

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva

**ANÁLISE DE INCERTEZA DOS PARÂMETROS DE BRECHA APLICADA À
MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO HIDROGRAMA DE RUPTURA DE BARRAGENS
DE TERRA**

Belo Horizonte
2021

Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva

**ANÁLISE DE INCERTEZA DOS PARÂMETROS DE BRECHA APLICADA À
MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO HIDROGRAMA DE RUPTURA DE BARRAGENS
DE TERRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Julian Cardoso Eleutério

Belo Horizonte
2021

S586a	<p>Silva, Ângelo Carmo Luiz da. Análise de incerteza dos parâmetros de brecha aplicada à modelagem probabilística do hidrograma de ruptura de barragens de terra [recurso eletrônico] / Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva. – 2021. 1 recurso online (xvii, 217 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Julian Cardoso Eleutério.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 157-217.</p> <p>Bibliografia: f. 151-156. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Barragens e açudes - Ruptura - Teses. 4. Incerteza - Teses. 5. Barragens de terra - Teses. I. Eleutério, Julian Cardoso. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

["Análise de Incertezas dos Parâmetros de Brecha Aplicada à Modelagem Probabilística do Hidrograma de Ruptura em Barragens de Terra "]

[Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva]

Dissertação de Mestrado] defendida e aprovada, no dia [07 de julho de 2021], pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação **EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**] da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

[Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe] - **Membro Externo**]

[UFSC]

[Prof. Dirceu Silveira Reis Junior] - **Membro Externo**]

[UNB]

[Prof. Francisco Eustáquio Oliveira e Silva - **Membro Interno**]

[UFMG]

[Prof. Veber Afonso Figueiredo Costa - **Membro Interno**]

[UFMG]

[Prof. Julian Cardoso Eleutério - **Orientador**]

[UFMG]

APROVADA PELO COLEGIADO DO PPG SMARH

Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima - Coordenadora

Belo Horizonte, 07 de julho de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Julian Cardoso Eleuterio, Servidor(a)**, em 12/07/2021, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Veber Afonso Figueiredo Costa, Servidor(a)**, em 12/07/2021, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Eustaquio Oliveira e Silva, Professor do Magistério Superior**, em 12/07/2021, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dirceu Silveira Reis Junior, Usuário Externo**, em 14/07/2021, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Luiz Borges Chaffe, Usuário Externo**, em 15/07/2021, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 08/02/2022, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0828309** e o código CRC **0085BAD0**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por ter me proporcionado o suporte para me dedicar aos estudos e hoje estar apresentando este trabalho. Agradeço especialmente meus pais, Maria Lúcia e Ângelo, por serem meus exemplos e representarem o pilar de todo o suporte familiar. Agradeço também meus irmãos, André e Mariana, meus avós Dilermando, Ana, Vicentino e Cecília, tios e primos por integrarem toda essa rede de apoio fundamental. Um agradecimento especial faço a Nina que acompanhou de perto toda essa jornada e ajudou com a leitura de partes do trabalho e com a formatação das referências.

Deixo meu muito obrigado a todos que apoiam o desenvolvimento científico no Brasil. Agradeço aqueles que lutam, as duras penas, por manter a qualidade no ensino superior público do país e por repassar o desejo de desenvolvimento do Brasil através da ciência. A ciência salva vidas.

Gostaria de agradecer ao Orientador desta pesquisa, Julian Cardoso Eleutério, por ter me incentivado a desenvolver o tema e ter apoiado as ideias apresentadas. Agradeço a detalhada verificação do texto e a sugestão de alterações que o tornaram mais robusto e científico. Igual agradecimento faço à banca avaliadora.

Agradeço o Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (PPG-SMARH) da UFMG por todo empenho em manter a excelência e pela instrução técnica proporcionada. Agradeço especialmente os Professores Veber Afonso Figueiredo Costa e Luiz Rafael Palmier pelas avaliações intermediárias do trabalho e ajuda na evolução do mesmo. Agradeço ao Professor Nilo Oliveira Nascimento pelo auxílio no desenvolvimento do projeto de pesquisa, pela oportunidade de estágio em docência e pelo exemplo de professor, pesquisador e pessoa. A todos os outros professores agradeço pelo conhecimento repassado e atenção desprendida nas disciplinas e consultas. Ao Júlio Esteves agradeço pelo suporte administrativo.

Gostaria de agradecer também aos colegas da turma do SMARH 2019/01, principalmente àqueles do departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Agradecimento especial eu faço ao Grupo de Estudos de Inundações pelas

trocas de ideias sobre o trabalho (Luan Vieira e Gabriel Fonseca), ajuda no tratamento da base de dados (Gabriel Rodrigues), aprendizados conjunto no uso do McBreach (Guilherme Vieira), pela parceria em artigos e desenvolvimento do script para amostragem dos parâmetros (Rodrigo Bezerra) e pelas apresentações realizadas e artigos compartilhados.

Agradeço também os colegas engenheiros de recursos hídricos que me proporcionaram as primeiras experiências com o tema de ruptura hipotética de barragens (André Lauriano, Felipe Rocha e Lucas Brasil) e aqueles que me ajudaram durante minha experiência profissional como hidrotécnico e modelador em recursos hídricos (Lorêdo Vianini, Nathália Machado, Lucas Lucena, Gladstone Rodrigues, Cristiano Claus, Carol Águido, Mariana Barrozo, Hêlvio Duarte, Joel Cortez, Clarissa Pinheiro, Bruno Comini, Sabrina Rubinger, Thaís Abrahão, Milena Aguilár, Ana clara, Fernanda Trivelato, Bruna Melo, Lucas Jardim, Roberto Rangel). Agradeço também aos amigos de outras áreas que encontrei durante os anos de consultoria pela Pimenta de Ávila e que contribuíram para expandir o repertório na engenharia. Agradecimento especial faço ao Joaquim Pimenta pela experiência demonstrada e pelos conselhos repassados, sendo o mais marcante “Nunca deixe de estudar”.

Agradeço também outros pesquisadores que me auxiliaram nessa pesquisa com o fornecimento de dados e esclarecimentos. Ao Professor Doutor Robert Michael Boes (ETH Zurich) agradeço pelo fornecimento da base de dados adotada no estudo de caso. A Mayari Bernard-Garcia, agradeço pelos esclarecimentos a respeito da base de dados de casos de ruptura utilizada na pesquisa. Agradeço ao Chris Goodell pelos esclarecimentos a respeito McBreach. Agradeço ao David Froehlich e David Ress Gillette pelo fornecimento de artigos originais de suas pesquisas. Agradeço ao Felipe Pereira Diniz pelo envio de uma série de referências a respeito da erodibilidade em barragens de terra. Ao Adolfo Resende agradeço o envio de sua Dissertação e a Viviane Pinheiro agradeço o envio de sua Tese. Agradeço também a toda comunidade de desenvolvimento de bibliotecas em linguagem R e Phyton e outros softwares livres.

Por fim, agradeço meus amigos que sempre estiveram comigo e me ajudaram a esquecer um pouco do trabalho com momentos diversão, seja pessoalmente ou virtualmente.

RESUMO

A modelagem matemática da ruptura de barragens é complexa e demanda uma série de simplificações. Incertezas são inerentes aos estudos de ruptura hipotética de barragens e essas se propagam para seus resultados, utilizados na elaboração de medidas de gestão de risco de inundação e podem apresentar grande impacto socioeconômico e ambiental.

No presente trabalho, buscou-se estudar as incertezas relacionadas aos parâmetros de brecha de ruptura (largura de fundo, declividade da parede lateral, cota de fundo e tempo de formação) no contexto da modelagem dos hidrogramas defluentes da ruptura de barragens de terra. Um extenso banco de dados, com aproximadamente 4.000 registros de ruptura e compilado por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020) foi analisado e utilizado na estimativa de incertezas dos parâmetros de brecha. Modelos de distribuição de probabilidade foram ajustados às amostras dos parâmetros de brecha para quantificação das incertezas. As amostras foram avaliadas por grupos, tendo sido constatada a interferência do modo de falha na declividade da parede lateral da brecha e a forma da barragem na largura de fundo da brecha. Os modelos de distribuição de probabilidade identificados permitiram a aplicação em um estudo de caso para quantificar as incertezas associadas a vazão de pico dos hidrogramas de ruptura. Em pesquisas futuras, entende-se que esses modelos podem ser utilizados também no desenvolvimento de análises de incertezas na modelagem da propagação hidrodinâmica da onda de inundação e na definição de mapas de inundação probabilísticos.

Diferentes modelos distributivos foram identificados e testados em uma modelagem probabilística da ruptura hipotética da barragem apresentada por ZENZ & GOLDGRUBER (2013). O Método de Monte Carlo foi empregado, considerando como variáveis aleatórias os parâmetros de brecha. O estudo permitiu avaliar as incertezas na estimativa da vazão de pico dos hidrogramas de ruptura. Os resultados obtidos na análise probabilística foram utilizados para estimar as incertezas em modelos determinísticos, sendo observado que esses, em sua maioria, apresentam resultados conservadores.

Palavras-chave: Estudo de Ruptura Hipotética, Brecha de Ruptura, Análise de Incertezas, Análise Probabilística, Hidrograma de Ruptura Probabilístico

ABSTRACT

Dam failure is a complex event not fully understood. The mathematical modeling of the phenomenon requires a myriad of simplifications. It is reasonable to consider that uncertainty is part of dam break studies. These uncertainties are propagated to dam breach results, used in the definition of flood risk management. It has an important socioeconomic and environmental impact due to the large number of dams constructed around the world.

Uncertainty analysis in dam breach is considered a good practice. This study seeks to quantify the uncertainty of earthfill dam breach parameters applied in breach hydrograph estimates. A long database, with almost 4,000 cases and compiled by BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020) was verified to quantify the breach parameters uncertainty. Probability distributions were fitted to breach parameters samples to quantify uncertainties. The samples were analyzed by groups. The results demonstrated that some variables affect parameters behavior. This was the case of failure mode on breach slope and dam shape at bottom width. The probability distributions identified allowed the development of a study case to quantify uncertainties in peak dam breach outflow hydrograph. So, these models can be applied in future researches about this subject and in a construction of probabilistic inundation maps.

Different probability distributions were identified. These were applied in a probabilistic dam breach modeling of the case study developed in ZENZ & GOLDGRUBER (2013). The Monte Carlo Method was used and the breach parameters were considered as random variables. The results allowed to quantify the uncertainty in peak of the breach hydrograph. The results of probabilistic analysis were used to quantify uncertainties in deterministic dam breach modelling being observed that this models are, in majority, conservatives.

Keywords: Dam Break, Dam Breach, Uncertainty Analysis, Probabilistic Analysis, Probabilistic Breach Outflow

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Magnitude das barragens consideradas na concepção de alguns modelos empíricos de predição de brecha de ruptura	23
Figura 2 - Variabilidade das respostas dos modelos de predição de largura de brecha em função da magnitude das barragens e valores observados nos casos históricos	24
Figura 3 – Parâmetros de brecha de ruptura de barragens	29
Figura 4 – Croqui esquemático das alturas de brecha de ruptura e da barragem.....	30
Figura 5 – Croqui esquemático largura de fundo de brecha	31
Figura 6 – Croqui esquemático da declividade da parede lateral da brecha	32
Figura 7 –Fases da formação da brecha de ruptura por erosão interna	35
Figura 8 – Fases da formação da brecha de ruptura por erosão externa	36
Figura 9 – Ruptura da Barragem B1 Córrego do Feijão.....	37
Figura 10 – Divisão aproximada do processo de formação da brecha em função do tipo de material.....	38
Figura 11 – Síntese metodológica de um estudo de ruptura hipotética de barragem	41
Figura 12 – Tipos de progressão da brecha de ruptura adotados em modelos paramétricos estimados a partir da Equação 2	48
Figura 13 – Vista frontal da progressão da brecha na modelagem paramétrica	49
Figura 14 – Hidrograma de ruptura genérico	52
Figura 15 – Controle hidráulico na ruptura	54
Figura 16 – Hidrogramas de ruptura resultantes dos diferentes estudos desenvolvidos para o caso em análise	72
Figura 17 – Resultados da modelagem da brecha de ruptura utilizando o BASEbreach: seleção de dois hidrogramas para representar em detalhe o processo de formação da brecha em detalhe, um representando a ruptura parcial (■) e outro a ruptura total (▲)	73
Figura 18 – Magnitude das barragens rompidas e registradas no banco de dados de referência segundo a classificação do CNRH (2012).....	76
Figura 19 – Box plot amostras dos parâmetros de brecha.....	79
Figura 20 - Fluxograma metodológico da identificação das distribuições de probabilidade de parâmetros de brecha de ruptura de barragens de terra	86

Figura 21 - <i>Box plot</i> da análise da declividade da parede lateral da brecha por grupos	92
Figura 22 - <i>Box plot</i> da análise da razão HB/Hd por grupos	93
Figura 23 - <i>Box plot</i> da análise do tempo de formação da brecha por grupos	94
Figura 24 - <i>Box plot</i> da análise por grupos da razão L_{Bf}/L_{crista}	95
Figura 25 - Histograma das amostras dos parâmetros de brecha extraídas do banco de dados de referência.....	100
Figura 26 - Análise gráfica dos modelos de distribuição para Z (galgamento).....	102
Figura 27 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para Z (erosão interna) ...	103
Figura 28 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para HB/Hd.....	104
Figura 29 – Análise gráfica dos modelos de distribuição adicionais para H_B/H_d	105
Figura 30 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para T_f	107
Figura 31 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens est. total).....	109
Figura 32 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (bar. est. padrão)	110
Figura 33 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. total)	111
Figura 34 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (bar. int. padrão)	112
Figura 35 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens largas)	113
Figura 36 – Fluxograma metodológico aplicado no desenvolvimento do MMC	120
Figura 37 – Visão geral da barragem	124
Figura 38 – Seção longitudinal sem escala do barramento.....	124
Figura 39 – Seção transversal do barramento extraída do MDT fornecido (sem escala)	124
Figura 40 – Curva Cota-Área-Volume da barragem.....	126
Figura 41 – Mapa hipsométrico da região de estudo elaborado a partir do MDT fornecido.....	127
Figura 42 – Vista em perspectiva da área a jusante da barragem	128
Figura 43 – Cobertura e uso do solo na área a jusante da barragem	129
Figura 44 – Modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha..	131

