ao longo da área impactada pela mancha de ruptura. Este fenômeno acaba por levar a uma organização locacional favorável à redução de fatalidades, realocando-se a população mais próximo a regiões com maior tempo de chegada, maior proximidade dos pontos de encontro e menor risco hidrodinâmico.

Da mesma forma, as análises de sensibilidade do parâmetro de tempo de inicialização da mobilização conduzidas nos Cenários C6 e C7 reafirmam as conclusões indicadas para o Cenário Base. A adoção de curvas mais eficientes de mobilização da população em relação a curva personalizada resultou em sensíveis alterações no número de fatalidades. A taxa média de diminuição do número de fatalidades entre todos os eventos do cenário C07 em relação ao cenário C0, por exemplo, foi de aproximadamente 20%. Assim, o parâmetro de tempo de inicialização da mobilização é a variável com maior sensibilidade para diminuição do potencial de perdas de vidas em relação ao Cenário Base proposto.

Quanto a análise de sensibilidade da difusão do alerta, observa-se no Cenário C9 que a implementação de sistemas com maior rapidez e eficácia de transmissão da informação demonstram potencial para redução do número de fatalidades. Verificando-se os resultados do cenário, observa-se uma taxa média de população alertada de 77% entre todos os eventos

simulados. Assim, embora os parâmetros médios de fatalidades encontrem-se influenciados pela ineficiência dos parâmetros de mobilização, entende-se que o aumento de cerca de 26% em relação a taxa média de 51% da população alertada no Cenário Base possui grande impacto na eficiência das ações de preparação para o evento de ruptura da Barragem Sul.

Em relação as ações de preparação e de aprimoramento do Plano de Ação de Emergência da Barragem Sul, destacam-se as deficiências observadas e as sugestões de melhorias identificadas pelo estudo para os processos de comunicação dos alertas, para seleção do sistema de alerta, para contato e treinamento com a comunidade e para construção dos sistemas de sinalização, rotas de fuga e pontos de encontro.

Especialmente quanto ao sistema de distribuição de alerta, a DCSC adota como ferramenta principal o sistema de emissão de SMS via sistema IDAP. Como limitação, o sistema demanda que a população interessada se cadastre para receber os alertas da defesa civil, não garantindo um alcance adequado do alerta na população em risco. A mensagem enviada deve ainda trazer um conteúdo conciso, para que haja eficiência na transmissão da informação a aqueles aptos a recebe-la. Assim, a condição verificada pelos questionários de elicitação demonstra uma necessidade de melhorias no conteúdo e no planejamento das mensagens de alerta de ruptura da barragem.

Tratando-se especificamente da recomendação do sistema de alerta, observa-se que para o Cenário Base os tempos de chegada são da ordem de 27 a 37 min para a região central da ZAS (SR-04 | 5 km) e da ordem de 83 a 106 min para o centro do município de Ituporanga (S-08 | 14,5 km). Assim, admitindo-se a necessidade de ocorrência de todos os eventos previstos pela linha do tempo de alerta e evacuação para salvaguardar as vidas da população em risco (Figura 3.16), entende-se como recomendável a implementação de sistemas de sirenes de alerta com capacidade de transmissão de mensagens personalizadas de voz. Esta ação traria uma eficácia adequada ao sistema de alerta da Barragem Sul e levaria o sistema de SMS a adotar um papel de redundância, fator igualmente importante para a robustez do sistema de alerta. Da mesma forma, por se tratar de uma barragem de contenção de cheias, o sistema de sirenes permitiria comunicações mais eficientes de eventos de abertura de comportas e vertimentos, manobras necessárias para as operações de amortecimento das inundações no vale do Itajaí.

Salienta-se ainda a necessidade de execução dos principais instrumentos previstos pela legislação para o plano de ação de emergência da Barragem Sul, tais como a definição de pontos

de encontro e rotas de fuga para as comunidades atingidas e a implementação da sinalização de emergência na ZAS. Posteriormente a estas ações, se tornará exequível as ações de treinamento e simulados com a população, condições que implicariam em grande ganho para as condições de percepção e preparação da população de Ituporanga.

Destaca-se, por fim, que a presente análise é fruto da observação das informações fornecidas pelo órgão e pelo documento do PAE, com última atualização emitida em maio de 2019 (DCSC, 2019b). O estudo não tem por objetivo auditar o atendimento atual do empreendedor aos requisitos mínimos legais e sim conduzir uma avaliação dos resultados obtidos no estudo.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação de metodologias probabilísticas de previsão de brecha de ruptura e de modelos de estimativa de perda de vida permitem a obtenção de importantes informações para a avaliação da efetividade das ações de preparação para emergências de ruptura de barragens. Por meio da proposição de associação das metodologias, o presente estudo objetivou a avaliar a efetividade da preparação para o evento de ruptura da Barragem Sul.

O uso da metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura permitiu o cálculo das áreas de inundação induzidas pelo rompimento da Barragem Sul para probabilidades de excedência de 1%, 10%, 50%, 90% e 99%. Através da abordagem foi possível comunicar os riscos associados aos eventos de ruptura, demonstrando esta ser uma das principais vantagens sobre a aplicação da metodologia determinística. Além disso, os resultados dos eventos associados as probabilidades de excedência apresentaram sensível alteração nos parâmetros hidráulicos, principalmente em relação aos tempos de chega da frente da onda de ruptura. Especialmente para a análise de perda de vida, as variações nos tempos de chegada apresentaram importante influência nos resultados de fatalidades e possibilitaram um maior entendimento da dinâmica temporal de alerta e evacuação do sistema em estudo.

A condução da avaliação de perda de vida com o modelo HEC-LifeSim, por sua vez, possibilitou a avaliação da eficácia dos mecanismos adotados no planejamento emergência da Barragem Sul. Os resultados contribuíram para identificação das principais deficiências e estabelecimento das principais melhorias a serem adotadas pelo empreendedor.

A vigente legislação brasileira de segurança de barragens não contempla exigências relacionadas a utilização de metodologias probabilísticas de previsão de brecha de ruptura ou, tão pouco, a realização de modelagens de perda de vida (BRASIL, 2010; 2020). A recomendação de utilização destas metodologias, contudo, já é realidade em países com diferentes culturas de análise de risco (FERC, 2014a; CWC, 2018; ICOLD, 2021). Para alguns setores associados a segurança de barragens no Brasil, também já é possível observar tendências de avanço no assunto, como exemplificam-se os requisitos impostos pela Agência Nacional de Mineração para conduções de análises de conformidade e operacionalidade dos planos de ação de emergência e implementação de processos de gestão de risco das estruturas (ANM, 2022; 2023).

Frentes as revisões literárias e aos resultados gerados, é notória a alta demanda de informações e de tempo para condução das metodologias apresentadas. Assim, recomenda-se uma abordagem de escalabilidade da complexidade de avaliação, conforme o risco potencial da estrutura. Para pequenas barragens, com baixo potencial de risco e situadas a montante de áreas escassamente povoadas, entende-se que a abordagem determinística de abertura de brecha permite um entendimento adequado da dinâmica de inundação da ruptura. Da mesma forma, a utilização de modelos dinâmicos de perda de vida não é inicialmente justificável neste contexto, frente aos recursos necessários para sua condução. Contudo, para barragens grandes ou com alto potencial de risco, localizadas a montante de áreas povoadas ou de planícies de inundação complexas, é recomendável a utilização de modelagem mais sofisticadas, incluindo, nestes casos, a adoção de metodologias probabilísticas de previsão de brecha de ruptura e de modelos de estimativa de perda de vida.

Em um contexto de crescente demanda da sociedade por maior segurança das barragens, especialmente frente aos eventos de ruptura decorridos no Brasil na última década, o presente estudo apresenta-se como uma contribuição a exploração da utilização da metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura e da potencialidade de integração de seus resultados na aplicação de modelos de estimativa de perdas de vida. Em conjunto com o crescente interesse acadêmico e profissional de utilização destas metodologias, a presente pesquisa amplia o espaço para discussão e para o avanço científico da área no cenário nacional.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação dos seguintes aspectos não verificados no presente estudo: (i) Condução de avaliação de sensibilidade no guia de entrevistas e no sistema de pontuação para construção das curvas de alerta e evacuação propostas pela metodologia de Sorensen & Mileti (2015a,b); (ii) Aplicação e comparação de resultados com diferentes modelos dinâmicos de perda de vida, como o Life Safety Model (HRW, 2021); (iii) Condução da metodologia de análise de vulnerabilidade e exposição com dados do novo censo demográfico do IBGE (IBGE, 2024); (iv) Condução de calibração do inventário de estruturas e pessoas, por meio de análises em campo da distribuição populacional; e (v) Condução de calibração das curvas de emissão e difusão de alertas e de mobilização por meio do acompanhamento de simulados externos com a população a jusante da estrutura em estudo.