Figura 45 – Arranjo geral do modelo geométrico utilizado na simulação da ruptura hipotética da barragem proposta no estudo de caso.....	133
Figura 46 – Curva de frequência das vazões de pico dos hidrogramas resultantes do MMC.....	136
Figura 47 – Histograma das vazão de pico dos hidrogramas resultantes do MMC.	137
Figura 48 – Correlação entre vazões de pico dos hidrogramas e os parâmetros de brecha	142
Figura 49 – Avaliação dos hidrogramas de ruptura gerados a partir de diferentes iterações que apresentam mesma probabilidade de excedência da vazão de pico	144
Figura 50 – Hidrogramas de ruptura associados a diferentes probabilidades de excedência da vazão de pico	145
Figura 51 – Histogramas da razão ER/H_w observada no banco de dados de referência e resultante da modelagem	147
Figura 52 – Curva de frequências e box plot das vazões de pico dos hidrogramas para as amostras completa e filtrada.....	149
Figura 53 – Modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha adotados na análise comparativa.....	151
Figura 54 – Curva de frequência e box plot das amostras de vazão de pico resultantes do MMC com diferentes modelos distributivo para os parâmetros de brecha	152
Figura 55 – Comparação curva de frequência da vazão de pico do hidrograma de ruptura resultante do MMC aplicado e do LHS proposto do ALTINAKAR et al. (2013)	155
Figura 56 – Comparação resultados Peter, 2017 e MMC desenvolvido	156
Figura 57 – Modelo completo utilizado para a propagação dos hidrogramas a jusante	159
Figura 58 – Propagação dos hidrogramas de ruptura a jusante da barragem	160
Figura 59 – Tempo de chegada da onda associada a diferentes $P (Q > q_p)$	161
Figura 60 – Envoltórias máximas de inundação a jusante associadas a passagem de hidrogramas com diferentes probabilidades de superação da vazão de pico	162
Figura 61 – Níveis de água máximos observados nas seções transversais definidas a jusante resultante da passagem dos hidrogramas de ruptura associados às diferentes probabilidades de superação da vazão de pico do hidrograma	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de valores indicativas para os parâmetros de brecha.....	33
Tabela 2 – Características das barragens utilizadas como referência para o desenvolvimento dos modelos empíricos de predição de brechas de ruptura	46
Tabela 3 – Exemplos de modelos empíricos de predição brechas (equações de previsão).....	47
Tabela 4 – Exemplos de pesquisas que consideram a análise de incertezas nos estudos de ruptura hipotética a partir da aplicação de métodos estatísticos	65
Tabela 5 – Quadro resumo descritivo dos estudos anteriores	71
Tabela 6 – Bancos de dados consultados com informações sobre rupturas de barragens	75
Tabela 7 – Varáveis consideradas na identificação das distribuição de probabilidades	78
Tabela 8 – Estatística descritiva das amostras dos parâmetros de brecha extraídos no banco de dados de referência	78
Tabela 9 - Matriz de correlação dos parâmetros de brecha de ruptura.....	84
Tabela 10 - Bibliotecas disponíveis no repositório R aplicadas na presente etapa ...	86
Tabela 11 - Grupos das variáveis explicativas quantitativas dos parâmetros de brecha	88
Tabela 12 - Síntese de resultados da análise comparativa por grupos (Hipótese nula do Teste de Kruskal-Wallis rejeitada)	90
Tabela 13 - Síntese de resultados da análise comparativa por grupos (Teste de Dunn)	90
Tabela 14 - Informações relativas aos grupos da amostra de Z	92
Tabela 15 - Informações relativas aos grupos da amostra de H_B/H_d	93
Tabela 16 - Informações relativas aos grupos da amostra de T_f	94
Tabela 17 - Informações relativas aos grupos da amostra de L_{Bf}/L_{crista}	95
Tabela 18 – Estatística descritiva das amostras utilizadas no ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha	99
Tabela 19 – Ajuste dos modelos de distribuição para Z (modo de falha por galgamento)	101
Tabela 20 – Ajuste dos modelos de distribuição para Z (modo de falha por erosão interna)	102

Tabela 21 – Ajuste dos modelos de distribuição para H_B/H_d	104
Tabela 22 – Ajuste de modelos de distribuição suplementares para H_B/H_d	105
Tabela 23 – Ajuste dos modelos de distribuição para T_f	106
Tabela 24 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens estreitas total)	108
Tabela 25 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens estreitas padrão).....	109
Tabela 26 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. total)	110
Tabela 27 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. padrão)	111
Tabela 28 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens largas) ..	112
Tabela 29 – Modelos disponíveis no McBreach considerados como de “melhor” ajuste	116
Tabela 30 – Modelos adicionais considerados como de “melhor” ajuste	116
Tabela 31 – Síntese metodológica da modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura	122
Tabela 32 – Aspectos geométricos e geotécnicos do aterro	125
Tabela 33 – Parâmetros geotécnicos fundação (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013)..	125
Tabela 34 – Classes de cobertura do solo no vale a jusante da barragem	129
Tabela 35 – Modelos considerados como de “melhor” ajuste	130
Tabela 36 – Resumo do modelo hidráulico concebido para modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura	133
Tabela 37 – Coeficientes de rugosidade de Manning adotados na modelagem	134
Tabela 38 – Brechas definidas por distintos modelos empíricos para a barragem em análise	138
Tabela 39 – Probabilidade de excedência da vazão de pico dos hidrograma associados à ruptura com brechas estimadas por diferentes equações de previsão	139
Tabela 40 – Resumo de informações dos hidrogramas de ruptura associados a diferentes probabilidades de excedência da vazão de pico	145
Tabela 41 – Modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha adotados na análise comparativa.....	151

Tabela 42 – Estimativa das incertezas dos hidrogramas apresentados no benchmark (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013) em comparação com a amostra resultante do MMC aplicado.....	154
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
BFF	Breach Formation Factor
CADAM	Concerted Action on Dam Break Modelling
DPA	Dano Potencial Associado
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
ICOLD	International Commission on Large Dams
IMPACT	Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty
LiDAR	Light Detection and Ranging
MMC	Método de Monte Carlo
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
B	Largura média da brecha
ER	Taxa de erosão linear
$E_{l.fundo}$	Cota de fundo da brecha
H_B	Altura da brecha
H_d	Altura da barragem
H_B/H_d	Razão entre altura da brecha e altura da barragem

H_w	Carga hidráulica a montante da brecha
L_{Bf}	Largura de fundo da brecha
L_{Bt}	Largura de topo da brecha
L_{crista}	Largura de crista
L_{Bf}/L_{crista}	Razão entre largura de fundo da brecha e comprimento de crista
T_f	Tempo de formação da brecha
V_{er}	Volume erodido da barragem na ruptura
V_w	Volume armazenado no reservatório no momento da ruptura
Z	Declividade da parede lateral da brecha
ZAS	Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	27
2.1	Objetivo Geral	27
2.2	Objetivos Específicos	27
3	REVISÃO DA LITERATURA	28
3.1	Parâmetros de Brecha de Ruptura	28
3.1.1	Altura de brecha - H_B	29
3.1.2	Largura da brecha – B	30
3.1.3	Declividade da parede lateral - Z	31
3.1.4	Valores de referência para parâmetros de brecha em barragens de terra 33	
3.2	Fatores Intervenientes nos Parâmetros de Brecha de Ruptura em Barragens de Terra	34
3.3	Modelagem da Ruptura Hipotética de Barragens de Terra	39
3.3.1	Modelos de simulação de brecha	41
3.3.2	Modelos para estimativa dos hidrogramas de ruptura	50
3.3.3	Modelos de propagação dos hidrogramas de ruptura	55
3.4	Análise de Incertezas em Modelos	58
3.4.1	Aplicações em estudos de ruptura hipotética de barragens	60
3.5	Estudos Anteriores Desenvolvidos com Base no Estudo de Caso	70
4	IDENTIFICANDO MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DOS PARÂMETROS DE BRECHA DE RUPTURA EM BARRAGENS DE TERRA	74
4.1	Banco de Dados	74
4.2	Análise de Correlação entre as Variáveis	83
4.3	Metodologia	85
4.4	Análise Comparativa por Grupos	87
4.4.1	Metodologia	87
4.4.2	Resultados	89
4.4.3	Discussão	96
4.5	Ajuste de Distribuições Teóricas de Probabilidade	97
4.5.1	Metodologia	97
4.5.2	Descrição das amostras	99
4.5.3	Resultados	100
4.6	Discussão e Conclusões Relativas à Identificação dos Modelos de Distribuição de Probabilidade do Parâmetros de Brecha	114

5	MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO HIDROGRAMA INDUZIDO PELA RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE TERRA	119
5.1	Metodologia para Realização das Simulações Probabilísticas	119
5.2	Descrição do estudo de caso	123
5.2.1	Características da barragem sob análise	123
5.2.2	Modelo Digital de Terreno (MDT)	126
5.2.3	Características do vale a jusante.....	127
5.2.4	Modo de falha hipotética	130
5.3	Modelos de Distribuição de Probabilidade dos Parâmetros de Brecha	130
5.4	Parâmetros de Brecha não Aleatórios	131
5.5	Construção do Modelo Hidráulico	132
5.6	Resultados das Simulações Probabilísticas dos Hidrogramas	135
5.6.1	Análise de incertezas na vazão de pico dos hidrogramas de ruptura....	135
5.6.2	Esforço computacional	137
5.7	Discussão dos Resultados da Análise Probabilística dos Hidrogramas....	137
5.7.1	Análise comparativa com abordagens determinísticas.....	138
5.7.2	Correlação entre parâmetros de brecha de ruptura e vazão de pico do hidrograma	141
5.7.3	Hidrogramas completos.....	142
5.7.4	Taxa de erosão das brechas amostradas	146
5.7.5	Influência do modelo de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha na análise de incertezas dos hidrogramas	149
5.7.6	Comparação com estudos anteriores do caso em análise	153
5.7.7	Propagação dos hidrogramas	157
5.8	Conclusões do Estudo de Caso	164
6	Considerações Finais.....	166
	REFERÊNCIAS.....	173
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS ANTERIORES APLICADOS NO CASO EM ANÁLISE.....	179
	APÊNDICE B – BASE DE DADOS HISTÓRICOS DE RUPTURA DE BARRAGENS UTILIZADOS NA PESQUISA EXTRAÍDOS DO BANCO DE DADOS DE REFERÊNCIA CONSTRUÍDO POR BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020).....	192
	APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE RUPTURA REGISTRADOS NOS BANCOS DE DADOS DE REFERÊNCIA.....	212
	APÊNDICE D – Resultados complementares da análise comparativa por grupos .	220
	APÊNDICE E – AJUSTE GRÁFICO DOS MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	224
	APÊNDICE F – LÓGICA CONDICIONAL UTILIZADA PARA A AMOSTRAGEM DOS PARAMETROS DE BRECHA	233

APENDICE G – ANÁLISES E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES RELATIVAS AO MODELO HIDRÁULICO.....	234
APENDICE H - ANALISES COMPLEMENTARES MMC	238

1 INTRODUÇÃO

A modelagem hidráulica foi e continua sendo uma ferramenta essencial ao desenvolvimento de políticas públicas de gestão de risco de inundações associadas a ruptura de barragens. Essa técnica tem sido utilizada para esse fim desde meados do século XIX (LUO *et al.*, 2012). A primeira lei europeia destinada a análise de risco de ruptura de barragens, promulgada em 1968, tornou compulsório o uso de simulações hidráulicas nesse contexto (MORRIS *et al.*, 1999).

Segundo ICOLD (2018), existem cerca de 60.000 grandes barragens¹ em operação no mundo, sendo a maioria delas de terra. No Brasil, segundo ANA (2020), são 5.285 barragens classificadas com dano potencial associado (DPA) alto e médio. É esperado que, para cada uma dessas barragens, haja um mapa de inundação elaborado a partir da modelagem da ruptura hipotética dessas estruturas. Esses mapas são utilizados na elaboração de ações de resposta à emergência e assim, um grande número de pessoas são diretamente ou indiretamente afetadas pelos resultados da modelagem da ruptura hipotética de barragens.

Os eventos de ruptura em barragens podem ser divididos em cinco processos, sendo eles: i) modos de falha; ii) formação da brecha de ruptura; iii) formação do hidrograma defluente; iv) propagação da onda de ruptura e v) avaliação das consequências (ZHANG *et al.*, 2016). O estudo desses fenômenos é multidisciplinar. A caracterização dos modos de falha das barragens é de domínio da geotecnia e geologia. A formação da brecha de ruptura é caracterizada, principalmente, pelas disciplinas de erosão de solos e transporte de sedimentos. As ciências hidrológicas e hidráulicas são as responsáveis por descrever os processos da formação dos hidrogramas defluentes da ruptura e a consequente inundação a jusante. Por fim, a etapa de avaliação das consequências é de domínio das ciências socioeconômicas e ambientais.

Para a modelagem da ruptura de barragens, PETER (2017) sugere considerar três etapas, sendo elas: i) modelagem da ruptura; ii) propagação hidráulica da inundação

¹ Barragens com altura maior que 15,00 m ou que armazenam mais de 3 milhões de metros cúbicos segundo classificação da Comissão Internacional de Grandes Barragens – ICOLD (*Internacional Commission on Large Dams*)

e iii) avaliação de impacto. Segundo o autor, essas etapas podem ser guiadas pelas seguintes perguntas orientadoras.