## REFERÊNCIAS

- ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S. **LIFESim: A Model for Estimating Dam Failure Life Loss** Report to Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers and Australian National Committee on Large Dams by Institute for Dam Safety Risk Management, Utah State University, Logan, Utah, 2005.
- ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S.; MCCLELLAND, D. M. **A Model for Estimating Dam Failure Life Loss**. In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS RISK WORKSHOP, 2003. Launceston, Tasmania, Australia. Anais... Hobart, Tasmânia, Austrália: Australian National Committee on Large Dams, 2003.
- ALVAREZ, M.; PUERTAS, J.; PEÑA, E.; BERMUDEZ, M. **Two-Dimensional Dam-Break Flood Analysis in Data-scarce Regions: The Case Study of Chipembe Dam, Mozambique**. *Water*, v. 9, n. 6, p. 432. 2017.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Resolução nº 752, de 17 de outubro de 2011**. Brasília. 2011.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Resolução nº 91, de 02 de abril de 2012**. Brasília. 2012.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual do Empreendedor Sobre Segurança de Barragens: Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação Emergencial – PAE**. Volume IV. Brasília. 2016.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017**. Brasília. 2017a.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras**. Brasília. 2017b.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Segurança de Barragens 2021**. Brasília. 2022.
- ANDREETTA, A. B. **Avaliação Comparativa dos Marcos Regulatórios Estaduais de Segurança de Barragens de Usos Múltiplos do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos). Faculdade de Engenharia. Campus de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira 2020.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015**. Brasília. 2015
- ANM. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 32, de 11 de maio de 2020**. Ministério de Minas e Energia. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 2020a
- ANM. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 51, de 24 de dezembro de 2020**. Ministério de Minas e Energia. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 2020b.

ANM. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Ministério de Minas e Energia. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 2022.

ANM. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 130, de 24 de fevereiro de 2023**. Ministério de Minas e Energia. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 2022.

ASSAF, H.; HARTFORD D.N.D. **A Virtual Reality Approach to Public Protection and Emergency Preparedness Planning in Dam Safety Analysis**. In: Proc. of the Canadian Dam Association Conference. Victoria, Canada. 2002.

BALL, J. BABISTER, M. NATHAN, R. WEEKS, W. WEINMANN, E. RETALLICK, M. TESTONI, I. **Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation**. Commonwealth of Australia (Geoscience Australia). 2019.

BECKER A.B., JOHNSTONE W.M., LENCE B.J. **Wood Frame Building Response to Rapid-Onset Flooding**. Nat Hazards, Rev 12:85–95. 2011.

BELLO, D.; ALCAYAGA, H.; CAAMAÑO, D.; PIZARRO, A. **Influence of Dam Breach Parameter Statistical Definition on Resulting Rupture Maximum Discharge**. Water. 2022; 14(11):1776. <https://doi.org/10.3390/w14111776>

BILALI, E. A.; TALEB, A.; BOUTAHRI, I. **Application of HEC-RAS and HEC-LifeSim Models for Flood Risk Assessment**. Journal of Applied Water Engineering and Research. 2021.

BM. BANCO MUNDIAL (WORLD BANK) **Portfolio Risk Assessment Using Risk Index**. Good Practice Note on Dam Safety. Global Water Security & Sanitation Partnership. 2021a.

BM. BANCO MUNDIAL (WORLD BANK) **Technical Note 5: Potential Failure Mode Analysis**. Good Practice Note on Dam Safety. Global Water Security & Sanitation Partnership. 2021b.

BRANDÃO, M. R. L. **Modelagem Hidrodinâmica Uni e Bidimensional Aplicada ao Rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras - MG**. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. UFMG, MG, BH. 2005.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.181, de 03 de junho de 2003**. Brasília. 2003.

BRASIL. **Projeto de Lei da Câmara nº 168, de 2009**. Brasília, 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 2010.

BRASIL. **Relatório de análise de acidente: rompimento da barragem de rejeitos Fundação em Mariana – MG.** Ministério do Trabalho e Previdência Social. Brasília, 2016.

BRASIL. **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho: Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019.** Ministério da Economia, Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, Secretaria do Trabalho, Subsecretaria de Inspeção do Trabalho, Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais, SEGUR - Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador. Belo Horizonte. 2019a.

BRASIL. **Decreto nº 10.000, de 3 de setembro de 2019.** Dispõe sobre o Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasília. 2019b.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Diário Oficial da União. Brasília. 2020.

BROWN, C.A., GRAHAM W.J. **Assessing the Threat to Life from Dam Failure.** Water resources Bulletin, Vol. 24 No. 6 pp. 1303-1309. 1988.

BUENO, M. C. **Grade Estatística: Uma Abordagem para Ampliar o Potencial Analítico de Dados Censitários.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Demografia. Campinas, SP. 2014.

CASTRO, P. T. A. **Desastres de Mariana e Brumadinho: o que aprendemos ou deixamos de aprender?** Caderno de Geografia, v. 31, n. 1, p. 196-207, fev. 2021.

CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. **Guia Básico de Segurança de Barragens.** Rio de Janeiro. 2001.

CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil. Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta Anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** Rio de Janeiro. CBDB, 2011.

CDA. CANADIAN DAM ASSOCIATION. **Technical Bulletin 8: Geotechnical Considerations for Dam Safety.** 2007.

CDWR. DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES DIVISION OF WATER RESOURCES. **Guidelines for Dam Breach Analysis.** State of Colorado, Office of the State Engineer, Dam Safety Branch. Colorado, USA. 2010.3

CEDEC. COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL DE MINAS GERAIS. **Instrução Técnica 01/2021.** Gabinete Militar do Governador. Belo Horizonte, 2021.

CEDRO. CEDRO ASSESSORIA AMBIENTAL LTDA. **Consórcio Bacia do Rio Itajaí - Seções Topobatimétricas.** 2014.

CHAUDHRY, M. H. **Open-Channel Flow.** 2nd ed. DOI: 10.1007/978-0-387-68648-6. 2008.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics.** Caldwell: McGraw Hill Book Company, Inc; Tokyo, Kogakusha. 680 p. 1959.

CLARKE, L. **Mission improbable: Using fantasy documents to tame disasters**. University of Chicago Press, Chicago, USA. 1999.

CLAUSEN, L., CLARK, P. **The Development of Criteria for Predicting Dambreak Flood Damages Using Modeling of Historical Dam Failures**. Proc., Int. Conf. on River Flood Hydraulics, W. White, ed., Wiley, Chichester, U.K, 369–380. 1990.

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

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

CNRH. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 178, de 29 de junho de 2016**. Brasília. 2016.

COLFERAI, M. N. **Análise da Influência da Topobatimetria de Jusante em Estudo de Rompimento de Barragem**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2018.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina**. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre. 1997.

COMPDEC. COORDENADORIA MUNICIPAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL. **Plano Municipal de Contingência para Enchente e Deslizamento, Ituporanga/SC**. Município de Ituporanga. Gabinete do Prefeito. Setembro, 2015.

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

CUTTER, S. L., BORUFF, B. J., & SHIRLEY, W. L. **Social Vulnerability to Environmental Hazards**. Social Science Quarterly, 84(2),242–261. 2003

CWC – CENTRAL WATER COMMISSION. **Guidelines for Mapping Flood Risks Associated with Dams**. Doc. No. CDSO\_GUD\_DS\_05\_V1.0. Ministry of Water Resources. New Delhi, India. 2018.

CWC. CENTRAL WATER COMMISSION. **Guidelines for Assessing and Managing Risks Associated with Dams**. Doc. No. CDSO\_GUD\_DS\_10\_V1.0. Ministry of Water Resources. New Delhi, India. 2019.

DALE, K., EDWARDS, M., MIDDELMANN, M., and ZOPPOU, C. **Structural Flood Vulnerability and the Australianisation of Black's Curves**. Proc., Risk Conf., Risk Engineering Society, Barton, Australia. 2004.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Estudos de Frequência de Cheias para as Barragens de Contenção de Cheia do Alto Vale do Itajaí – Barragens Norte, Oeste e Sul**. 5062-BAI-6C-RTHI-001-00-17. Versão 00. Produção: PROSUL - Projetos, Supervisão e Planejamento LTDA. Florianópolis. 2017.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Plano de Segurança da Barragem Sul – Ituporanga: Volume I – Informações Gerais.** 5062-SUL-6C-MPBA-001. Versão 02. Produção: PROSUL - Projetos, Supervisão e Planejamento LTDA. 2018a.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Plano de Segurança da Barragem Sul – Ituporanga: Volume II – Documentação Técnica do Empreendimento.** 5062-SUL-6C-MPBA-002. Versão 02. Produção: PROSUL - Projetos, Supervisão e Planejamento LTDA. Florianópolis. 2018b.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Plano de Segurança da Barragem Sul – Ituporanga: Volume V – Revisão Periódica de Segurança da Barragem.** 5062-SUL-6C-MPBA-005. Versão 02. Produção: PROSUL - Projetos, Supervisão e Planejamento LTDA. Florianópolis. 2018c.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Relatório de Inspeção Especial Pós Operação.** BITU-RL-MOP-001. SGPE SDC 2730/2019. Florianópolis. 2019a.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Plano de Segurança da Barragem Sul – Ituporanga: Volume VI – Plano de Ação de Emergências - PAE.** 5062-SUL-6C-MPBA-006. Versão 03. Produção: PROSUL - Projetos, Supervisão e Planejamento LTDA. Florianópolis. 2019b

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Manual de Operação dos Reservatórios de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí.** 602-RT-EHR. Revisão 0. Produção: Fractal Engenharia Meio Ambiente e Inovação. Florianópolis. 2021a.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Relatório Técnico de Inspeção Visual nas Estruturas Civas e de Terra da Barragem Sul – DCSC.** Produção: Fractal Engenharia Meio Ambiente e Inovação. 686-BS-RT-ISV-001. Florianópolis. 2021b.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Planilha de Registro de Operação das Barragens de Contenção de Cheia do Vale do Itajaí.** Acesso em 18/12/2021. 2021c.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Relatório de Inspeção Regular Anual de 2020.** BS-ISR-MOP-001 VFA. SGPE DC 48/2021. Florianópolis. 2021d.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Relatório de Inspeção Especial da Barragem Sul.** IE-BS-RL-MOP-001\_2021. Florianópolis. 2021e.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Curva Cota-Área-Volume dos Reservatórios de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí e Padronização das Referências para Cálculo de Percentual de Armazenamento.** Nota Técnica. 602-NT-003-CAV. Produção: Fractal Engenharia Meio Ambiente e Inovação. 2021f.