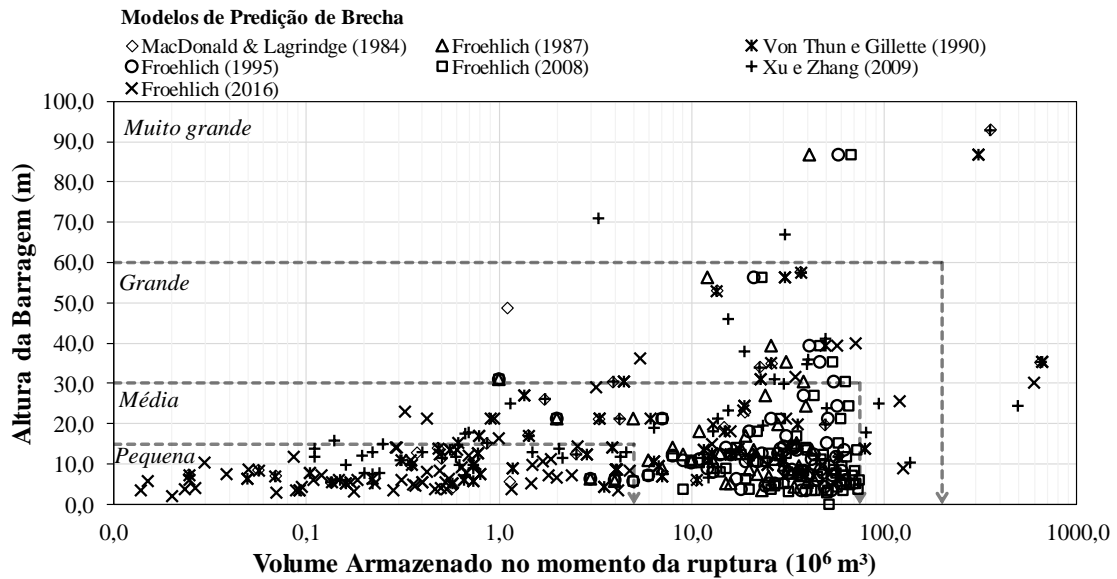
- Assumindo que uma barragem existente pode falhar, como ela irá falhar? Quais são as causas que poderiam conduzir a falha e quais são os mecanismos dessa falha? Quão grande é o volume do material armazenado no reservatório que será liberado e em qual escala temporal? Essas perguntas são avaliadas na etapa de modelagem da ruptura, na qual elaboram-se diferentes hipóteses de ruptura e define-se a geometria da brecha de ruptura e o hidrograma defluente ou hidrograma de ruptura;
- Dado um hidrograma proveniente da ruptura, como será sua propagação a jusante? Qual a velocidade de propagação da frente de inundação e qual sua extensão (área inundada, profundidade, etc.)? Qual é a profundidade e velocidade da inundação em locais específicos a jusante da barragem? A simulação da propagação hidráulica da inundação avalia essas questões, considerando as hipóteses de ruptura estabelecidas na etapa anterior;
- Conhecendo a extensão da inundação, quão grande será o impacto da inundação sobre a sociedade? Qual o potencial de perdas econômicas e quantas pessoas estão em risco? As informações essenciais para responder essas perguntas são fornecidas pela avaliação de impacto que pode ou não considerar as ações de mitigação.

Dada sua complexidade, estudos de ruptura hipotética de barragens apresentam diferentes fontes de incertezas. Alguns autores apontam que a simulação da abertura da brecha de ruptura é a etapa com maior nível de incerteza (BELLOS *et al.*, 2020, PETER, 2017, ASCE/EWRI, 2011, MORRIS *et al.*, 2008 e WAHL, 2004). Logo, o hidrograma de ruptura, resultado dessa etapa, pode representar o aspecto com maior nível de incerteza da análise. Esse, por sua vez, é a causa da inundação a jusante e representa o principal aspecto para a delimitação das áreas potencialmente inundáveis. ALTINAKAR *et al.* (2013) e SCHUBERT *et al.* (2008) descrevem que o hidrograma de ruptura é, inclusive, mais relevante que os coeficientes de atrito para a previsão de profundidades de inundação, sobretudo nos primeiros trechos a jusante da barragem.

Na etapa de simulação da abertura da brecha de ruptura, WAHL (2008) indica que grande parte das aplicações práticas adotam modelos empíricos de predição de brecha. Estudos posteriores, como o apresentado por ZENZ & GOLDGRUBER (2013), ainda demonstram a relevância dos modelos empíricos, apesar do aumento na aplicação de modelos fisicamente baseados. A fácil aplicação é um dos principais motivos para a ampla utilização dos modelos empíricos de predição de brecha.

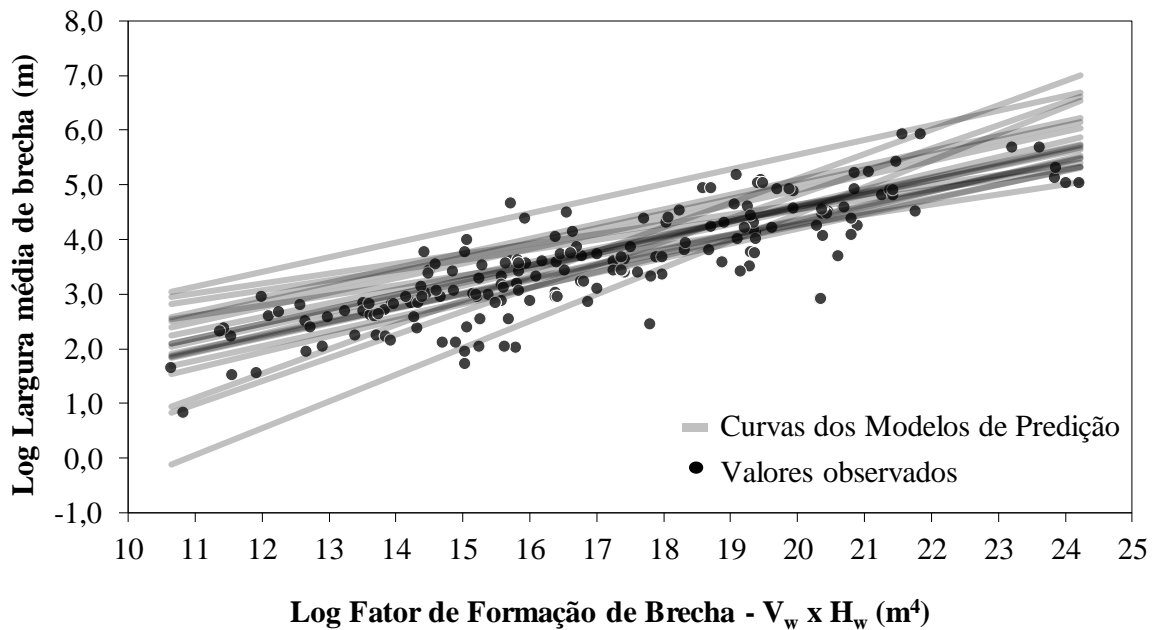
Em modelos empíricos, quanto maior o tamanho das amostras e a variedade das condições dos eventos observados, maior a confiabilidade da estimativa. Segundo ICOLD (2018), 19% das barragens instaladas no mundo possuem altura inferior a 15,00 m, enquanto 43% apresentam altura entre 15,00 m e 29,00 m. Essas totalizam a maioria das barragens instaladas, porém um percentual considerável (30%) das barragens apresenta altura entre 30,00 m e 59,00 m e os 8% restantes correspondem a barragens com altura acima de 60,00 m. Ao observar as características das barragens consideradas nos principais modelos empíricos de previsão de brecha (Figura 1) entende-se que as amostras utilizadas representam bem a faixa de barragens de magnitude pequena a média, porém não representam as grandes barragens na mesma proporção, tampouco as barragem muito grandes, que em alguns modelos não apresentam nenhuma observação.

Figura 1 - Magnitude das barragens consideradas na concepção de alguns modelos empíricos de predição de brecha de ruptura



Os modelos empíricos de previsão de brecha são definidos por análises de regressão de amostras de casos históricos de ruptura. Dessa forma, esses modelos retornam o valor esperado da variável dependente, que no caso corresponde aos parâmetros de brecha. Como a análise de regressão é baseada em uma amostra composta por diferentes características, em alguns casos o valor esperado pode ser diferente até mesmo dos valores observados considerada na análise, conforme apresenta a Figura 2. Essas diferenças são chamadas de erro padrão da estimativa e correspondem a uma parcela das incertezas dos modelos, que podem variar em função do modelo adotado e também das características da barragem em análise, como também pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Variabilidade das respostas dos modelos de predição de largura de brecha em função da magnitude das barragens e valores observados nos casos históricos



As análises gráficas apresentadas demonstram a presença de incertezas nos modelos empíricos de previsão de brecha. A calibração desses modelos em um estudo de ruptura hipotética não é possível, uma vez que não há dados para realizar esse processo. A ruptura de uma barragem específica não é um evento recorrente, uma vez que caso ele ocorra será observado uma única vez, o que dificulta o ganho de experiências quantitativas para aperfeiçoar o julgamento de engenharia. PETER (2017) descreve que a calibração de parâmetros com base em outros casos de ruptura pode não ser eficiente. Cada ruptura apresenta comportamento distintos dada a grande variabilidade das características das diferentes barragens. Assim, o autor sugere a incorporação de informações a respeito das incertezas em estudos de ruptura hipotética de barragens a fim de torná-los mais confiáveis. RAZAVI *et al.* (2021) reforçam que identificar o nível de incertezas em modelos adotados como ferramenta de políticas públicas, como é o caso, é um dos aspectos necessários para torna-lo útil à sociedade.

O uso de técnicas de modelagem probabilísticas é uma alternativa para análise de incertezas na modelagem de ruptura hipotética de barragens. Esse tipo de abordagem pode ser considerado como um dos avanços mais recentes no tema. No entanto, segundo GOODELL (2019) pouco ainda se sabe a respeito das incertezas dos parâmetros de brecha de ruptura em barragens, o que deixa em aberto questões

importantes para o desenvolvimento desse tipo de análise, como por exemplo: como definir os modelos de distribuição de probabilidade para a amostragem dos parâmetros de entrada dos modelos usados na estimativa dos hidrogramas de ruptura; quais devem ser as características desses modelos; e se deveriam os modelos se diferenciar em função das características da barragem ou do modo de falha.

Afim de explorar esses aspectos é que se propõe a presente pesquisa, que analisa as incertezas a respeito dos parâmetros de brecha em barragens de terra (declividade da parede lateral, altura, tempo de formação e largura de fundo) a partir de uma análise estatística de 1.954 casos históricos de ruptura em barragens de terra apresentados por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020). A seleção do banco de dados foi realizada após uma análise de diferentes fontes, sendo selecionado aquele que apresentou uma base atualizada com o maior número de observações e variabilidade nas situações de ruptura. Modelos de distribuição de probabilidade capazes de representar o comportamento das amostras dos parâmetros de brecha foram identificados. Diferentes modelos foram testados, identificando aqueles de melhor ajuste com base nos critérios de informação adotados (Akaike, Bayesiano) e na análise gráfica dos ajustes. Nessa etapa foram utilizadas, principalmente, bibliotecas de análise estatísticas desenvolvidas em linguagem R.

Os modelos identificados foram aplicados na modelagem probabilística dos hidrogramas defluentes da ruptura hipotética da barragem apresentada por ZENZ & GOLDGRUBER (2013). Trata-se de um estudo de caso proposto pelo ICOLD (*International Commission on Large Dams*) para o desenvolvimento de uma análise comparativa entre diferentes modelos e métodos aplicados ao estudo de ruptura hipotética de barragens. Diferentes grupos de pesquisadores desenvolveram esse estudo de caso, o que permitiu uma análise comparativa com os resultados da presente pesquisa.

Ressalta-se que apenas a incerteza paramétrica da brecha foi considerada na modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura. Sendo assim, a quantificação das incertezas nos resultados, representados pela vazão de pico, representa a propagação dessas incertezas para a resposta do sistema. Na modelagem

probabilística, os parâmetros de brecha de ruptura foram considerados como variáveis aleatórias e simulados pelos modelos identificados. O Método de Monte Carlo (MMC) foi adotado para o cômputo do processo probabilístico. Para a estimativa do hidrograma de ruptura foi utilizado o modelo paramétrico de abertura de brecha acoplado ao HEC-RAS v.5.0.7. Para o sorteio aleatório dos parâmetros de brecha e aplicação do MMC foi utilizado uma rotina desenvolvida em linguagem Python. O *software* McBreach também foi aplicado na discussão dos resultados da análise.

A presente dissertação está organizada em 7 capítulos e 8 apêndices. O Capítulo 2 consiste em apresentar os objetivos geral e específicos da pesquisa e o Capítulo 3 apresenta a revisão de literatura do tema. Nos Capítulos 4 e 5 estão apresentados os resultados das duas etapas do trabalho que correspondem a análise de incerteza dos parâmetros de brecha e a modelagem probabilística do hidrograma de ruptura de uma barragem de terra. No Capítulo 6, estão apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho e no Capítulo 7 apresentam-se as recomendações para trabalhos futuros baseado nos resultados obtidos e discussões realizadas. Nos apêndices encontram-se apresentadas informações a respeito das amostras extraídas do banco de dados de referência e informações complementares às análises desenvolvidas.

2 OBJETIVOS

Os objetivos da presente pesquisa, apresentados a seguir, estão divididos em dois. Primeiro apresenta-se o objetivo geral, que corresponde à intenção da pesquisa. Depois indica-se os objetivos específicos, que representam subprodutos do trabalho.

2.1 Objetivo Geral

Analisar as incertezas dos parâmetros de brecha registrados em casos históricos de ruptura em barragens de terra e utilizar essas informações em uma modelagem probabilística para estimativa dos hidrogramas defluentes de um estudo de ruptura hipotética de barragem de terra.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar modelos de distribuição de probabilidade para amostras de dados dos parâmetros de brecha de ruptura registrados em casos históricos compilados no banco de dados apresentado por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020).
- Quantificar incertezas na estimativa do hidrograma de ruptura de uma barragem apresentada por ZENZ & GOLDGRUBER (2013) considerando os parâmetros de brecha como variáveis aleatórias representadas pelos modelos identificados na pesquisa.
- Comparar os resultados da análise probabilística com aqueles obtidos a partir da aplicação de modelos determinísticos usualmente aplicados em estudos de ruptura hipotética de barragens.
- Avaliar a correlação entre os parâmetros de brecha e a vazão de pico do hidrograma defluente da ruptura.
- Avaliar efeitos do uso de diferentes modelos de distribuição de probabilidade para os parâmetros de brecha na modelagem probabilística.

3 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo descreve-se, de maneira narrativa, os principais aspectos da pesquisa relativa ao estudo de ruptura hipotética de barragens e suas incertezas. Ênfase foi dada aos estudos relacionados à ruptura de barragens de terra. A revisão apresenta aspectos conceituais relativos aos parâmetros das brechas de ruptura e seus respectivos fatores intervenientes, descreve os modelos que podem ser utilizados para a representação da ruptura hipotética de barragens, discute sobre a análise de incertezas nesse tipo de estudo e descreve estudos anteriores baseados no mesmo estudo de caso aplicado na presente pesquisa.

3.1 Parâmetros de Brecha de Ruptura

O termo brecha de ruptura é usualmente utilizado para definir a abertura formada em uma estrutura de contenção, dada a ocorrência de um processo erosivo ou de instabilização. A brecha de ruptura representa o resultado de um processo de falha em barramentos que resulta na liberação do material armazenado nas estruturas de modo crescente e não controlado (MORRIS, 2011).

WAHL (1998) descreve a brecha de ruptura a partir de quatro parâmetros: i) declividade das paredes laterais (Z); ii) altura da brecha (H_B); iii) tempo de formação (T_f) e iv) largura média da brecha (B). Independentemente do modo de formação da brecha de ruptura e de seus fatores intervenientes, o autor aponta que a geometria trapezoidal é a mais observada como forma final em barragens de terra.

MORRIS *et al.* (2009a) contrapõem e descrevem, a partir da observação de testes de campo, que a declividade da parede lateral das brechas é tipicamente vertical e as brechas apresentam formato típico retangular. Em uma publicação posterior, ZHANG *et al.* (2016) afirmam que o formato trapezoidal é aquele tipicamente observado nas brechas de ruptura em barragens de terra. Sendo assim, observa-se uma discussão a respeito do formato típico das brechas, não sendo verificado um consenso.

Independente do formato, a representação da geometria da brecha de ruptura pode ser realizada a partir de parâmetros, conforme apresenta a Figura 3. Uma descrição dos parâmetros de brecha, baseados na revisão de literatura está apresenta nos subíntes a seguir.

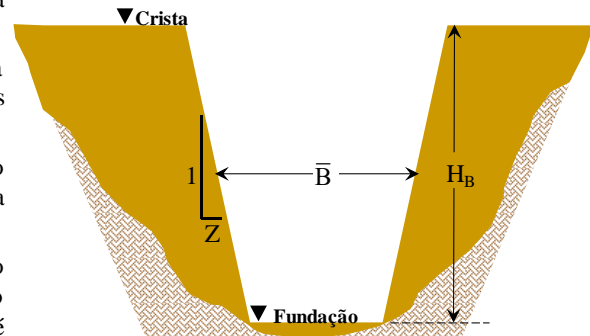
Figura 3 – Parâmetros de brecha de ruptura de barragens

Altura da brecha (H_B): Extensão vertical da brecha, mensurada entre as cotas de crista da barragem e a fundação da brecha;

Largura média da brecha (\bar{B}): Extensão horizontal da brecha na altura média. Representa a distância entre as paredes da brecha;

Declividade da parede lateral (Z): Razão de alargamento da brecha ao longo da altura. Define o formato final da brecha (trapezoidal, retangular ou triangular);

Tempo de formação da brecha (T_p): Intervalo de tempo necessário para a abertura da brecha. Iniciado a partir do momento em que o processo de formação da brecha é incontrolável e irreversível.



Fonte: Adaptado de WAHL (1998)

3.1.1 Altura de brecha - H_B

Segundo WAHL (1998), a altura da brecha de ruptura (H_B) corresponde à diferença entre a cota de crista da barragem e a cota de fundo da brecha, referente ao nível limite da erosão vertical. Segundo o autor, esse limite é associado ao contato da fundação com o terreno natural, normalmente mais resistente à erosão do que o material do aterro.

No entanto, em alguns casos, WAHL (2014) indica ser possível observar o limite da erosão vertical no próprio corpo da barragem, em uma eventual camada mais resistente. O autor observa que também é possível considerar a erosão no terreno natural, atingindo a profundidade da rocha sã. Isso ocasiona alturas de brecha superiores à altura da barragem.

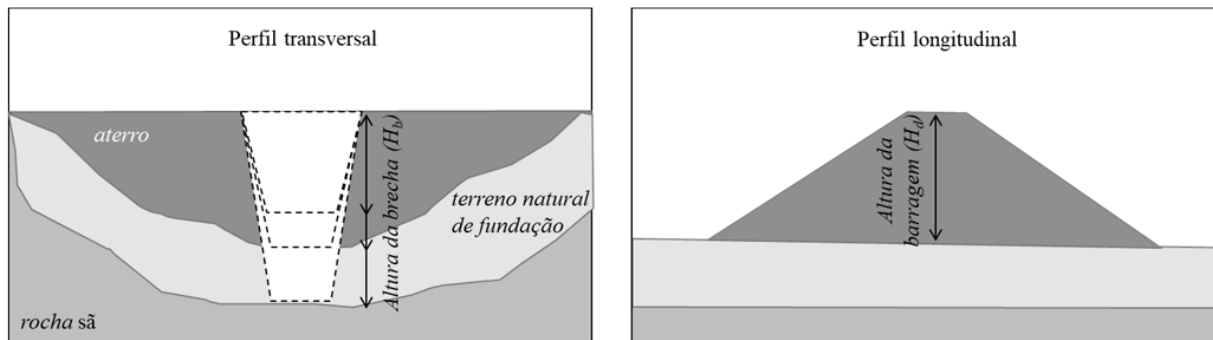
XU & ZHANG (2009) sugerem que a altura da brecha pode variar em função da resistência do material à erosão e da altura da barragem (H_d). Os autores indicam que, quanto maior a erodibilidade da barragem, maior é a altura da brecha e quanto maior a barragem, menor a razão H_B/H_d . XU & ZHANG (2009) não apresentam valores limites para H_B/H_d , porém, baseado no trabalho dos autores observa-se valores limites para a relação H_B/H_d entre 0,67 e 1,10. Essa análise foi realizada considerando barragens construídas com materiais de baixa a alta erodibilidade e altura variando entre 5,00 m e 600,00 m.

Nos guias de diretrizes para elaboração de estudos de ruptura hipotética de barragens não é comum a recomendação de cenários de ruptura parcial, nos quais ocorreria

apenas a erosão de uma parcela da barragem (FEMA, 2013 e ANA, 2016). Sendo assim, valores de altura de brecha menores que a altura da barragem não são usualmente considerados durante o desenvolvimento de estudos de ruptura hipotética de barragem. É comumente observada a adoção arbitrária da altura da brecha igual à altura da barragem.

Teoricamente, não há nenhum aspecto físico que impossibilite a ocorrência de uma ruptura parcial, tampouco defina um valor limite mínimo para a relação H_B/H_d . Por outro lado, considera-se como limite máximo teórico para a erosão da brecha, a superfície da rocha sã na seção da barragem (XU & ZHANG, 2009). A Figura 4 apresenta um croqui ilustrativo da altura da brecha, relacionando também a altura da barragem.

Figura 4 – Croqui esquemático das alturas de brecha de ruptura e da barragem



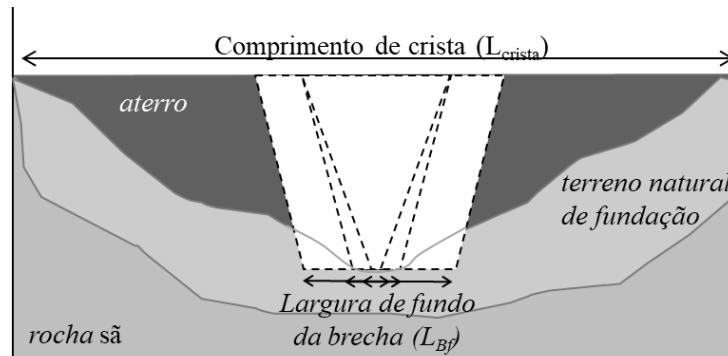
3.1.2 Largura da brecha – B

A largura da brecha (B) corresponde à distância média entre as paredes da brecha de ruptura (WAHL, 1998). É usual considerar como limite máximo para largura a distância entre as ombreiras da barragem, uma vez que terreno natural é, normalmente, mais resistente à erosão do que o aterro (FERENTCHAK & JAMIESON, 2008). No entanto, é considerado factível a ocorrência de erosão do terreno natural. Assim, considera-se como limite físico a superfície da rocha sã nas ombreiras da barragem.

A largura de brecha é utilizada por VON THUN & GILLETTE (1990) para definir a taxa de abertura da brecha (*Erosion Rate* - ER). Os autores estimam esse parâmetro como a razão entre a largura média e o tempo de formação da brecha. A largura de fundo e topo da brecha também são estimadas a partir da informação da largura de brecha.

A largura de fundo da brecha é uma informação importante para a estimativa dos hidrogramas defluentes da ruptura de uma barragem (SINGH, 1996). Considerando a brecha de ruptura como uma soleira vertente, a largura de fundo (L_{Bf}) serve como parâmetro de referência para a estimativa das vazões passantes pela brecha (SINGH, 1996). Um croqui ilustrativo da largura de fundo está apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Croqui esquemático largura de fundo de brecha



A largura de fundo pode ser estimada pela Equação (1).

$$L_{Bf} = B - \frac{H_b}{2} \times Z_{esq} - \frac{H_b}{2} \times Z_{dir} \quad (1)$$

na qual: B = Largura média da brecha; H_b = Altura da brecha; Z_{esq} = Declividade da parede lateral esquerda; Z_{dir} = Declividade da parede lateral direita

3.1.3 Declividade da parede lateral - Z

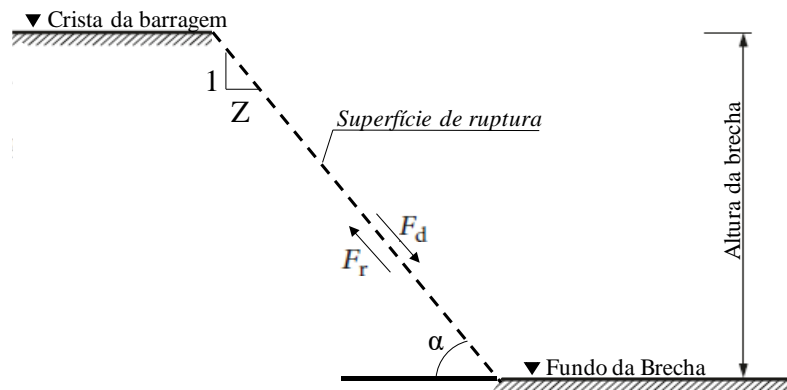
CRISTOFANO (1965) assume que a declividade da parede lateral (Z) das brechas de ruptura correspondem ao ângulo de atrito interno do material da barragem. ZHONG *et al.* (2018) assume a mesma premissa para ruptura de barragens preenchidas com materiais não coesivos por galgamento. MORRIS *et al.* (2009) indicam que, além do ângulo de atrito interno, a declividade da parede lateral também é função da coesão dos materiais. PETER (2017) descreve que esse parâmetro representa o ângulo da superfície de ruptura crítica de curto prazo. O autor também descreve que esse parâmetro pode ser relativo ao ângulo de atrito interno ou de repouso do material da barragem.

PETER (2017), considera a faixa entre 50° a 85° (Z entre 0,84 e 0,09) como valores fisicamente viáveis para o ângulo de inclinação da parede lateral da brecha. Como valores extremos o autor considera ângulos de 45° e 90° (Z iguais a 1 e 0).

FROEHLICH (2016) sugere que a declividade da parede lateral deve ser igual a 1,0 e 0,6 para rupturas por galgamento e erosão interna, respectivamente. O mesmo autor, em um estudo anterior, apresentado em 1995, recomenda valores de Z iguais a 1,4 para galgamento e 0,9 para outros modos de falha. VON THUN & GILLETTE (1990) indicam que, para solos coesivos, é possível adotar valores de declividade da parede lateral variando de 0,33 a 1,00, recomendando para solos não-coesivos Z igual a 1,0.

A Figura 6 apresenta um croqui esquemático com a indicação da declividade da parede lateral.

Figura 6 – Croqui esquemático da declividade da parede lateral da brecha



Segundo VON THUN & GILLETTE (1990), o tempo de formação da brecha de ruptura corresponde ao intervalo entre o início da abertura da brecha e o alcance da sua geometria final. Nesse contexto, o autor descreve que o tempo de formação da brecha se inicia apenas após a identificação de um processo de ruptura irreversível. Assim, não é considerado o tempo referente ao desenvolvimento da causa da ruptura.

Como exemplo, em uma ruptura por erosão interna (*piping*), o tempo necessário para a erosão tubular regressiva se desenvolva não é considerado na contagem do tempo de formação da brecha. Nesse caso, a contagem se inicia apenas quando o *piping* já está completamente formado e o fluxo entre o reservatório e o talude de jusante da barragem já está estabelecido. Sendo assim, considera-se que o tempo de formação da brecha representa apenas o tempo necessário para abertura da brecha.

FERENTCHAK & JAMIESON (2008) indicam que o tempo de formação de brechas de rupturas ocasionadas por processos erosivos em barragens de terra não devem ser inferiores a 15 minutos. Os autores alegam que esse seria o intervalo mínimo para

o desenvolvimento de um processo erosivo fisicamente capaz de remover a parcela de uma barragem. WAHL (1998), por sua vez, indica um limite máximo para o tempo de formação de brecha em barragens de terra igual a 3 horas. Os limites indicados estão relacionados à análise de casos históricos e podem ser assumidos como a faixa de valores mais provável. No entanto, não há nenhum embasamento físico que corroborem com os limites apresentados.

3.1.4 Valores de referência para parâmetros de brecha em barragens de terra

Com base no registro de casos históricos, diferentes autores apresentam valores de referência para os parâmetros de brecha. As faixas de valores indicadas pelos autores estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de valores indicativas para os parâmetros de brecha

Referência	Largura média da brecha - B	Declividade da parede Lateral – Z	Tempo de Formação - T_f (h)
JOHNSON & ILLES (1976)	$0,5 H_d \leq B \leq 3,0 H_d$	-	-
SINGH & SNORRASON (1982, 1984)	$2,0 H_d \leq B \leq 5,0 H_d$	-	$0,25 \leq T_f \leq 1,0$
FERC (1987)	$1,0 H_d \leq B \leq 5,0 H_d$	$0,25 \leq Z \leq 1,0$ (PR) $1,0 \leq Z \leq 2,0$ (NP)	$0,1 \leq T_f \leq 1,0$ (PR) $0,1 \leq T_f \leq 0,5$ (NP)
VON THUN & GILLETTE (1990)	$(4,0 H_w) T_f \leq B \leq (61+4H_w) T_f$	$0,33 \leq Z \leq 1,0$	-
USBR (1988)	$B \leq 3H_w$	-	$T_f \leq 0,011B$
SINGH & SCARLATOS (1988)	-	$10^\circ \leq Z \leq 50^\circ$	$T_f \leq 3$
FERENTCHAK & JAMIESON (2008)	$(4,0 H_d) T_f \leq B \leq (61+4H_d) T_f$	-	$T_f > 0,25$
FEMA (2013)	$0,5 H_d \leq B \leq 5,0 H_d$	$0,0 \leq Z \leq 1,0$	$0,1 \leq T_f \leq 4,0$

H_d = Altura da Barragem; H_w = Carga hidráulica acima do fundo da brecha; PR = Barragens com projeto de engenharia; NP = Barragens sem projeto de engenharia

Observa-se uma variação considerável entre os limites apresentados, o que indica a presença de incertezas a respeito desses valores. Além disso, não é raro observar casos históricos com parâmetros de brecha fora dos limites indicados, o que demonstra que os mesmos não são embasados em limites do problema físico e sim em um comportamento médio observado.