DCSC. DEFESA CIVIL DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Manual de Operação dos Reservatórios de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí.** 602-RT-EHR. Revisão 1. Produção: Fractal Engenharia Meio Ambiente e Inovação. 2021g.

DEKAY, M. L., MCCLELLAND, G. H. **Predicting Loss of Life in Cases of Dam Failure and Flash Flood**. Risk Analysis, 13: 193-205. 1993

DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria nº 416, de 03 de setembro de 2012**. Brasília. 2012.

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

DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Brasília. 2017.

ELETRÓBRÁS. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Brasília. 2003

ESCUDE-BUENO, I., CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T., ZECHNER, S., JÖBSTL, C., PERALES-MOMPARLER, S., AND PETACCIA, G. **A Quantitative Flood Risk Analysis Methodology for Urban Areas with Integration of Social Research Data**. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 2843–2863. 2012.

FEMA. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Risk Prioritization Tool for Dams – User’s Manual**. FEMA P-713. Washington, DC, USA. 2008.

FEMA. **Protecting Manufactured Homes from Floods and Other Hazards: A Multi-Hazard Foundation and Installation Guide**. FEMA P-85, Second Edition, FEMA, Washington, DC. 2009.

FEMA. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures**. FEMA P-946. Washington, DC, USA. 2013.

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Summary of Databases in Hazus**. Washington, DC. 2019.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects**. Washington, DC, USA. 1993.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Breach Analysis**. Engineering Guidelines for Risk-Informed Decision Making. Chapter R21. Washington, DC, USA. 2014a.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Estimation of Life Safety Consequences**. Engineering Guidelines for Risk-Informed Decision Making. Chapter R22. Washington, DC, USA. 2014b.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Safety Performance Monitoring Program**. Chapter 14. Revision 03. Washington, DC, USA. 2017.

FERENTCHAK, J. A., JAMIESON S. L. **Using Erosion Rate to Refine Earth Dam Breach Parameters**. The Journal of Dam Safety, Vol. 6, No. 4. 2008.

FROEHLICH, D. **Embankment Dam Breach Parameters Revisited**. Journal of Water Resources Planning and Management. 121(1), 90-97. 1995.

FROEHLICH, D. **Embankment Breach Parameters and Their Uncertainties**. Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721. 2008.

FROEHLICH, D. **Empirical Model of Embankment Dam Breaching**. The International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016). 2016

FROEHLICH, D. C.; DIAZ, D. G. **Dam Safety – Living with the Risk of Failure**. A System Engineering Approach to Disaster Resilience Select Proceedings of VCDRR. Springer. 2022.

FULLER, W. E. **Flood flows**. Transactions ASCE. New York, v. 77, p. 564-617. 1914.

GALLEGOS, H. A., SCHUBERT, J.E., SANDERS, B.F. **Structural Damage Prediction in a High-Velocity Urban Dam-Break Flood: Field-Scale Assessment of Predictive Skill**. Journal of Engineering Mechanics, 138. 2012.

GEE, M. **Comparison of Breach Parameter Estimators**. World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers Proceedings. Kansas, Missouri, USA. 2009.

GOODELL, C. R. **A Probabilistic Approach to Dam Breach Modeling**. II European Conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012. Netherlands. 2012.

GOODELL, C.R. & FROEHLICH, D.C. **Comparison of Dam Breach Flood Uncertainty Calculations**. In: Presentation, United States Society on Dams 2012, New Orleans, Louisiana, April, 2012.

GOODELL, C. R. **Moving Towards Risk-Informed Dam Breach Modeling**. Dam Safety 2013 Conference. Providence, RI, USA. 2013.

GOODELL, C. R.; RAEBURN, R.; KARKI, A.; JOHNSON, D.; MONK, S.; LEE, A. **Probabilistic Dam Breach Modeling using HEC-RAS and McBreach**. USSD Annual Conference and Exhibition. Miami, Florida, USA. 2018.

GOULDBY, B. P.; SAYERS, P. B.; PANZERI, M. C.; LANYON, J. E. **Development and Application of Efficient Methods for the Forward Propagation of Epistemic Uncertainty and Sensitivity Analysis within Complex Broad-Scale Flood Risk System Models**. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 37, n. 7, p. 955-967, 2010.

GRAHAM, W. J. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure**". DSO-99-06. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. 1999.

GREENSHIELDS, B. D.; CHANNING, W.; MILLER, H. **A study of traffic capacity**. In: ANNUAL MEETING OF THE HIGHWAY RESEARCH BOARD HELD AT WASHINGTON, 14., 1934. Washington DC, Estados Unidos. Anais. Estados Unidos: Conselho de Pesquisa Rodoviária. 1935.

GUARDA, A. **Notas Metodológicas na Utilização dos Arquivos de Faces de Logradouros e Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE)**. 10.13140/RG.2.2.25389.10729. 2020.

HARTFORD D.N.D.; BAECHER G.B. **Risk and Uncertainty in Dam Safety**. Thomas Telford Publishing, London. 2004.

HILL, P.; KAVANAGH, C.; LANG, S.; NORTHFIELD, S. **Applications of Simulation Model to Estimate Potential Loss of Life**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 26, 2018. Viena, Áustria. Anais... Paris, França: Comitê Internacional de Grandes Barragens, 2018.

HRW. HR WALLINGFORD. **LSM version 3.2 Technical Reference Guide**. MCT0243-RT001-R02-00. 2021.

HUOKUNA, M. **Determination of the Dam Breach Hydrographs for the Kyrkösjärvi Dam Break Hazard Analysis**. Finnish Environment Institute. Finlândia. 2001.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010 - Recorte para Fins Estatísticos: Base de Faces de Logradouros**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias>>. 2010a.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Notas Metodológicas dos Microdados da Amostra**. Rio de Janeiro. 2010b.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Classificação Nacional de Atividades Econômicas –Versão 2.0**. Estrutura detalhada e notas explicativas. Rio de Janeiro. 2010c.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Descrição das Variáveis: Microdados da Amostra do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro. 73p. 2012.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos CNEFE**. Atualização do Setor - Manual do Atualizador. Rio de Janeiro. 89p. 2013a.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010 – Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos: Dicionário das Variáveis (Layout)**. 2013b.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Grade Estatística**. Rio de Janeiro. 31p. 2016.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População em Áreas de Risco no Brasil**. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro. 91 p. 2018a.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Confidencialidade no IBGE: Procedimentos Adotados na Preservação do Sigilo das Informações Individuais nas Divulgações de Resultados das Operações Estatísticas**. Rio de Janeiro. 89p. 2018b.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Confidencialidade no IBGE: Procedimentos Adotados na Preservação do Sigilo das Informações Individuais nas Divulgações de Resultados das Operações Estatísticas**. Rio de Janeiro. 89p. 2018b.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Coordenadas geográficas dos endereços no Censo Demográfico 2022: Nota Metodológica n. 01**. Rio de Janeiro. 26p. 2024.

ICOLD. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Lessons from Dam Incidents**. Paris. 1974.

ICOLD. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam Safety Guidelines**. Bulletin 59. Paris. 1987.

ICOLD. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam Failures Statistical Analysis**. Bulletin 99. Paris, 1995.

ICOLD. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam Break Flood Analysis and recommendations**. Bulletin 111. Paris. 1998.

ICOLD. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Bulletin 188. Incident Database** – Bulletin 99 Update: Statistical Analysis of Dam Failures. Final Draft. Paris. 2019.

ICOLD. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Current State-of-Practice in Risk-Informed Decision-Making for the Safety of Dams and Levees**. Bulletin 189. Paris. 2021.

JICA. JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. **Levantamento Topobatimétrico no Rio Itajaí-Açú e Seus Principais Afluentes**. Executante: Topografia Terra Brasil LTDA. N° Desenhos: 0004\_IS-2010-07, 0005\_IS-2010-07 e 0006\_IS-2010-07. 2010.

JOHNSTONE, W. M.; SAKAMOTO, D.; ASSAF H.; BOURBAN, S. **Architecture, Modeling Framework and Validation of BC Hydro's Virtual Reality Life Safety Model**. ISSH – Stochastic Hydraulics 2005. Nijmegen, The Netherlands, May 23-24, 2005

JONKMAN, S. N. **Loss of Life Estimation in Flood Risk Assessment; Theory and Applications**. 360f. Tese. Universidade de Tecnologia de Delft. Holanda. 2007.

JONKMAN, S. N.; MAASKANT, B.; KOLEN, B.; NEEDHAM; J. T. J. **Loss of Life Estimation - Review, Developments and Challenges**. European Conference on Flood Risk Management. 3., 2016. Lyon, França. Anais..., Les Ulis, França: E3S Web of Conferences, 2016.

KLEINSCHMIDT – KLEINSCHMIDT ASSOCIATES. **McBreach: Probabilistic Dam Breach Modeling - User's Manual**. Version 5.0.7. Portland, Oregon, USA. 2019a.

KLEINSCHMIDT – KLEINSCHMIDT ASSOCIATES. **Probabilistic Dam Breach Analysis — The Future of Dam Safety is Here**. Dams & Levees Bulletin. United States Society on Dams (USSD). Summer 2019. Issua no.178. 2019b.

KUHLKAMP, J. F. **Análise do Efeito em Cascata da Propagação da Onda de Cheia Gerada pelo Rompimento Hipotético de uma das Barragens Existentes no Rio Irani - SC.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2016.

LARA, P. G. D. **Metodologia Probabilística de Previsão de Brechas de Ruptura de Barragens.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2016.

LARA, P. G. D., LOHN, J. D. L. **Em busca de um Plano de Emergência Efetivo.** XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019.