Para validação dos parâmetros de brecha, COLORADO (2020) apresenta um critério baseado nos limites de erodibilidade dos materiais utilizados na construção das barragens de terra. Esses foram propostos inicialmente por VON THUN & GILLETTE (1990), os quais definem que a razão entre a largura média e o tempo de formação da brecha ($B/T_f = ER$) deve estar contida entre o intervalo $4H_w$ e $61 + 4H_w$.

A partir da análise dos casos históricos utilizados no desenvolvimento de modelos empíricos de previsão de brecha, COLORADO (2020) observa que o limite inferior para ER é de $1,6H_w$, enquanto o superior é de $21H_w$. Sendo assim, a referência sugere adotar como critério para validação dos parâmetros de brecha valores de ER/ H_w entre 1,6 e 21. Segundo a publicação, valores abaixo de 1,6 representam barragens excessivamente resistentes a erosão e valores superiores a 21 definem barragens excessivamente susceptíveis a erosão. No banco de dados consultado por COLORADO (2020) a média dos valores de ER/ H_w foi de 6,7.

3.2 Fatores Intervenientes nos Parâmetros de Brecha de Ruptura em Barragens de Terra

O desenvolvimento das brechas de ruptura está diretamente relacionado ao processo que inicia sua formação (modo de falha). MORRIS (2011) definiu um processo genérico de formação de uma brecha de ruptura em barragens de terra em função de efeitos erosivos. O autor dividiu o processo em 5 fases, sendo elas: i) iniciação; ii) progressão; iii) transição; iv) formação e v) finalização.

Especificamente para o processo de erosão interna (*piping*), WAN & FELL (2004) dividem seu modo de formação em 4 fases: i) iniciação; ii) continuação da erosão; iii) progressão para formar o tubo; iv) formação da brecha. Já em rupturas por liquefação, segundo ROBERTSON *et al.* (2019), não se observa a formação gradual de uma brecha de ruptura. Esse tipo de falha pode provocar deslizamento ou fluxo instantâneo do material, a depender de suas características e da geometria do terreno.

As Figura 7, 8 e 9 ilustram as diferentes fases dos modos de falha apresentados. As duas primeiras imagens foram extraídas dos testes de campo com modelos em pequena escala realizado por MORRIS (2009). Já a Figura 9 retrata a ruptura da Barragem BI (Córrego do Feijão, Brumadinho-MG), ocasionada em 2019 pela liquefação da estrutura.

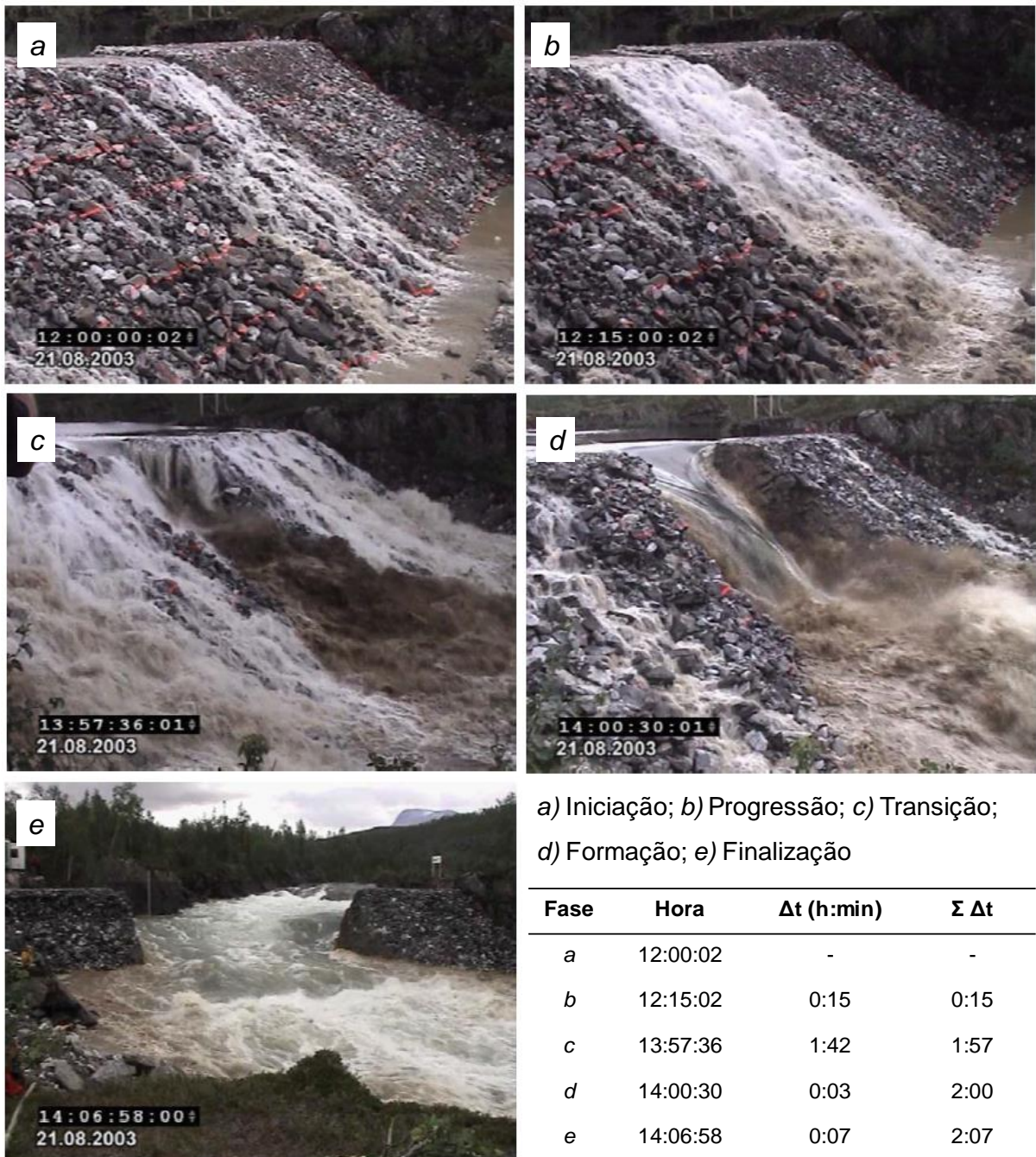
Figura 7 –Fases da formação da brecha de ruptura por erosão interna



a) Iniciação; b) Continuação da Erosão; c) Progressão para formar tubo; d) Formação da brecha

Fonte: MORRIS (2009)

Figura 8 – Fases da formação da brecha de ruptura por erosão externa



Fonte: adaptado MORRIS (2009)

Figura 9 – Ruptura da Barragem B1 Córrego do Feijão



Fonte: ROBERTSON *et al* (2019)

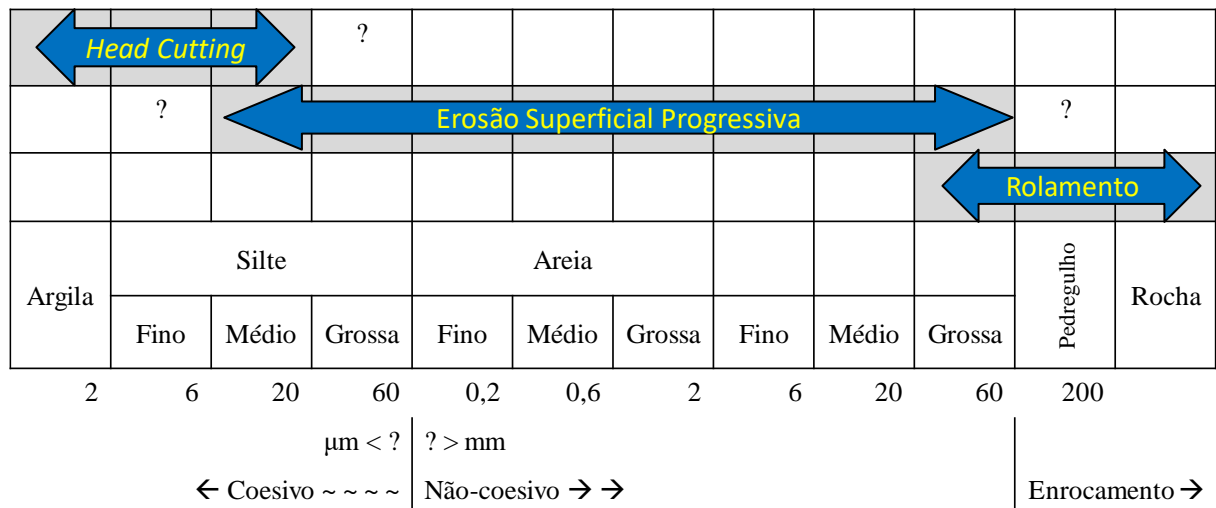
POWLEDGE *et al.* (1989) verificaram que além dos modos de falha, outros fatores também interferem na formação de uma brecha de ruptura. Ao avaliarem o processo erosivo associado ao galgamento de barragens de terra, os autores observaram que

o modo de formação da brecha de ruptura é diferente para aterros construídos com materiais granulares e coesivos.

POWLEDGE *et al.* (1989) descrevem que em solos granulares (não coesivos), a remoção do material ocorre por camadas. Em solos coesivos, a remoção do material ocorre a partir da formação de sulcos, denominados *headcuts*. Esses desenvolvem uma espécie de degraus no talude de jusante da barragem. MORRIS (2013) também observou um comportamento distinto entre aterros com solos granulares e coesivos. Para o autor, aterros compostos por solos coesivos apresentam, normalmente, maior resistência à erosão do que aterros formados por solos arenosos, quando se considera a mesma geometria e condição hidráulica.

MORRIS, *et al.* (2008), indicam que o material utilizado na construção das barragens de terra é um dos principais fatores intervenientes no processo erosivo de uma brecha de ruptura. Os autores relacionam em um diagrama (Figura 10), diferentes processos físicos envolvidos na formação de brechas de ruptura de acordo com a granulometria do material de preenchimento dos aterros.

Figura 10 – Divisão aproximada do processo de formação da brecha em função do tipo de material



Fonte: MORRIS et al. (2008)

Os estudos desenvolvidos por POWLEDGE *et al.* (1989a,b) e MORRIS (2013) descrevem que, o estado dos materiais de construção das barragens (e.g, teor de umidade, grau de compactação, condições do revestimento) também exercem influência no início da formação e no desenvolvimento da brecha de ruptura. Os

autores argumentam que as características geométricas da barragem, do terreno e o modo construtivo também podem ser fatores determinantes para a maneira como uma brecha de ruptura se desenvolve em maciços de terra.

Outro parâmetro relativo às características do material de preenchimento das barragens foi apontado por XU & ZHANG (2009) como atuante no processo de formação das brechas de ruptura. Os autores, ao avaliarem 182 casos de ruptura registrados na literatura, chegaram à conclusão de que a erodibilidade do material que compõe as barragens é o principal fator interveniente na forma final e no modo como se desenvolvem as brechas de ruptura.

MORRIS (2013) define a erodibilidade como um parâmetro capaz de estimar o potencial erosivo de um solo levando em consideração tanto o tipo do material como seu estado. O autor se baseia no fato de que a erodibilidade apresenta grande variação em função de sua natureza (granulometria, coesão aparente, etc.) e seu estado (grau de compactação, teor de umidade).

Segundo ROSGEN (1996), o fator de forma, que corresponde à relação entre largura de topo e profundidade do canal, corresponde ao mais sensível e positivo indicador da tendência da instabilidade de uma canal. Sendo assim, entende-se que a forma da barragem, definida de maneira análoga como a razão entre largura de crista e sua altura, é um fator importante para definição do potencial erosivo e consequente definição dos parâmetros de brecha.

De modo geral, com base nos estudos citados pode-se considerar que os principais fatores intervenientes na formação das brechas de ruptura e em sua geometria final são: i) modo de falha; ii) material de construção; iii) erodibilidade do material e iv) aspectos geométricos (altura, volume, forma).

3.3 Modelagem da Ruptura Hipotética de Barragens de Terra

LUO *et al.* (2012) considera a que a pesquisa e desenvolvimento da modelagem da ruptura hipotética de barragem possuem três períodos distintos, desde o seu início em 1850 na França. O primeiro período tem duração de 100 anos e vai até 1950, enquanto o segundo período segue até 1990 e o terceiro é considerado o período atual. A seguir,

apresenta-se um descrição de cada período com base no estudo desenvolvido por LUO *et al.* (2012).

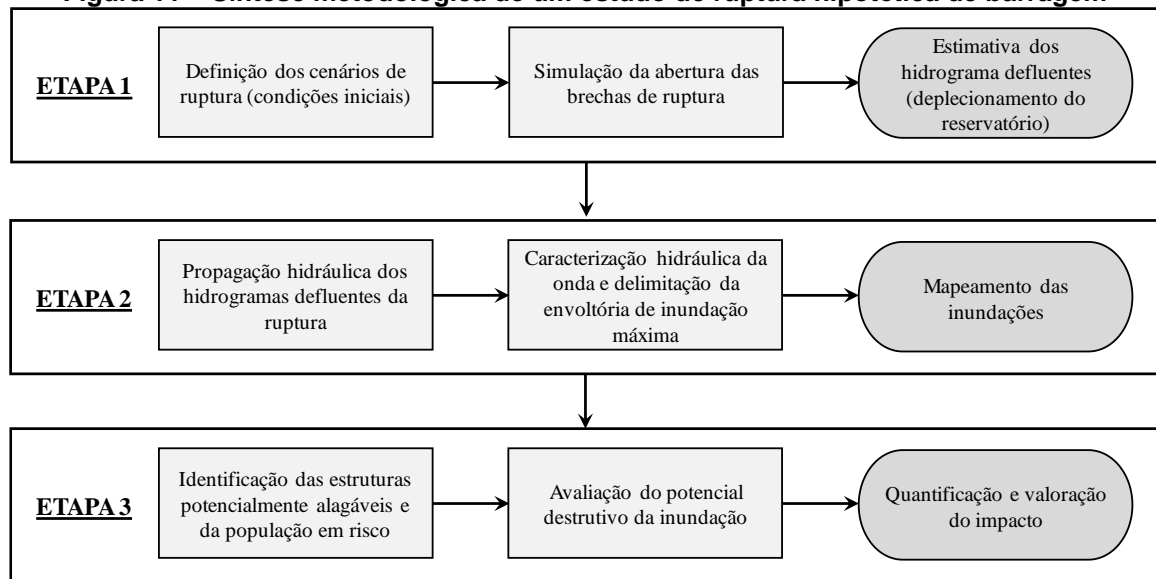
Antes da década de 1940 não haviam computadores eletrônicos e assim, durante o primeiro período, os estudos focavam, principalmente, na solução analítica dos problemas associados às ondas de ruptura. O estudo de RITTER (1892) foi uma das primeiras pesquisas desenvolvidas nesse sentido. Segundo LUO *et al.* (2012), as soluções analíticas dos estudos de ruptura hipotética apresentadas durante o primeiro período de pesquisas (1850-1950) eram limitadas a certos casos especiais e assim, sua aplicação não era muito difundida.

A partir da década de 1950 houve um aumento significativo no número de barragens construídas no mundo. Com isso, veio a necessidade de melhorar o entendimento das causas de ruptura de barragens e das consequências da inundação nas comunidades localizadas a jusante. LUO *et al.* (2012) caracteriza o segundo período como a investigação das causas e consequências da ruptura de barragens e pela tentativa de modelar computacionalmente o fenômeno, paralelamente ao desenvolvimento construtivo das barragens.

No terceiro período do desenvolvimento dos estudos de ruptura hipotética, de 1990 aos dias de hoje, os problemas de segurança de barragens ganharam relevo. O significativo impacto de algumas rupturas que ocorreram durante este período e o desenvolvimento da ciência, tecnologia e sociedade aumentaram a cobrança por soluções para as demandas da segurança de barragens. Como característica principal do período atual, LUO *et al.* (2012) destaca a ênfase na cooperação entre diferentes países e regiões para o desenvolvimento dos estudos. A descrição quantitativa dos impactos, a análise de incertezas e a avaliação integrada do risco são temas que tem se desenvolvido durante esse período e ganhado mais atenção.

A modelagem da ruptura hipotética de barragens pode ser desenvolvida a partir de três etapas, sendo elas: i) modelagem da ruptura; ii) propagação hidráulica da inundação e iii) avaliação de impacto. Diferentes hipóteses podem ser levantadas para o desenvolvimento dessas etapas, sendo esse caracterizado como um estudo de cenários. O fluxograma da Figura 11 apresenta as diferentes etapas de um estudo de ruptura hipotética, organizadas cronologicamente e discriminadas em sub-etapas.

Figura 11 – Síntese metodológica de um estudo de ruptura hipotética de barragem



A presente pesquisa tem como foco o desenvolvimento da Etapa 1 apresentada. Portanto, aspectos relacionados a essa etapa estão mais detalhados a seguir. Aspectos relativos à propagação hidráulica (Etapa 2) também foram apresentados, uma vez que esse fez parte das discussões da pesquisa. Aspectos relativos ao mapeamento e à Etapa 3 não compõe o escopo da pesquisa e assim não foram avaliados.

3.3.1 Modelos de simulação de brecha

Segundo WAHL (1998), a modelagem da formação da brecha de ruptura consiste em prever as características da brecha, como a forma e sua taxa de abertura. O autor pontua que essa é uma etapa fundamental para a definição do hidrograma defluente da ruptura. Em seu estudo, WAHL (1998) descreve que diferentes métodos computacionais podem ser aplicados com esse propósito. O autor apresenta quatro tipos de processos de simulação, sendo eles: i) métodos fisicamente baseados; ii) modelos paramétricos; iii) equações de predição e iv) análise comparativas.

WAHL (1998) descreve que grande parte dos modelos não simulam a formação da brecha de forma direta. Ao em vez disso, os usuários determinam as características das brechas de maneira independente e fornecem essas informações como entrada para os modelos de simulação. Em uma pesquisa posterior, WAHL (2004) indica a mesma tendência. O autor pontua que modelos fisicamente baseados, capazes de estimar os parâmetros de brecha a partir da simulação dos processos físicos, ainda

não eram amplamente utilizados na época do trabalho. CEATI (2017) descreve que as pesquisas desenvolvidas na última década têm focado no desenvolvimento dos modelos fisicamente baseados, porém conclui que ainda são poucos os modeladores que usam essa abordagem para a predição das brechas de ruptura.

Considerando as primeiras avaliações de ruptura de barragens propostas por RITTER (1892) até os mais recentes esforços para a modelagem fisicamente baseada desse processo, podemos observar cinco estratégias principais para a modelagem de brechas de ruptura. As primeiras tentativas de modelar a ruptura hipotética de barragens assumiam a premissa de rupturas instantâneas das barragens, tal como proposto por RITTER (1892). Com o aumento no número de registros de ruptura de barragens, passou-se a utilizar também a análise comparativa para o desenvolvimento de estudos de ruptura.

Segundo WAHL (2010), a partir dos anos de 1970, surgiram três novas estratégias para a modelagem da brecha de ruptura. A primeira delas foi a utilização de modelos empíricos de previsão, que permitiram o avanço para uma segunda abordagem, baseada na parametrização do processo. Em paralelo, observou-se o desenvolvimento de uma terceira estratégia baseada na modelagem fisicamente baseada.

A modelagem de brechas de ruptura em barragens de terra a partir da consideração de rupturas instantâneas e análises comparativos não são mais uma prática comum (CEATI, 2017). Porém, em alguns casos de ruptura associados à liquefação, essa abordagem pode ainda ser considerada válida, conforme apresenta JEYAPALAN *et al.* (1983) e observa ROBERTSON *et al.* (2019).

Os modelos fisicamente baseados combinam conceitos-chaves de hidráulica e geotecnia para prever o processo de formação de brecha em barragens de terra. MORRIS (2013) indica como uma das principais vantagens dos modelos fisicamente baseados, a capacidade de simular todas as etapas do processo de formação da ruptura da brecha. Segundo o autor, simular a fase de inicialização até o gatilho da ruptura é muito importante para análises da janela temporal disponível para dimensionar os sistemas de alerta e evacuação das áreas potencialmente alagadas a jusante. Os modelos paramétricos não consideram essa etapa na simulação da

ruptura e, portanto, não permitem analisar essa janela temporal. Outra vantagem indicada pelo autor é a capacidade de simular os diferentes processos erodíveis que podem ser observados durante uma ruptura de barragem (e.g, erosão superficial e *headcut*).

Apesar dos benefícios, MORRIS (2013) reconhece que o uso de modelos fisicamente baseados, teoricamente mais robustos, não é garantia de maior precisão para os resultados. Segundo o autor, esses modelos representam aspectos complexos, sem uma solução teórica completa, sendo ainda necessário lançar mão de coeficientes empíricos. A obtenção desses parâmetros não é simples e demanda do usuário conhecimento para identificar o mecanismo de erosão ao qual o material em análise é mais susceptível, entre outros aspectos relacionados ao estado da barragem. Essas questões ainda dificultam a utilização mais ampla desse tipo de modelo.

Os modelos empíricos de previsão e paramétricos, por sua facilidade de aplicação, são os principais recursos utilizados na modelagem de brechas de ruptura (CEATI, 2017). Esses modelos são o foco da presente pesquisa, tanto na aplicação quanto na discussão dos resultados. Assim, maiores detalhes a respeito desses modelos estão apresentados a seguir.

3.3.1.1 Modelos empíricos (Equações de previsão de brecha)

As equações de previsão de brecha correspondem a relações de regressão estatística estabelecidas a partir da observação de diversos casos históricos de ruptura. As equações relacionam os parâmetros das brechas de ruptura (variáveis dependentes) e as características das barragens (variáveis independentes). A partir de bancos de dados de referência, estima-se funções para definir os parâmetros de brecha com base nas informações relevantes da barragem, como altura e volume armazenado, por exemplo (WAHL, 1998).

Segundo FROEHLICH (2008), a definição dos modelos empíricos de predição é realizada a partir de uma ferramenta conceitual, definida por WHITE (1994) como “Análise Dimensional”. Segundo o autor essa técnica é usualmente aplicada para o entendimento de processos que envolvem uma mistura de grandezas físicas. Basicamente, FROEHLICH (2008) descreve que esse método é utilizado para reduzir

a complexidade das variáveis que afetam um determinado fenômeno físico a partir da combinação das variáveis adimensionalizadas. Como princípio fundamental, tem-se a garantia de que os dois lados da equação sejam comensuráveis, ou seja, tenham a mesma dimensão.

MACDONALD & LANGRIDGE- MONOPOLIS (1984) foram uns dos primeiros a apresentar um modelo empírico de previsão de brecha de ruptura com base na observação de casos históricos. Os autores realizaram uma análise de regressão linear simples entre um parâmetro proposto no estudo, denominado *Breach Formation Factor* - BFF (variável independente) e o volume de material erodido (V_{er}) da barragem durante a ruptura (variável dependente). Para estimativa da geometria da brecha, os autores propõem uma análise a partir da resposta do volume erodido. A equação proposta posteriormente por WASHINGTON STATE (1992) é uma das alternativas para solução desse processo. Já o tempo de formação da brecha é uma função direta do volume erodido.

Para o desenvolvimento de seu modelo, MACDONALD & LANGRIDGE- MONOPOLIS (1984) consultaram uma base de dados com o registro da ruptura de 42 barragens, a maioria localizada nos Estados Unidos e destinadas ao armazenamento de água. No banco de dados havia rupturas ocasionadas por diferentes modos de falha em barragens com diferentes características.

David C. Froehlich é um dos principais autores de modelos empíricos de previsão de brecha. O autor estuda essa temática há várias décadas e já publicou quatro equações de previsão para os parâmetros de brecha. Em seu primeiro trabalho, FROEHLICH (1987) desenvolveu equações de previsão dos parâmetros de brecha a partir da análise de regressão múltipla com base em um banco de dados com 43 observações de rupturas de barragens, sendo a maioria localizada nos Estados Unidos e destinadas ao armazenamento de água.

Em uma atualização de seu estudo, FROEHLICH (1995), adicionou 20 casos históricos de ruptura em sua base de dados. Dando sequência a seus trabalhos, FROEHLICH (2008) apresentou mais um modelo empírico, expandindo novamente sua base de dados, incorporando, dessa vez, mais 11 casos. No total foram analisados 74 casos históricos de ruptura. No trabalho mais recente, FROEHLICH

(2016) expandiu novamente a base de dados coletada e tratada para o desenvolvimento do modelo empírico, com o acréscimo de 37 casos em relação ao estudo anterior.

De modo geral, percebe-se ao analisar os estudos de FROEHLICH (1987, 1995, 2008, 2016) uma tendência de simplificação nos modelos de predição, utilizando menos variáveis explicativas para as equações de previsão dos parâmetros de brecha. O autor busca sempre evoluir nos métodos de regressão e expandir sua base de casos históricos de ruptura. Além das características das barragens, observa-se que o autor sempre considera outros aspectos como o modo de falha e a presença ou não de núcleo na definição de seus modelos.

Outros dois modelos empíricos de previsão de brecha foram propostos por VON THUN & GILLETTE (1990) e XU & ZHANG (2009). O primeiro modelo, diferentemente das outras equações apresentadas, não foi desenvolvido a partir de análise de regressão, mas sim no estabelecimento de retas localizadas entre os valores do limite superior e o ajuste da curva de regressão.

VON THUN & GILLETTE (1990) consideram características das barragens como classe de volume e tipo do material para estabelecer os coeficientes das equações de previsão. Em sua análise, os autores reuniram os casos de ruptura apresentados por MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984) e FROEHLICH (1987), totalizando 58 observações.

XU & ZHANG (2009) também consideram características das barragens na definição de seu modelo de previsão, sendo a erodibilidade o principal deles. O coeficiente de forma do reservatório, o modo de falha e a altura da barragem também foram citados como relevantes para a definição dos parâmetros. Os autores apresentam uma base de dados consideravelmente superior aos demais (182 observações), considerando um grande número de rupturas registradas na China, que não constam nas bases de dados antecessoras.

De modo geral, observa-se que os modelos empíricos se baseiam, em grande parte, em casos históricos de ruptura de barragens destinadas ao armazenamento de água e localizadas nos Estados Unidos. As bases de dados incorporam casos de ruptura

em barragens com diferentes características, tanto em relação a magnitude, quanto ao tipo de material e falha observada. A Tabela 2 apresenta informações a respeito das barragens utilizadas como referência para o desenvolvimento dos modelos. Já a Tabela 3 apresenta as equações de previsão dos parâmetros de brecha definidas pelos diferentes modelos descritos.