LEITE, H. L. **Georreferenciando Dados de Uso do Solo: Um Método Para a Espacialização do CNEFE.** 2ª Jornada de Morfologia e Modelagem Urbana. Pelotas, RS. 2013.

LEITE, H. L. **Métodos de Modelagem e Análise Urbana Baseados em Dados Desagregados.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional. Porto Alegre. BRRS. 2015.

LINDELL, M., PERRY, R. **Communicating Environmental Risk In Multiethnic Communities.** Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc. 2004.

LINDELL, M.K., PRATER, C.W., PERRY, R.W. & WU, J.Y. **EMBLEM: An Empirically-Based Large Scale Evacuation Time Estimate Model.** College Station TX: Texas A&M University Hazard Reduction & Recovery Center. 2002.

LUMBROSO, D.; SAKAMOTO, D.; JOHNSTONE, W.; TAGG, A.; LENCE, B. L. **The Development of a Life Safety Model to Estimate the Risk Posed to People by Dam Failures and Floods.** Dams and Reservoirs. 2011.

LUMBROSO, D.; DAVISON, M.; BODY, R.; PETKOVSEK, G. **Modelling the Brumadinho Tailings Dam Failure, the Subsequent Loss of Life and How it Could Have Been Reduced.** Natural Hazards and Earth System Sciences 21, pp. 21 – 37. 2021.

MACDONALD, T. C.; J. LANGRIDGE-MONOPOLIS. **Breaching Characteristics of Dam Failures.** Journal of Hydraulic Engineering. 110(5), 576-586. ASCE. 1984.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2017.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas - Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil.** Disponível em: < <http://mapbiomas.org>>. Acesso em: jun. 2022

MAHMASSANI, HANI, S., J. DONG, J. KIM, and R. CHEN. **Incorporating Weather Impacts in Traffic Estimation and Prediction Systems.** U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. September. 2009.

MATOS, C. S.; ELEUTÉRIO, J. C. **Análise de Perdas de Vidas Associadas à Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão**. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019.

MAXIMA. MAXIMA ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Levantamento de Campo na Bacia do Rio Itajaí - Levantamento do Zero das Réguas**. MAX-PRRL-0014-03. 2017a.

MAXIMA. MAXIMA ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Levantamento de Campo na Bacia do Rio Itajaí - Caracterização das Pontes de Concreto e de Madeira**. MAX-PRRL-0014-02. 2017b.

MCCLELLAND, D. M.; BOWLES D. S. **Life-Loss Estimation: What Can We Learn from Case Histories**. In: Proc. of the Australian Committee on Large Dams (ANCOLD) Annual Meeting. Jindabyne, New South Wales, Australia. 1999

MCCLELLAND, D. M.; BOWLES, D.S. **Estimating Life Loss for Dam Safety and Risk Assessment: Lessons from Case Histories**. In Proceedings of the 2000 Annual USCOLD Conference, U. S. Society on Dams (formerly U. S. Committee on Large Dams), Denver, CO. 2000.

MCCLELLAND, D. M.; BOWLES D. S. **Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Assessment – A Review and New Approach**. IWR report 02-R-3. 2002.

MEDEIROS, C. H. **Curso Segurança De Barragens: Unidade 1: Diretrizes, Legislação e Regulamentação**. Fundação Parque Tecnológico Itaipu; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; Ministério do Meio Ambiente. Brasília. 2020.

NASCIMENTO, M. A. G., SILVA. A. F. R., MELO. M. S. F., ELEUTÉRIO, J. C. **Aplicação do HEC-RAS 2D e LifeSim para Modelagem Hidrodinâmica e Estimativa de Perdas de Vida Associadas à Ruptura da Barragem B-I**. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, SE. 2023.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I: A Discussion of Principles**. Journal of Hydrology. 10 (3): 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6. 1970.

NAVA, F. R. **Pequenas Barragens: Uma oportunidade de Desenvolvimento Científico, Técnico e Regulamentador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental). Campus Universitário de Tucuruí. Universidade Federal do Pará. Tucuruí. 2018.

NEVEZ, L. P. **Segurança de Barragens – Legislação Federal Brasileira em Segurança de Barragens Comentada**. Brasília. 2018.

NPDM. NATIONAL PERFORMANCE OF DAMS PROGRAM. **Dam Incident Query**. Stanford University. 2011. Disponível em: <[http://npdp.stanford.edu/dam\\_incidents](http://npdp.stanford.edu/dam_incidents)>.

NSC TOTAL. **Fotos Aéreas Mostram Volume de Água na Barragem de Ituporanga**. Disponível em: <<https://www.nsctotal.com.br/noticias/fotos-aereas-mostram-volume-de-agua-na-barragem-de-ituporanga>>. Acesso em: 12/12/2021.

OLIVEIRA, J. L. B. Rompimento das Barragens nas Cidades de Mariana e de Brumadinho do Estado de Minas Gerais: um Exame Crítico do Papel do Estado na Prevenção do Crime Ambiental. Dissertação (Mestrado em Criminologia). Universidade Fernando Pessoa. Portugal, 2021.

OMNR. ONTARIO MINISTRY OF NATURAL RESOURCES. **River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit**. Technical Guide. Water Resources Section. Peterborough, Ontario, Canada. 2002.

OMNR. ONTARIO MINISTRY OF NATURAL RESOURCES. **Classification and Inflow Design Flood Criteria**. Technical Bulletin. Peterborough, Ontario, Canada. 2011.

PEREIRA, J. V. A.; ZANANDREZ, G.; BEZERRA, R. P. G.; ELEUTÉRIO, J. C.; SILVA, A. A. C. L. **Simulação de Hidrogramas Probabilísticos de Ruptura de Barragens Considerando-se Limites Geométricos do Terreno Natural na Definição de Brechas Potenciais**. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, Sergipe. 2023

PLUMEJEAUD, C.; PRUD'HOMME, J; DAVOINE, P. A.; GENSEL, J. **ICCSA'10 Proceedings of the 2010 international conference on Computational Science and Its Applications - Volume Part I**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 2010.

PORTO-SALES, A. L.; COUTO, E. M. J.; WHITACKER, A. M. *et al.* **Pesquisa em Geografia Urbana: Desafios e Possibilidades de Análise Espacial com o Uso do Cadastro Nacional de Endereços Para Fins Estatísticos (CNEFE)**. CPG - Caderno Prudentino de Geografia. Presidente Prudente. n.36, v.2, p.81-103. 2014.

RESCDAM. **Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis**. Coordinator: Finnish Environment Institute. Grant Agreement No Subv 99/52623. 2001.

RISHER, P., ACKERMAN, C., MORRILL-WINTER, J., FIELDS, W., NEEDHAM, J. **Levee Breach Consequence Model; Validated by Case Study in Joso, Japan**. Association of State Dam Safety Conference, 10. San Antônio, Estados Unidos. 2017.

SALES, C. M. **Modelagem para a Estimativa de Danos Causados aos Domicílios por Rompimento de Barragens: Uma Aplicação do Modelo HEC-FIA ao Evento de Fundão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2020.

SANETAL. SANETAL ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Arranjo Geral do Empreendimento – Seções: Prancha 1/2**. Projeto Executivo de Alçamento da Barragem Sul. Departamento Estadual de Infraestrutura. SAN-BAS-E-GEDE-C02-0001. Revisão 2. Cliente: Secretaria de Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. Florianópolis. 2013a.

SANETAL. SANETAL ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Arranjo Geral do Empreendimento – Seções: Prancha 2/2**. Projeto Executivo de Alçamento da Barragem Sul. Departamento Estadual de Infraestrutura. SAN-BAS-E-GEDE-C02-0002. Revisão 0. Cliente: Secretaria de Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. Florianópolis. 2013b.

SCHAEFER, M.G. **Dam Safety Guidelines, Technical Note 1: Dam Breach Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification**. Washington State Department of Ecology. Publication N° 92-55E. 1992.

SDS. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL. **Nota Explicativa Sobre os Dados Disponíveis na Plataforma SIGSC**. Secretaria Executiva de Meio Ambiente. Estado de Santa Catarina. Florianópolis. 2016a.

SDS. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL. **Metadados para Compor as Informações Contidas na Plataforma do SIGSC**. Secretaria Executiva de Meio Ambiente. Estado de Santa Catarina. Florianópolis. 2016b.

SF. SENADO FEDERAL. **Projeto de Lei nº 550, de 2019**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, para reforçar a efetividade da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, para dotar de novos instrumentos o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) no exercício de sua atribuição de zelar pela implementação da PNSB. Brasília. 2019.

SHAHNIM, M. F.; ROS, F. C. **Dam Break Analysis of Temenggor Dam Using HEC-RAS**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. VII AUN/SEED Net Regional Conference on Natural Disaster. Kuala Lumpur, Malaysia. 2020.

SILVA, A. F. R.. **Análise da Aplicabilidade de Modelos de Estimativa de Perdas de Vidas para Inundações Provenientes de Rupturas de Barragens de Rejeitos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2020.

SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C.; NASCIMENTO, N. O. **Análise de exposição da população do vale a jusante da barragem da Lagoa da Pampulha a inundações – Belo Horizonte/MG**. In: Encontro Nacional de Desastres, 2. ABRH. 2020.

SILVA, T. Z.; KOBIYAMA, M.; SAITO, S. M.; GOERL, R. F. **HEC-LifeSim: Revisão Teórica e Aplicações para Estimativa de Perda de Vida no Cenário Brasileiro**. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2021.

SMITH G. P., DAVEY E. K., COX R. J. **Flood Hazard**. University of New South Wales. Australia Water Research Laboratory. Technical Report 2014/07. 2014.

SORENSEN, J.; MILETI, D. **First Alert and/or Warning Issuance Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping**. Draft paper prepared for U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Risk Management Center. Davis, California, 2014a.

SORENSEN, J.; MILETI, D. **First Alert or Warning Diffusion Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases and Levee Breaches or Overtopping**. Draft paper prepared for U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Risk Management Center. Davis, California, 2014b.

SORENSEN, J.; MILETI, D. **Protective Action Initiation Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping**. Draft paper prepared for U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Risk Management Center. Davis, California, 2014c.

SORENSEN, J.; MILETI, D. **Interview Schedule – Community Warning Issuance, Diffusion, and Protective Action Initiation Estimation**. Draft paper prepared for U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Risk Management Center. Davis, California, 2015a.

SORENSEN, J.; MILETI, D. **Influence Weights and Measures for the Factors Shaping First Alert/Warning Delay, Diffusion and Protective Action Initiation Curves for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping**. Draft paper prepared for U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Risk Management Center. Davis, California, 2015b.

SOUZA, D. H. C. **Análise Probabilística e de Sensibilidade dos Parâmetros de um Estudo de Rompimento Hipotético: Barragem de Terra**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2016.

TEIXEIRA, C. A. **Comunicação Pública e Estratégias de Respostas em Situações de Crise nos Desastres em Mariana e Brumadinho: a atuação da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, do Estado de Minas Gerais, e da Agência Nacional de Mineração**. Observatorio (OBS\*), 17(4). 2023.

TOMURA, S., CHIBA, M., YAMAMOTO, T., UEMURA, F., MASUYA, S., OMURA, N., YOSHIDA, T., TAKEDA, A., HOSHINO, T., YAMADA, T., AND NAKATSUGAWA, M.: **Fatality Estimation by Life Loss Evaluation Model for the Large-Scale Floods under Future Climate**. 22nd Congress of the International Association for Hydro- Environment Engineering and Research-Asia Pacific. 2020.

TSCHIEDEL, A. F. **Avaliação de Incertezas em Estudos de Rompimento de Barragens**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2017.

TSCHIEDEL, A. F.; PAIVA, R. C. D. **Uncertainty Assessment in Hydrodynamic Modeling of Floods Generated by Dam Break**. Brazilian Journal of Water Resources, v. 23, e30. Porto Alegre, RS. 2018.

TSCHIEDEL, A. F.; TASSINARI, L. C. S.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Barragens E Rompimentos: Compilação Histórica Nacional e Internacional**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná. 2019.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2004.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Business Depth-Damage Analysis Procedures**. Research Rep. 85-R-5, Institute for Water Resources, USACE, Alexandria, VA. 1985.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Risk Assessment for Dam Safety**. Dam Failure Analysis Toolbox. Davis, USA. 2007.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Hydrologic Engineering Center. TD-39. Davis, USA. 2014.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Version 5.0. Hydrologic Engineering Center. CPD-69. California. Davis, EUA. 2016.

USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-FIA Flood Impact Analysis Technical Reference Manual**. USA. 2018.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Modeler Application Guidance for Steady vs Unsteady, and 1D vs 2D vs 3D Hydraulic Modeling**. Hydrologic Engineering Center. California. TD-41. Davis, EUA. 2020a.

USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-LifeSim: Life Loss Estimation - Technical Reference Manual**. Version 2.0. CPD-97a. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California, USA. 236p. 2020b

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Version 6.0. Hydrologic Engineering Center. CPD-69. California. Davis, EUA. 2021.

USACE–RCM. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – RISK MANAGEMENT CENTER'S. Warning and Mobilization Curve Generator. Version 1.12. Disponível em: <<https://www.rmc.usace.army.mil/Software/LifeSim/>>. Acesso em: 15/08/2022.

USBR. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION ENGINEERING. **Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decision-making**. Denver: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Engineering. 1989.

USBR. UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. **RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology: Guidelines for Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Analysis**. Denver, Colorado, 2015

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION; USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis**. Version 4.1. 2019.

USDHS. US DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. **Dams Sector: Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios**. Washington, D.C., 2011.

VERÓL, A. P. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional.** Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010

VIEIRA, G. N. B.; ELEUTÉRIO, J. C. **Aplicação do Mcbreach para Avaliação Probabilística de Inundações Potenciais Decorrentes da Ruptura de uma Barragem em Função de Parâmetros de Brecha.** XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Belo Horizonte, MG. 2021.

VON THUN, J. L.; GILLETTE. D. R. **Guidance on Breach Parameters.** Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. 1990.

WAHL, T.L. **Uncertainty of Prediction of Embankment Dam Breach Parameters,** ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol 130, No. 5, pp 389-397. 2004.

WAHL, T. L. **Dam Breach Modeling – An Overview of Analysis Methods.** Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling. Las Vegas, Nevada, USA. 2010.

WATSON D.; SERRER M.; CROOKSHANK N. **BC Hydro Life Safety Model – A Two Dimensional Model for Estimating Dam Breach Survival Probabilities.** Draft Technical Report Canadian Hydraulics Centre. 2001.

WB. WORLD BANK. **Technical Note 5: Potential Failure Mode Analysis.** Good Practice Note on Dam Safety. Global Water Security & Sanitation Partnership. 2021.

ZAGONJOLLI, M. **Dam Break Modelling, Risk Assessment and Uncertainty Analysis for Flood Mitigation.** Thesis (Doctorate in Water Resources). Institute for Water Education. UNESCO Organization. Delft, Netherlands. 2007.

ZHEN-GANG, J. **Hydrodynamics and Water Quality – Modeling Rivers, Lakes and Estuaries.** Ed Wiley. 2008.

## APÊNDICE A – Resumo de Resultados da APRM Conduzida para a Barragem Sul

Os resultados da APRM conduzida para Barragem Sul serão apresentados de forma resumida no presente apêndice. Importante destacar que a APRM é um processo informal desenvolvido a partir da contribuição compartilhada de uma equipe. Seu objetivo não é a confecção de um documento de tomada de decisão, mas sim a geração de um material informativo que se destina a uso e referência para os anos futuros.

A visita técnica de especialistas a Barragem Sul ocorreu em julho de 2021, junto a execução de uma inspeção visual especial da estrutura. O *workshop* para identificação sistemática dos potenciais modos de ruptura incluiu a participação de uma equipe de diferentes especialistas, representados pelas Gerências de Manutenção e Operação, de Mitigação e de Monitoramento Hidrológico da Defesa Civil de Santa Catarina (DCSC), órgão responsável pela operação e manutenção da estrutura. A identificação e classificação dos potenciais modos de falha foi conduzida, primeiramente, pela criação de uma grande lista de hipóteses por processo de *brainstorming* (Quadro A1 e Quadro A2). Posteriormente, os principais modos de falha foram selecionados e elencados em uma pequena lista de destaque, em função do tipo de evento iniciador e da estrutura de ocorrência (Quadro A3).

Descrição dos Eventos/Condições avaliadas:

- **Condições Normais** (nível de água normal, instabilidade estrutural, entre outros);
- **Envelhecimento ou Deterioração** (reações álcali-agregado, corrosão, erosão interna, entre outros);
- **Condições de Inundação** (níveis elevados de água, descarga do vertedouro, galgamento, entre outros);
- **Outras Condições Significativas** (acúmulo de detritos, assoreamento, fatores humanos, entre outros).

Categorização dos potenciais modos de falha:

- **Categoria I** – Destacados como de maior importância e que são razoáveis e credíveis;
- **Categoria II** – Considerados credíveis, mas não destacados;
- **Categoria III** – Mais informações e análises são necessárias para sua classificação;
- **Categoria IV** – Descartado por não ser fisicamente possível ou possibilidade tão remota que não é credível.

Quadro A1 – Listagem dos potenciais modos de falha baseado em brainstorming

Potencial Modo de Falha	Evento/Condição	Categorização
Erosão interna / <i>piping</i> causados por infiltração e carreamentos de finos junto a região de contato da barragem de terra com as galerias de fundo de concreto.	Envelhecimento ou Deterioração	I
Erosão interna / <i>piping</i> causados por filtros inadequados ou falha dos drenos.	Envelhecimento ou Deterioração	III
Erosão interna / <i>piping</i> causados por orifícios no corpo do aterro formados por raízes ou tocas de animais / insetos.	Envelhecimento ou Deterioração	IV
Erosão interna / <i>piping</i> causados por rachaduras internas ou fraturas hidráulicas do maciço de terra.	Envelhecimento ou Deterioração	IV
Deterioração da superfície de concreto das galerias de fundo devido a recorrente passagem de detritos em função dos danos as grades de separação na entrada do emboque, levando a ocorrência de vazamentos e de um processo de erosão regressiva.	Envelhecimento ou Deterioração	I
Instabilidade do talude do barramento devido a ocorrência de movimentos sísmicos.	Condições Normais	III
Instabilidade da seção de concreto do vertedouro.	Condições Normais	III
Instabilidade do talude do barramento principal devido ao processo de assentamento, levando a diminuição da borda livre disponível.	Condições de Inundação	IV
Instabilidade do talude da margem direita (Barragem Fusível).	Condições de Inundação	I
Galgamento devido a obstrução do vertedouro.	Condições de Inundação	II
Falha / vazamento no sistema hidráulico das comportas de fundo, provocando inundação da casa de máquinas e aumento da pressão interna sobre as galerias de fundo. A pressão e a velocidade de escoamento, associado a passagem de detritos, levariam a ocorrência de vazamentos sobre a camada de concreto das galerias de fundo, implicando em um processo de erosão regressiva.	Outras Condições Significativas	II