Tabela 2 – Características das barragens utilizadas como referência para o desenvolvimento dos modelos empíricos de previsão de brechas de ruptura

Referências	Características das barragens				Nº obs.
	Altura Hd (m) [mín-máx]	Volume Vw (m³) [mín-máx]	Tipos de Barragem	Modos de falha	
Macdonald & Langridge-Monopolis (1984)	4,27 – 93,02	24.660 – 649.791.000	AF (2%); ARG (2%); AT (83%)*#; REJ (2%); ENR (10%)#	GG (36%); INF (31%); PIP (26%); NI. (7%)	42
Froehlich (1987)	3,66 – 86,9	24.700 – 660.000.000	AT (93%)*#; ENR (7%);	EF (7%); ESC (2%); GG (33%); PIP (58%);	43
Von Thun & Gillette (1990)	3,66 – 86,9	24.660 – 660.000.000	AT (91%)*#; REJ (2%); ENR (7%)#	EF (5%); ESC (2%); GG (34%); INF (7%); PIP (47%); NI. (5%)	58
Froehlich (1995)	3,66 – 86,9	13.900 – 660.000.000	-	EF (1,6%); ESC (1,6%); GG (31,7%); PIP (65,1%)	63
Froehlich (2008)	3,1 – 86,9	13.900 – 660.000.000	AT (95%)*#; ENR (4%); N. I. (1%)	EF (1%); ESC (1%); GG (39%); PIP (57%); N.I (2%)	74
Xu & Zhang (2009)	3,7 – 86,9	24.700 – 650.000.000	AT (63%); NUC (23%); REC (7%); ZON (5%); N.I (8%)	GG (39%); PIP (61%)	182
Froehlich (2016)	2,1 – 86,9	13.900 – 660.000.000	AT (97%)*#; ENR (3%);	GG (50%); PIP (50%)	111

Tipos de Barragens: AF = Areia Fina; AT= Aterro homogêneo; REJ = Rejeito; ENR = Enrocamento; ARG = Argila; HO = Barragem Homogênea; *Maciço Heterogêneo; #Com núcleo de argila ou enrocamento; #Revestimento em concreto, enrocamento e argila; **Modos de Falha:** PIP = Piping; INF = Infiltração; GG = Galgamento; NI = Não Identificado; EF = Erosão por fluxo; ESC = Escorregamento
Modos de Falha: EA = Erodibilidade Alta; EM = Erodibilidade Média; EB = Erodibilidade Baixa

Tabela 3 – Exemplos de modelos empíricos de predição brechas (equações de previsão)

Referência	Equações propostas	Tempo de formação – T_f (h)	Declividade da parede lateral – Z
	Largura média da brecha – \bar{B} (m)		
Macdonald & Langridge - Monopolis (1984)	$V_{er} = 0,0261(V_{w\ def} \times H_w)^{0,769}$ - terra $V_{er} = 0,00384(V_{w\ def} \times H_w)^{0,852}$ núcleo de argila ou enrocamento $\bar{B} = \frac{V_{er} - H_B^2 (CZ_B + \frac{H_B Z_B Z_3}{3})}{H_B(C + \frac{H_B Z_3}{2})} + Z_B H_B$	$T_f = 0,0179 \times (V_{er})^{0,364}$ envoltória superior	0,5H:1,0V
Froehlich (1987)	$\bar{B}/H_B = 0,47 \times K_o (V_w/H_B^3)^{0,25}$ $K_o = \begin{cases} 1,4 & \text{para galgamento} \\ 1,0 & \text{outros} \end{cases}$	$T_f = \frac{79 (V_w/H_B^3)^{0,47}}{\sqrt{g/H_B}}$	$Z = 0,75 K_c \times \{(H_w/H_B)^{1,57} \times [(W_c+W_b)/2H_B]^{0,73}\}$ $K_c = \begin{cases} 0,6 & \text{com núcleo} \\ 1,0 & \text{sem núcleo} \end{cases}$
Von Thun & Gillette (1990)	$\bar{B} = 2,5H_w + C_b$ $C_b = \begin{cases} 6,1; & V_w < 1,23 \text{ Mm}^3 \\ 18,3; & 1,23 \text{ Mm}^3 < V_w < 6,17 \text{ Mm}^3 \\ 42,7; & 6,17 \text{ Mm}^3 < V_w < 12,3 \text{ Mm}^3 \\ 54,9; & V_w > 12,3 \text{ Mm}^3 \end{cases}$	$T_f = \begin{cases} 0,02H_w + 0,25 & \text{Resistentes a erosão} \\ \bar{B}/4H_w & \\ 0,015H_w & \\ \bar{B}/(4H_w + 61) & \text{Facilmente erodíveis} \end{cases}$	1,0H:1,0V Solos não-coesivos 1,0 a 0,33H:1,0V Solos coesivos
Froehlich (1995)	$\bar{B} = 15 \times K_o V_w^{0,32} H_B^{0,19}$ $K_o = \begin{cases} 1,4 & \text{para galgamento} \\ 1,0 & \text{outros} \end{cases}$	$T_f = 3,84 V_w^{0,53} H_B^{-0,90}$	$Z = \begin{cases} 1,4 & \text{para galg.} \\ 0,9 & \text{outros} \end{cases}$
Froehlich (2008)	$\bar{B} = 0,27 \times K_o V_w^{1/3}$ $K_o = \begin{cases} 1,3 & \text{para galgamento} \\ 1,0 & \text{outros} \end{cases}$	$T_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g H_B^2}}$	$Z = \begin{cases} 1,0 & \text{para galg.} \\ 0,7 & \text{outros} \end{cases}$
Xu & Zhang (2009)	$\frac{\bar{B}}{H_B} = 5,543 \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w}\right)^{0,739} e^{(b_4 + b_5)}$ $b_4 = \begin{cases} -1,207 & \text{GG} \\ -1,747 & \text{PIP} \end{cases} \quad b_5 = \begin{cases} -0,613 & \text{EA} \\ -1,073 & \text{EM} \\ -1,268 & \text{EB} \end{cases}$	$T_f = b_5 \left(\frac{H_d}{15}\right)^{0,654} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w}\right)^{1,24}$ $b_5 = \begin{cases} 0,038 & \text{EA} \\ 0,066 & \text{EM} \\ 0,205 & \text{EB} \end{cases}$	$Z = (B_t - \bar{B})/H_B$
Froehlich (2016)	$\bar{B} = 0,23 \times K_o V_w^{1/3}$ $K_o = \begin{cases} 1,5 & \text{galgamento} \\ 1,0 & \text{erosão interna} \end{cases}$	$T_f = 60 \sqrt{\frac{V_w}{g H_B^2}}$	$Z = \begin{cases} 1,0 & \text{para galg.} \\ 0,6 & \text{erosão int.} \end{cases}$

H_B = Altura da brecha (m); V_{er} = Volume erodido do maciço (m³); $V_{w\ def}$ = Volume de água que passa pela apenas pela brecha (m³); H_w = Carga hidráulica acima do fundo da brecha (m); C = Largura da crista (m); Z_B = Declividade da parede lateral da brecha; $Z_3 = Z_1 + Z_2$; Z_1 = Declividade média do talude de montante; Z_2 = Declividade média do talude de jusante; V_w = Volume acima do fundo da brecha armazenado no reservatório no momento da ruptura, não sendo considerado o volume do hidrograma afluyente (m³); g = aceleração da gravidade (m/s²); W_c = Largura da crista (m); W_b = Comprimento longitudinal da brecha desde de o talude de jusante até o talude de montante (m); C_b = Coeficiente de escala que varia em função do volume do reservatório (m); \bar{B} = largura média da brecha (m); b_4 e b_5 : Coeficientes da regressão linear múltipla; $B_t = H_B 0,996 (V_w^{1/3}/H_w)^{0,558} e^{(b_4+b_5)}$ [b4 = 0,258 GG; -0,262 PIP; b5 = 0,377 EA; -0,092 EM; -0,288 EB]

3.3.1.2 Modelos Paramétricos

Os modelos paramétricos consistem, basicamente, na parametrização do processo de abertura da brecha de ruptura ao longo do tempo. Para tanto, adota-se como dados de entrada desses modelos a geometria final e o tempo de formação da brecha, que

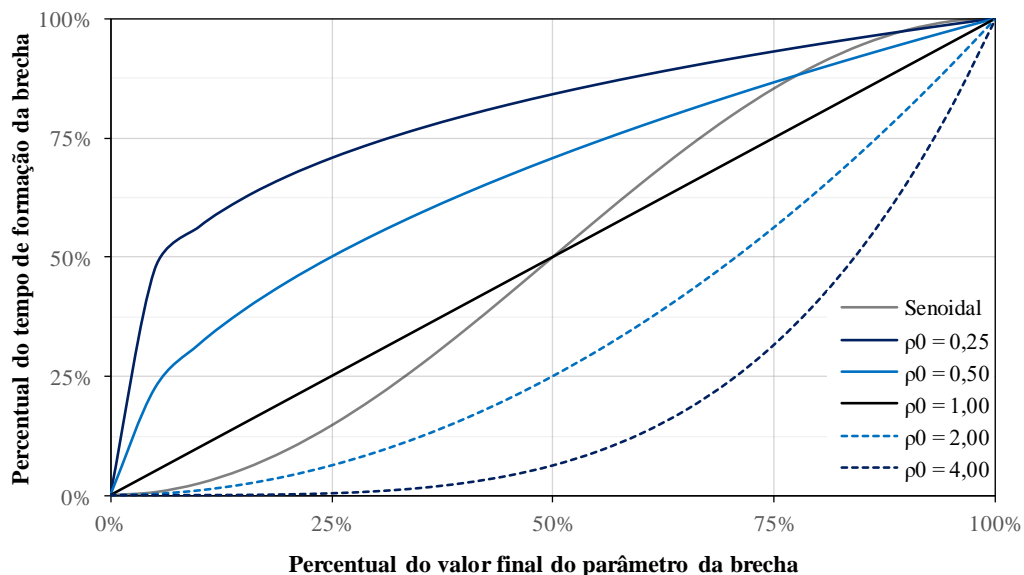
podem ser estimados, por exemplo, a partir dos modelos empíricos de previsão (WAHL, 1998).

A progressão temporal da formação da brecha pode ser considerada como linear, não-linear ou senoidal. A taxa de progressão da abertura da brecha pode ser representada pelo parâmetro β , representado pela Equação (2). A relação proposta por FREAD & LEWIS (1998) representa a forma de progressão linear e não-linear. A forma de desenvolvimento senoidal foi proposta por BRUNNER (2002). A Figura 12 apresenta graficamente as formas de progressão da brecha a partir das taxas de erosão definidas pela Equação (2).

$$\beta(t_b) = \begin{cases} \left(\frac{t_b}{\tau}\right)^{\rho_0} & \text{linear e não-linear} \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{sen} \left[\pi \left(\frac{t_b}{\tau} - \frac{1}{2} \right) \right] \right\} & \text{senoidal} \end{cases} \quad (2)$$

na qual: β = Taxa de progressão da brecha; t_b = tempo de simulação desde o início da formação da brecha ($0 \leq t_b \leq \tau$); τ = tempo total de formação da brecha; ρ_0 = coeficiente de linearidade, sendo 1,00 para linear, 2,00 para quadrático, etc.

Figura 12 – Tipos de progressão da brecha de ruptura adotados em modelos paramétricos estimados a partir da Equação 2



Observa-se que para valores do coeficiente de linearidade (ρ_0) menores do que 1,00, são representadas taxas mais aceleradas no período inicial, com uma desaceleração posterior. Já para valores acima de 1,00 o comportamento é o oposto, com menores taxas de expansão da brecha no período inicial e uma aceleração posterior. O

desenvolvimento senoidal, por sua vez, é caracterizado por uma taxa menor no início, com uma aceleração no intervalo intermediário retornando a uma taxa menor ao final do processo. Já a progressão linear considera que a abertura da brecha ocorre a uma taxa constante ao longo do tempo

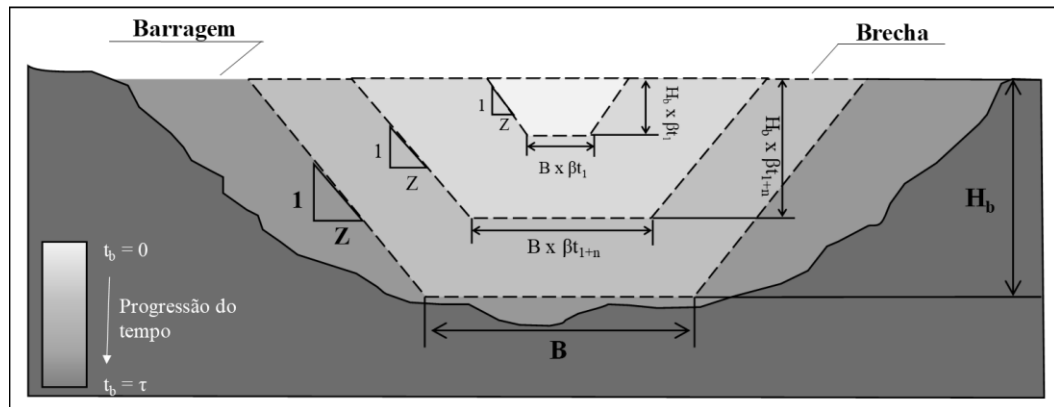
A partir da taxa de progressão de brecha e dos valores dos parâmetros relativos a geometria final da brecha, é possível estabelecer uma relação paramétrica para simular o processo de abertura da brecha de ruptura. Como exemplo, apresentam-se as Equações (3) e (4), que descrevem o processo de abertura e expansão da brecha de ruptura ao longo do tempo e a Figura 13 apresenta um croqui esquemático desse processo.

$$H_{b_{tb}} = H_b \times \beta_{tb} \quad (3)$$

$$B_{tb} = B \times \beta_{tb} \quad (4)$$

na qual: $H_{b_{tb}}$ = Altura da brecha no instante t_b (m); H_b = Altura final da brecha, pré-definida (m); B_{tb} = Largura de fundo no instante t_b (m); B = Largura de fundo final da brecha, pré-definida (m); β_{tb} = Percentual do parâmetro final da brecha no instante t_b .

Figura 13 – Vista frontal da progressão da brecha na modelagem paramétrica



Fonte: adaptado de FREAD & LEWIS (1998)

Segundo COLORADO (2020), geralmente é observado que o crescimento da brecha de ruptura ocorre de forma lenta no início e no final da formação, com desenvolvendo mais rapidamente na etapa intermediária. De acordo com a publicação isso leva a crer que o método de progressão senoidal é mais preciso. No entanto, os autores apontam que caso haja uma restrição importante no vale a jusante, capaz de gerar controle

hidráulico na brecha, que não é representado pelo modelo aplicado, o método de progressão linear pode ser mais adequado.

Aplicando a modelagem paramétrica acoplada a um modelo hidrológico, sem restrições a jusante, COLORADO (2020) observou diferenças mínimas nos resultados obtidos a partir do método de progressão linear e do senoidal. Já a partir do uso de um modelo paramétrico em conjunto com o modelo hidráulico, o qual considera eventuais restrições a jusante, a publicação indica que método de progressão da brecha pode ser um parâmetro sensível para os resultados da modelagem. Os autores observaram que a vazão de pico dos hidrogramas resultantes da progressão senoidal sempre foram superiores ao do método linear, recomendando, portanto, o uso do método senoidal no uso de modelos hidráulicos.