Quadro A2 – Resumo da lista dos potenciais modos de falha

Evento/Condição	Número de Potenciais Modos de Falha por Categoria				Total
	I	II	III	IV	
Envelhecimento ou Deterioração	2	–	1	2	5
Condições Normais	–	–	2	–	2
Condições de Inundação	1	1	–	1	3
Outras Condições Significativas	–	1	–	–	1
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>11</b>

Nota: “–” = não disponível

Quadro A3 – Destaque dos potenciais modos de falha identificados

Evento/Condição	Estrutura	Potencial Modos de Falha	Consequências Potenciais
Envelhecimento ou Deterioração	Galerias de Fundo	<i>Piping</i> causado por processo de infiltração e carreamentos de finos junto a região de contato	Processo de <i>piping</i> progride através do núcleo do barramento levando a abertura

<b>Evento/Condição</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Potencial Modos de Falha</b>	<b>Consequências Potenciais</b>
		da barragem de terra com as galerias de fundo de concreto.	de uma brecha de ruptura sobre o barramento principal.
Envelhecimento ou Deterioração	Galerias de Fundo	Deterioração da superfície de concreto das galerias de fundo devido a recorrente passagem de detritos em função dos danos as grades de separação na entrada do emboque, levando a ocorrência de vazamentos e de um processo de erosão regressiva.	Processo de erosão regressiva atinge a face de montante do barramento levando a levando a abertura de uma brecha de ruptura sobre o barramento principal.
Condições de Inundação	Barragem Fusível	Instabilidade Barramento “Fusível” devido a diminuição do fator de segurança, em função da passagem de um evento de cheia com elevação do NA e posterior esvaziamento rápido do reservatório.	Processo de instabilidade do Barramento “Fusível” leva a um colapso dos taludes provocando a ocorrência de uma brecha de ruptura na região da ombreira direita da Barragem Sul.

## APÊNDICE B – Variáveis Seleccionadas das Amostras de Domicílios e Pessoas dos Microdados do Censo Demográfico

Quadro B1 – Variáveis notáveis da amostra de domicílios, presentes nos microdados do universo do censo demográfico de 2010 do IBGE, para aplicação no modelo HEC-LifeSim

Código IBGE	Variável	Subcódigo	Classificação Informação / Descrição
V4001	Espécie	01	Domicílio particular permanente ocupado
		02	Domicílio particular permanente ocupado sem entrevista realizada:
		05	Domicílio particular improvisado ocupado:
		06	Domicílio coletivo com morador:
V4002	Tipo de espécie	11	Casa
		12	Casa de vila ou em condomínio
		13	Apartamento: quando localizado em edifício
		14	Habitação em: casa de cômodos, cortiço ou cabeça de porco
		15	Oca ou maloca
		51	Tenda ou barraca
		52	Dentro do estabelecimento
		53	Outro (vagão, trailer, gruta, etc.):
		61	Asilo, orfanato e similares com morador
		62	Hotel, pensão e similares com morador
		63	Alojamento de trabalhadores com morador
		64	Penitenciária, presídio e casa de detenção com morador
65	Outro com morador		
V0202	Material predominante, paredes externas	1	Alvenaria com revestimento
		2	Alvenaria sem revestimento
		3	Madeira apropriada para construção (aparelhada)
		4	Taipa revestida
		5	Taipa não revestida
		6	Madeira aproveitada
		7	Palha
		8	Outro material
		9	Sem parede
V0221	Motocicleta para uso particular, existência	1	Sim
		2	Não
V0222	Automóvel para uso particular, existência	1	Sim
		2	Não
V0401	Morador, número	-	“Número total de moradores (homens e mulheres) por domicílio.”
V0010	Peso	-	“Fator de expansão que representa o número de unidades da população-alvo que a amostra representa.”
V0011	Área de Ponderação	-	“Menor unidade geográfica de identificação dos microdados da amostra.”

Fonte: Adaptado de IBGE (2012a)

Quadro B2 – Variáveis notáveis da amostra de pessoas, presentes nos microdados do universo do censo demográfico de 2010 do IBGE, para aplicação no modelo HEC-LifeSim

Código IBGE	Variável	Subcódigo	Classificação Informação / Descrição
V6036	Idade calculada em anos	-	“Idade da pessoa em anos completos na data de referência da pesquisa.”
V0614	Dificuldade permanente de enxergar	1	Sim, não consegue de modo algum
		2	Sim, grande dificuldade
		3	Sim, alguma dificuldade
		4	Não, nenhuma dificuldade
		9	Ignorado
V0615	Dificuldade permanente de ouvir	1	Sim, não consegue de modo algum
		2	Sim, grande dificuldade
		3	Sim, alguma dificuldade
		4	Não, nenhuma dificuldade
		9	Ignorado

Código IBGE	Variável	Subcódigo	Classificação Informação / Descrição
V0616	Dificuldade permanente de caminhar ou subir degraus	1	Sim, não consegue de modo algum
		2	Sim, grande dificuldade
		3	Sim, alguma dificuldade
		4	Não, nenhuma dificuldade
		9	Ignorado
V0617	Deficiência mental/intelectual permanente	1	Sim
		2	Não
		9	Ignorado
V0628	Frequenta escola ou creche	1	Sim, pública
		2	Sim, particular
		3	Não, já frequentou
		4	Não, nunca frequentou
V0629	Curso que frequenta	1	Creche
		2	Pré-escolar (maternal e jardim de infância)
		3	Classe de alfabetização
		4	Alfabetização de Jovens e Adultos
		5	Regular do Ensino Fundamental
		6	Educação de Jovens e Adultos (EJA) ou Supletivo Fundamental
		7	Regular do Ensino Médio
		8	Educação de Jovens e Adultos (EJA) ou Supletivo Ensino Médio
		9	Superior de Graduação
		10	Especialização de Nível Superior
		11	Mestrado
		12	Doutorado
		“Branco”	“Não frequenta e/ou nunca frequentou escola ou creche.”
V0630	Série/ano que frequenta	1	Primeiro ano
		2	Primeira série/Segundo ano
		3	Segunda série/Terceiro ano
		4	Terceira série/Quarto ano
		5	Quarta série/Quinto ano
		6	Quinta série/Sexto ano
		4	Sexta série/Sétimo ano
		7	Sétima série/Oitavo ano
		9	Oitava série/Nono ano
		10	Curso não seriado
		“Branco”	“Não frequenta e/ou nunca frequentou escola, creche ou curso Regular do Ensino Médio.”
V0631	Série que frequenta (Ensino Médio)	1	Primeira série
		2	Segunda série
		3	Terceira série
		4	Quarta série
		5	Curso não seriado
		“Branco”	“Não frequenta e/ou nunca frequentou escola, creche ou curso Regular do Ensino Médio.”
V0636	Município e Unidade da Federação ou país estrangeiro que frequenta escola ou creche	1	Neste município
		2	Em outro município
		3	Em país estrangeiro
		“Branco”	“Não frequenta e/ou nunca frequentou escola ou creche”
V6461	Ocupação – Código	-	“A relação dos códigos encontra-se nos anexos auxiliares do dicionário de variáveis dos microdados.” (IBGE, 2012b)
V6471	Atividade – Código		“A relação dos códigos encontra-se nos anexos auxiliares do dicionário de variáveis dos microdados.” (IBGE, 2012b)
V0660	Em que município e Unidade da Federação ou país estrangeiro trabalha	1	No próprio domicílio
		2	Apenas neste município, mas não no próprio domicílio
		3	Em outro município
		4	Em país estrangeiro
		5	Em mais de um município ou país

<b>Código IBGE</b>	<b>Variável</b>	<b>Subcódigo</b>	<b>Classificação Informação / Descrição</b>
		“Branco”	<i>“Menor de 10 anos de idade; Não trabalhou ganhando remuneração; Não tinha algum trabalho remunerado; Não trabalhou na plantação, criação de animais, somente para alimentação dos moradores.”</i>
V0661	Retorna do trabalho para casa diariamente	1	Sim
		2	Não
		“Branco”	<i>“Menor de 10 anos de idade; Não trabalhou ganhando remuneração; Não tinha algum trabalho remunerado; Não trabalhou na plantação, criação de animais, somente para alimentação dos moradores; Trabalhava no próprio domicílio; Trabalhava em mais de um município ou país.”</i>
V6930	Posição na ocupação e categoria do emprego no trabalho principal	1	Empregados com carteira de trabalho assinada
		2	Militares e funcionários públicos estatutários
		3	Empregados sem carteira de trabalho assinada
		4	Conta própria
		5	Empregadores
		6	Não remunerados
		7	Trabalhadores na produção para o próprio consumo
		“Branco”	<i>“Menor de 10 anos de idade; Não trabalhou ganhando remuneração; Não tinha algum trabalho remunerado; Não trabalhou na plantação, criação de animais, somente para alimentação dos moradores.”</i>
V6940	Subgrupo e categoria do emprego no trabalho principal	1	Trabalhadores domésticos com carteira de trabalho assinada
		2	Trabalhadores domésticos sem carteira de trabalho assinada
		3	Demais empregados com carteira de trabalho assinada
		4	Militares e funcionários públicos estatutários
		5	Demais empregados sem carteira de trabalho assinada
		“Branco”	<i>“Menor de 10 anos de idade; Não trabalhou ganhando remuneração; Não tinha algum trabalho remunerado; Não trabalhou na plantação, criação de animais, somente para alimentação dos moradores; Trabalhou como conta própria, empregador ou não remunerado”</i>
V0010	Peso	-	<i>“Fator de expansão que representa o número de unidades da população-alvo que a amostra representa.”</i>
V0011	Área de Ponderação	-	<i>“Menor unidade geográfica de identificação dos microdados da amostra.”</i>

Fonte: Adaptado de IBGE (2012a)

## APÊNDICE C – Tipos de Ocupação adotados no Modelo HEC-LifeSim

Quadro C1 – Definições principais e exemplos dos tipos de ocupação adotados no modelo HEC-LifeSim

Tipo de Ocupação	Definição (HAZUS)	Exemplos Comuns
<b>RESIDENCIAL</b>		
RES1-1SNB	Unifamiliar; 1 andar; sem porão	Casa familiar
RES1-1SWB	Unifamiliar; 1 andar; com porão	Casa familiar
RES1-2SNB	Unifamiliar; 2 andares; sem porão	Casa familiar
RES1-2SWB	Unifamiliar; 2 andares; com porão	Casa familiar
RES1-3SNB	Unifamiliar; 3 andares; sem porão	Casa familiar
RES1-3SWB	Unifamiliar; 3 andares; com porão	Casa familiar
RES1-SLNB	Unifamiliar; dividida em 2 níveis (“splitlevel”); sem porão	Casa familiar
RES1-SLWB	Unifamiliar; dividida em 2 níveis (“splitlevel”); com porão	Casa familiar
RES2	Habitação pré-fabricada	Trailer; Casas móvel
RES3A	Multifamiliar; 2 unidades	Duplex; Casa com aluguel no local
RES3B	Multifamiliar; 3 a 4 unidades	Apartamentos; Condomínios
RES3C	Multifamiliar; 5 a 9 unidades	Apartamentos; Condomínios
RES3D	Multifamiliar; 10 a 19 unidades	Apartamentos; Condomínios
RES3E	Multifamiliar; 20 a 49 unidades	Apartamentos; Condomínios
RES3F	Multifamiliar; mais de 50 unidades	Apartamentos; Condomínios
RES4	Alojamento temporário	Hotel; Motel; Albergue
RES5	Dormitório institucional	Escola; Faculdade; Penitenciária
RES6	Asilo	Instalação de cuidados para idosos com equipe
<b>COMERCIAL</b>		
AGR1	Agricultura	Armazenamento de produtos agrícolas; Criação de animais; Escritório; Classificação e embalagem de matéria-prima
COM1	Comercio de varejo	Lojas de departamento; <i>Strip center</i> ; Loja; Shopping
COM2	Comércio atacadista	Armazém; Centro de distribuição
COM3	Serviços pessoais e de reparo	Posto de gasolina; Salão de cabeleireiro
COM4	Serviços profissionais e técnicos	Prédio de escritório; Coworking
COM5	Bancos	Serviços Financeiros
COM6	Hospitais	Salas de emergência; Triagem; Cirurgia (pacientes internados)
COM7	Consultórios médicos e clínicas	Dentista; Clínico geral (pacientes ambulatoriais)
COM8	Entretenimento e recreação	Restaurante
COM9	Centro de eventos	Cinema; Teatro
COM10	Estacionamento	Parque de estacionamento; Garagem (não dedicada a outra construção)
<b>INDUSTRIAL</b>		
IND1	Industrial pesado	Fábrica
IND2	Industrial leve	Armazém
IND3	Alimentos / drogas / produtos químicos	Refinaria de petróleo; Fábrica de processamento de alimentos
IND4	Processamento de metais / minerais	Mineração; Manufatura
IND5	Alta tecnologia	Laboratório de pesquisa e desenvolvimento; Torre de servidores
IND6	Instalações de construção e escritórios	Edifícios em construção; Pátios de material de construção; Escritório de empreiteira
<b>PÚBLICO</b>		
EDU1	Escola e Bibliotecas	Ensino fundamental; Ensino médio; Pré-escola; Escritório administrativo
EDU2	Faculdades e universidades	Sala de aula; Refeitórios; Administração (apostos não residenciais)
GOV1	Governo - serviços gerais	Municipal; Estadual; Repartições públicas federais

<b>Tipo de Ocupação</b>	<b>Definição (HAZUS)</b>	<b>Exemplos Comuns</b>
GOV2	Governo - resposta de emergência	Polícia; Bombeiro; Centro de operação de emergência
REL1	Igrejas e organizações sem fins lucrativos	Igrejas; Templo; Mesquita; Salão sindical (locais de reuniões públicas; uso esporádico)

Fonte: USACE (2020); FEMA (2019); adaptado pelo autor

## APÊNDICE D – Curvas de Emissão do Alerta, Difusão do Alerta e Iniciação da Mobilização

Quadro D1 – Curva de distribuição de probabilidade de atraso na emissão do alerta para a população em risco da Barragem Sul | Distribuição de Lindell | Curva Personalizada | Coeficiente A=1,30; e B=0,97

Tempo para Emissão Após Receber a Notificação [min]	Probabilidade de Atraso na Emissão do Alerta	Tempo para Emissão Após Receber a Notificação [min]	Probabilidade de Atraso na Emissão do Alerta	Tempo para Emissão Após Receber a Notificação [min]	Probabilidade de Atraso na Emissão do Alerta	Tempo para Emissão Após Receber a Notificação [min]	Probabilidade de Atraso na Emissão do Alerta
0	0,0000	92	0,0515	184	0,0076	276	0,0012
2	0,0383	94	0,0495	186	0,0073	278	0,0011
4	0,0766	96	0,0476	188	0,0070	280	0,0011
6	0,1150	98	0,0457	190	0,0068	282	0,0010
8	0,1533	100	0,0437	192	0,0065	284	0,0010
10	0,1916	102	0,0418	194	0,0062	286	0,0010
12	0,2299	104	0,0399	196	0,0059	288	0,0009
14	0,2682	106	0,0382	198	0,0057	290	0,0009
16	0,2814	108	0,0368	200	0,0055	292	0,0009
18	0,2694	110	0,0354	202	0,0053	294	0,0008
20	0,2575	112	0,0340	204	0,0051	296	0,0008
22	0,2455	114	0,0326	206	0,0049	298	0,0007
24	0,2335	116	0,0312	208	0,0047	300	0,0007
26	0,2216	118	0,0298	210	0,0044	302	0,0007
28	0,2096	120	0,0284	212	0,0043	304	0,0007
30	0,1977	122	0,0274	214	0,0041	306	0,0006
32	0,1901	124	0,0264	216	0,0040	308	0,0006
34	0,1825	126	0,0254	218	0,0038	310	0,0006
36	0,1750	128	0,0243	220	0,0037	312	0,0006
38	0,1674	130	0,0233	222	0,0035	314	0,0005
40	0,1599	132	0,0223	224	0,0033	316	0,0005
42	0,1523	134	0,0213	226	0,0032	318	0,0005
44	0,1447	136	0,0204	228	0,0031	320	0,0005
46	0,1383	138	0,0197	230	0,0030	322	0,0005
48	0,1331	140	0,0189	232	0,0029	324	0,0004
50	0,1278	142	0,0182	234	0,0028	326	0,0004
52	0,1225	144	0,0174	236	0,0026	328	0,0004
54	0,1173	146	0,0167	238	0,0025	330	0,0004
56	0,1120	148	0,0160	240	0,0024	332	0,0004
58	0,1067	150	0,0152	242	0,0023	334	0,0004
60	0,1015	152	0,0147	244	0,0022	336	0,0004
62	0,0978	154	0,0141	246	0,0022	338	0,0003
64	0,0940	156	0,0136	248	0,0021	340	0,0003
66	0,0903	158	0,0131	250	0,0020	342	0,0003
68	0,0865	160	0,0125	252	0,0019	344	0,0003
70	0,0828	162	0,0120	254	0,0018	346	0,0003
72	0,0791	164	0,0114	256	0,0017	348	0,0003
74	0,0753	166	0,0110	258	0,0017	350	0,0003
76	0,0721	168	0,0106	260	0,0016	352	0,0003
78	0,0695	170	0,0102	262	0,0016	354	0,0002
80	0,0668	172	0,0098	264	0,0015	356	0,0002
82	0,0641	174	0,0094	266	0,0014	358	0,0002
84	0,0614	176	0,0090	268	0,0014	360	0,0002
86	0,0587	178	0,0086	270	0,0013	-	-
88	0,0561	180	0,0082	272	0,0013	-	-
90	0,0534	182	0,0079	274	0,0012	-	-

Quadro D2 – Curva de distribuição de probabilidade de difusão do alerta para a população em risco da Barragem Sul | Curva Personalizada

Tempo para Recebimento do Alerta Após Emissão [min]	Porcentagem da População em Risco que Recebe o Alerta		
	Limite Inferior	Melhor Estimativa	Limite Superior
0	0,00	0,00	0,00
10	0,34	0,74	2,51
20	1,51	3,51	12,04
30	3,91	9,57	31,10
40	8,05	20,24	56,12
50	14,46	35,78	77,49
60	23,47	54,01	90,09
70	34,92	70,88	95,95
80	47,89	83,37	98,38
90	60,88	91,16	99,35
100	72,36	95,49	99,74
110	81,45	97,75	99,89
120	88,03	98,89	99,96
130	92,48	99,45	99,98
140	95,36	99,73	99,99
150	97,17	99,87	100,00
160	98,28	99,93	100,00
170	98,96	99,97	100,00
180	99,37	99,98	100,00
190	99,62	99,99	100,00
200	99,77	100,00	100,00
210	99,86	100,00	100,00
220	99,92	100,00	100,00
230	99,95	100,00	100,00
240	99,97	100,00	100,00
270	99,99	100,00	100,00
300	100,00	100,00	100,00
360	100,00	100,00	100,00

Quadro D3 – Curva de distribuição de probabilidade de início da mobilização da população em risco alertada para a população em risco da Barragem Sul | Curva Personalizada

Tempo para Mobilização Após Recebimento do Alerta [min]	Porcentagem da População em Risco Alertada que se Mobiliza		
	Limite Inferior	Melhor Estimativa	Limite Superior
0	0,00	0,00	0,00
10	0,09	0,23	0,89
20	0,35	0,92	3,49
30	0,79	2,05	7,63
40	1,40	3,60	13,03
50	2,17	5,55	19,35
60	3,10	7,85	26,22
70	4,19	10,46	33,26
80	5,41	13,34	40,16
90	6,77	16,43	46,64
100	8,25	19,69	52,50
110	9,84	23,06	57,62
120	11,54	26,49	61,95
180	23,08	45,98	74,19
240	35,11	59,54	75,84
300	45,55	66,40	76,58
360	53,35	69,01	77,32
420	58,46	69,89	78,06
480	61,41	70,67	78,80
1.440	86,08	88,36	90,64
4.320	95,60	96,32	97,04

Quadro D4 – Curva de distribuição de probabilidade combinada das etapas de difusão do alerta e início da mobilização para a população em risco da Barragem Sul | Curva Personalizada

Tempo para Recebimento do Alerta e Início da Mobilização Após a Emissão do Alerta [min]	Porcentagem da População em Risco que Recebe o Alerta e se Mobiliza		
	Limite Inferior	Melhor Estimativa	Limite Superior
1	0,16	0,93	3,11
2	2,65	10,66	27,67
3	10,07	28,08	54,87
4	21,40	44,40	68,82
5	33,80	56,08	73,73
6	44,71	63,15	75,56
7	52,75	66,92	76,47
8	58,03	68,89	77,10
9	61,25	70,18	77,77
10	63,20	71,33	78,54
11	64,75	72,46	79,33
12	66,26	73,59	80,12
13	67,76	74,71	80,91
14	69,27	75,84	81,70
15	70,78	76,97	82,49
16	72,29	78,10	83,29
17	73,79	79,22	84,08
18	75,30	80,35	84,87
19	76,81	81,48	85,66
20	78,32	82,61	86,45
21	79,82	83,73	87,24
22	81,33	84,86	88,03
23	82,84	85,99	88,82
24	84,35	87,12	89,61
25	85,71	88,08	90,24
26	86,34	88,45	90,45
27	86,58	88,63	90,59
28	86,78	88,80	90,73
29	86,97	88,96	90,86
30	87,17	89,13	91,00
31	87,37	89,30	91,14
32	87,56	89,46	91,28
33	87,76	89,63	91,42
34	87,95	89,80	91,56
35	88,15	89,96	91,69
36	88,35	90,13	91,83
37	88,54	90,30	91,97
38	88,74	90,46	92,11
39	88,93	90,63	92,25
40	89,13	90,80	92,39
41	89,33	90,96	92,52
42	89,52	91,13	92,66
43	89,72	91,30	92,80
44	89,91	91,46	92,94
45	90,11	91,63	93,08
46	90,31	91,80	93,22
47	90,50	91,96	93,35
48	90,70	92,13	93,49
49	90,89	92,30	93,63
50	91,09	92,46	93,77
51	91,29	92,63	93,91
52	91,48	92,80	94,05
53	91,68	92,96	94,18
54	91,87	93,13	94,32
55	92,07	93,29	94,46
56	92,27	93,46	94,60
57	92,46	93,63	94,74
58	92,66	93,79	94,87
59	92,86	93,96	95,01
60	93,05	94,13	95,15
61	93,25	94,29	95,29
62	93,44	94,46	95,43
63	93,64	94,63	95,57

Tempo para Recebimento do Alerta e Início da Mobilização Após a Emissão do Alerta [min]	Porcentagem da População em Risco que Recebe o Alerta e se Mobiliza		
	Limite Inferior	Melhor Estimativa	Limite Superior
64	93,84	94,79	95,70
65	94,03	94,96	95,84
66	94,23	95,13	95,98
67	94,42	95,29	96,12
68	94,62	95,46	96,26
69	94,82	95,63	96,40
70	95,01	95,79	96,53
71	95,21	95,96	96,67
72	95,40	96,13	96,81

## APÊNDICE E – Quartis e Médias de Estimativa de Fatalidades para os Cenários de Ruptura Simulados

Quadro E1 – Quartis e médias de estimativa de fatalidades para os Cenários C0 a C13 com os eventos de probabilidades de excedência de 99%, 90%, 50%, 10% e 1% e com o evento determinístico (DET)

Cenário   Evento	Estimativa de Fatalidade					
	Menor	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Maior	Média
C0   DET	2578	2862	2904	2941	3094	2896
C0   P01%	2580	2809	2844	2880	2997	2841
C0   P10%	2403	2629	2662	2692	2790	2657
C0   P50%	2224	2464	2502	2540	2662	2497
C0   P90%	2097	2413	2467	2501	2651	2451
C0   P99%	1674	1964	2010	2046	2190	1998
C1   DET	2313	2862	2905	2941	3094	2897
C1   P01%	2232	2807	2842	2877	2997	2838
C1   P10%	2155	2630	2664	2695	2806	2659
C1   P50%	1984	2467	2507	2541	2671	2500
C1   P90%	1918	2419	2467	2505	2651	2454
C1   P99%	1582	1966	2009	2045	2190	2000
C2   DET	2151	2302	2333	2369	2933	2339
C2   P01%	2125	2247	2277	2307	2871	2281
C2   P10%	1976	2087	2120	2150	2643	2123
C2   P50%	1823	1941	1972	2004	2462	1976
C2   P90%	1747	1906	1939	1974	2495	1941
C2   P99%	1332	1499	1534	1565	2010	1534
C3   DET	2628	2936	2974	3013	3165	2969
C3   P01%	2628	2880	2917	2954	3101	2915
C3   P10%	2440	2705	2743	2776	2865	2738
C3   P50%	2282	2548	2589	2625	2729	2581
C3   P90%	2169	2500	2551	2594	2716	2535
C3   P99%	1708	2056	2101	2140	2248	2088
C4   DET	2598	2866	2908	2950	3088	2903
C4   P01%	2575	2816	2851	2883	3043	2847
C4   P10%	2373	2638	2672	2705	2811	2668
C4   P50%	2199	2481	2518	2553	2661	2512
C4   P90%	2136	2432	2479	2518	2633	2466
C4   P99%	1726	1984	2028	2061	2190	2017
C5   DET	2620	2878	2916	2952	3111	2912
C5   P01%	2569	2825	2862	2890	3017	2857
C5   P10%	2427	2647	2678	2712	2817	2677
C5   P50%	2175	2492	2529	2562	2667	2524
C5   P90%	2174	2443	2486	2523	2625	2477
C5   P99%	1769	2007	2045	2080	2212	2038
C6   DET	1205	2432	2755	2901	3108	2626
C6   P01%	1268	2485	2743	2846	2985	2625
C6   P10%	1200	2283	2560	2670	2796	2447
C6   P50%	974	2042	2345	2510	2640	2239
C6   P90%	768	1852	2201	2448	2621	2105
C6   P99%	593	1478	1765	1988	2133	1700
C7   DET	747	2019	2551	2884	3051	2402
C7   P01%	837	2144	2610	2837	2978	2442
C7   P10%	740	1973	2410	2658	2801	2268
C7   P50%	587	1656	2144	2481	2624	2025
C7   P90%	401	1386	1891	2392	2643	1836
C7   P99%	365	1098	1503	1927	2164	1470
C8   DET	2639	2882	2915	2948	3075	2914
C8   P01%	2607	2822	2851	2881	2995	2851
C8   P10%	2392	2643	2674	2702	2812	2672
C8   P50%	2241	2488	2520	2551	2649	2517
C8   P90%	2225	2447	2482	2514	2628	2478
C8   P99%	1762	1992	2024	2056	2167	2022
C9   DET	2217	2734	2845	2917	3056	2808
C9   P01%	2220	2707	2798	2854	2982	2764
C9   P10%	2087	2530	2620	2673	2788	2590
C9   P50%	1856	2343	2452	2516	2671	2414
C9   P90%	1649	2240	2377	2472	2608	2342
C9   P99%	1347	1822	1939	2015	2162	1906
C10   DET	2396	2879	2918	2953	3088	2907

Cenário   Evento	Estimativa de Fatalidade					
	Menor	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Maior	Média
C10   P01%	2330	2818	2852	2884	2997	2842
C10   P10%	2130	2640	2671	2700	2825	2661
C10   P50%	1980	2486	2520	2548	2643	2509
C10   P90%	1955	2454	2487	2521	2646	2476
C10   P99%	1618	1995	2028	2061	2160	2019
C11   DET	2358	2838	2885	2928	3072	2873
C11   P01%	2322	2786	2830	2866	2986	2819
C11   P10%	2130	2605	2649	2688	2798	2640
C11   P50%	1980	2440	2493	2532	2654	2479
C11   P90%	1955	2373	2438	2485	2659	2420
C11   P99%	1571	1930	1989	2030	2158	1974
C12   DET	2347	2890	2923	2955	3116	2921
C12   P01%	2333	2829	2858	2889	2988	2856
C12   P10%	2106	2650	2676	2702	2808	2674
C12   P50%	1919	2496	2527	2556	2650	2523
C12   P90%	2035	2461	2493	2525	2634	2490
C12   P99%	1648	2002	2030	2058	2168	2029
C13   DET	2243	2782	2866	2922	3054	2836
C13   P01%	2280	2743	2810	2858	2986	2785
C13   P10%	2077	2563	2638	2681	2840	2611
C13   P50%	1901	2394	2469	2523	2652	2444
C13   P90%	1754	2315	2415	2483	2639	2381
C13   P99%	1349	1880	1969	2024	2165	1938