Segundo MORRIS *et al.* (2009), com base na observação de uma série de testes em modelos físicos de pequeno porte, a taxa de erosão pode aumentar e diminuir em função do processo estrutural de falha. Como exemplo, os autores citam o caso de uma barragem em aterro com a presença de núcleo em argila. Nesse caso observou-se que o processo erosivo na parte em aterro se desenvolve pela erosão superficial progressiva até que se atinja a parcela do núcleo onde o processo erosivo passa a ser do tipo *headcutting* até voltar à parcela em aterro, na qual retoma-se a erosão superficial progressiva. No exemplo, o desenvolvimento da brecha ocorre com uma taxa de erosão maior no início e no final, apresentando uma queda no trecho composto pelo núcleo formado em argila.

MORRIS (2013) aponta como uma das limitações dos modelos paramétricos a necessidade de definir o modo e os valores da taxa de erosão da brecha. O autor considera que essa pode ser uma escolha subjetiva e que não leva em conta aspectos físicos do processo de formação da brecha.

3.3.2 Modelos para estimativa dos hidrogramas de ruptura

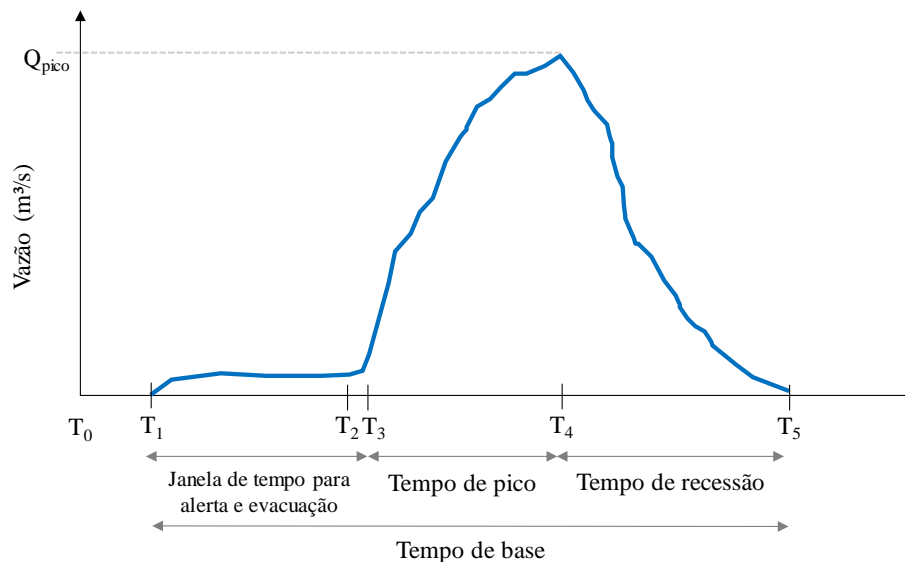
Segundo MORRIS (2013), o hidrograma defluente da ruptura de uma barragem representa a taxa temporal de esvaziamento de seu reservatório em virtude de uma falha no barramento. Para o autor, um hidrograma genérico, resultante de uma ruptura

gradual de uma barragem, pode ser caracterizado em 5 fases no tempo, conforme descrito a seguir e ilustrado na Figura 14.

- Fase 1 (T0 a T1): Representa a vazão antes da ruptura, em uma situação pré-determinada. Considera-se que não há falha na barragem nem vazão defluente na estrutura;
- Fase 2 (T1 a T2): Intervalo de inicialização da falha da barragem, na qual o processo é identificado. A ruptura da estrutura ainda pode ser evitada e a vazão defluente é pequena. Esse intervalo é de grande importância no planejamento das ações emergenciais. Seja em relação às ações ligadas à tentativa de corrigir a falha e evitar a ruptura da estrutura, como também para o acionamento do sistema de alerta e evacuação da população a jusante;
- Fase 3 (T2 a T3): Etapa de transição. A vazão defluente da barragem começa a aumentar mais rapidamente em função do aumento das dimensões da brecha. Eventualmente, também é influenciada pelo aumento da carga hidráulica no reservatório, caso haja afluência de uma cheia. Essa é uma fase crítica na qual a ruptura é normalmente inevitável. Porém, há casos em que o material da barragem resiste à erosão e impede a ruptura completa. Ressalta-se que rupturas instantâneas não apresentam as fases descritas até aqui, sendo descritas apenas pelas fases seguintes;
- Fase 4 (T3 a T4): Etapa que se inicia a partir do momento no qual a ruptura não pode mais ser evitada. A erosão do material da barragem é acelerada e aumenta a taxa de abertura da brecha. Como consequência, observa-se um aumento considerável da vazão defluente do reservatório. O ponto inicial dessa fase é definido como gatilho da ruptura. Esse é caracterizado pela inflexão acentuada do hidrograma de ruptura, onde fica nítida a mudança de comportamento das vazões defluentes. Essa fase representa toda a ascensão do hidrograma de ruptura e finaliza no instante em que se observa o pico de vazão defluente;
- Fase 5 (T4 a T5): Fase de recessão do hidrograma de ruptura. Caracterizada pela continuidade do esvaziamento do reservatório através da brecha de ruptura. Normalmente é um processo mais lento do que a fase anterior. A carga hidráulica no reservatório é menor e a seção de controle da brecha de ruptura apresenta praticamente suas dimensões máximas. Apesar de ainda ocorrer um

processo erosivo, principalmente nas laterais da brecha, ele é lento e não altera a largura da brecha de maneira significativa.

Figura 14 – Hidrograma de ruptura genérico



Fonte: adaptado de MORRIS (2013)

BRUNNER (2014) indica que a simulação do esvaziamento do reservatório pode ser realizada por dois métodos. Segundo o autor, o primeiro se baseia na variação do nível de água no reservatório (*level pool routing*), assumindo como horizontal a linha de água dentro do reservatório. O segundo método corresponde ao modelo hidrodinâmico completo, baseado nas equações de Saint-Venant. Nesse caso, a declividade da linha de água é considerada.

Segundo TUCCI (1998), em reservatórios a linha de água de fato, se aproxima de uma horizontal. Normalmente, observa-se nesses corpos hídricos grandes profundidades e baixas velocidades. Pode-se assumir que os termos dinâmicos do escoamento são pequenos e desprezíveis perto da grande variação de armazenamento. Apesar disso, o autor ressalta que em alguns reservatórios a declividade da linha de água pode ser importante, não sendo possível desprezar os efeitos dinâmicos.

Segundo CHOW *et al.* (1988), diferentes procedimentos foram propostos no intuito de simular o escoamento em reservatórios. Baseado na equação da continuidade, métodos tabulares e funcionais foram desenvolvidos para substituir métodos gráficos,

tornando o processo automatizado. O método de *Puls* - Equação (5) é um dos mais conhecidos nesse sentido.

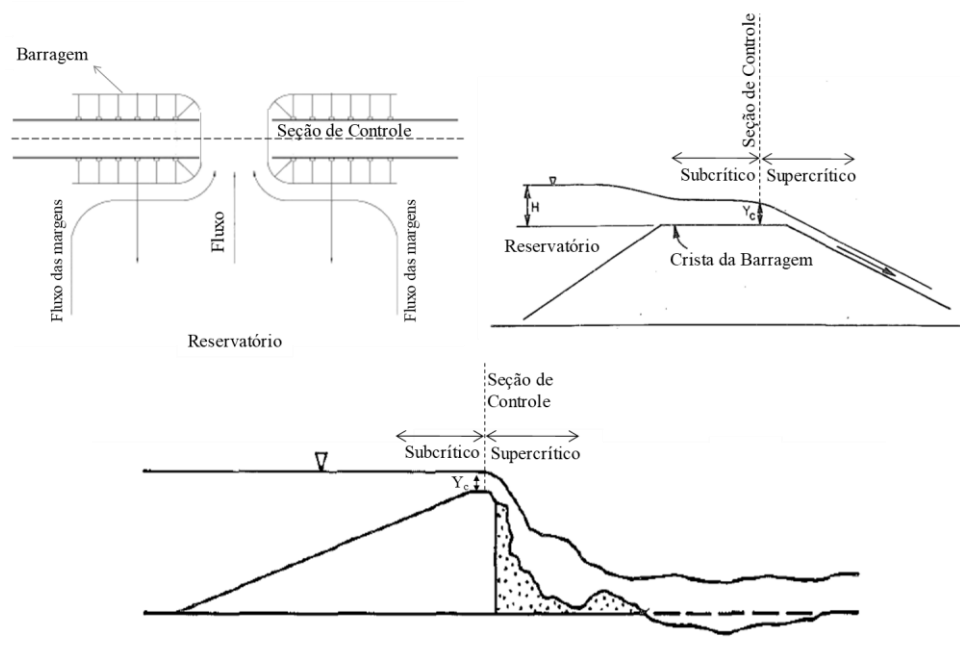
$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (5)$$

na qual: I_t e I_{t+1} são vazões de entrada no reservatório em t e $t+1$; Q_t e Q_{t+1} são vazões de saída no reservatório em t e $t+1$; S_t e S_{t+1} o armazenamento no reservatório nos referidos tempos.

O modelo matemático do método de *Puls* apresenta duas incógnitas (Q e S no $t+1$). Como existe apenas uma equação no modelo, para a solução desse sistema é necessária uma equação adicional que estabeleça $Q = f(S)$. Essa função é obtida a partir das características do reservatório, determinadas pelas curvas cota-volume e cota-vazão (TUCCI, 1998). No caso das rupturas de barragens, a curva cota-vazão defluente do reservatório pode ser definida como a curva de descarga da brecha de ruptura.

Segundo SINGH (1996), na seção da brecha de ruptura, o escoamento defluente do reservatório pode ser considerado crítico, sem perda indevida de precisão. Dessa forma, o autor assume que a vazão através da brecha pode ser estimada de forma análoga a uma soleira vertente. Nesse caso, a brecha de ruptura representa uma seção de controle hidráulico (Figura 15). Assim, em rupturas por galgamento e *piping*, a vazão defluente da ruptura pode ser estimada, respectivamente, pelas Equações (6) (7).

Figura 15 – Controle hidráulico na ruptura



Fonte: adaptado de POWLEDGE, et al. (1989b)

$$Q = C_d \times L_e \times H^{3/2} \quad (6)$$

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{2gH} \quad (7)$$

nas quais: Q = Vazão (m^3/s); C_d = Coeficiente de descarga; L_e = Largura efetiva (m); H = Carga hidráulica (m); A = Área do orifício (m^2); g = aceleração da gravidade (m/s^2).

Os coeficientes de descarga, normalmente obtidos por meio de observações experimentais, variam em função da forma da soleira (espessa, delgada, retangular, triangular, trapezoidal) ou da forma da entrada e saída dos orifícios que conformam as linhas de fluxo do escoamento. SINGH (1996), indica o valor de 1,7 no caso de ruptura por galgamento e valores entre 0,60 e 0,65 no casos de *piping*. Já a publicação de USBR (1987) indica que esses valores variam entre 1,705 e 2,10 para soleiras vertentes e 0,607 a 0,98 para os orifícios.

Os modelos paramétricos de formação de brecha normalmente encontram-se acoplados a modelos computacionais que realizam a simulação do trânsito de cheias em reservatórios. Módulos paramétricos para a simulação da progressão da brecha e síntese do hidrograma de ruptura estão presentes em diversos programas computacionais amplamente difundidos na prática da engenharia de recursos hídricos. Citam-se o HEC-HMS e HEC-RAS, desenvolvidos pelo Corpo de

Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U. S. Army Corps of Engineers – USACE*), o DAMBRK (FREAD, 1977), FLDWAV (FREAD, 1993), entre outros.

O método de Puls normalmente é considerado para a simulação do escoamento em reservatórios. Porém, modelos hidrodinâmicos, discutidos a seguir, também podem ser aplicados para esse fim. Além desses, também é possível citar os modelos baseados em formulações empíricas. A exemplo dos modelos de previsão de brecha, os modelos empíricos utilizam observações de casos históricos para definir equações que relacionam a vazão de pico dos hidrogramas com características da barragem e do modo de falha. A partir da vazão de pico, os hidrogramas podem ser definidos a partir de funções que relacionam as vazões ao longo do tempo, como aquelas apresentadas por MASCARENHAS (1990) e BARFIELD *et al.* (1981).

3.3.3 Modelos de propagação dos hidrogramas de ruptura

A propagação hidráulica de um hidrograma de ruptura tem como principal objetivo delimitar a área potencialmente alagável a jusante de uma barragem em decorrência de sua falha. A caracterização do escoamento, a partir da definição das velocidades e profundidades máximas e do tempo de propagação do hidrograma no vale a jusante também fazem parte do escopo dessa análise. Essas informações são fundamentais para a avaliação dos danos relacionados à inundação.

ZHANG *et al.* (2016) descrevem que a propagação dos hidrogramas de ruptura no vale a jusante se baseia nos fundamentos da hidráulica de rios. Essa análise é uma ferramenta para avaliação do grau de severidade da inundação provocada pela ruptura de uma barragem, especialmente por meio da análise da profundidade e velocidade da inundação. Os autores indicam que as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis representam o núcleo da maioria dos modelos computacionais utilizados para esse fim.

Segundo SCHLICHTING (1979), as equações diferenciais de Navier-Stokes expressam a condição de equilíbrio, para cada partícula de um fluido, entre as forças relacionadas a massa, superfície e inércia. Segundo o autor, um fluido em movimento está sujeito à ação das forças de compressão (tensão normal), tangenciais (tensão de

cisalhamento) e gravitacionais (peso). Para descrever seu movimento, é necessário aplicar os conceitos fundamentais de conservação da quantidade de movimento.

De acordo com SCHLICHTING (1979), o modelo matemático de Navier-Stokes considera que a segunda lei de Newton, na qual a resultante das forças é igual à derivada da quantidade de movimento em relação ao tempo, é válida em cada ponto do escoamento. As equações completas de Navier-Stokes representam o comportamento tridimensional (3D) do escoamento de um fluido. Simplificações nessas equações permitem descrever a propagação de um fluido em uma ou duas dimensões (1D ou 2D).

A equação de Águas Rasas (*Shallow Water Equation*) é uma das possibilidades para a realização da modelagem simplificada da propagação do escoamento de modo bidimensional (2D). Com base na premissa de que a escala de comprimento vertical do escoamento (profundidade) é muito inferior à escala de comprimento horizontal (largura e/ou extensão), considera-se que a velocidade vertical do escoamento é suficientemente pequena, admitindo-se assim a distribuição hidrostática de pressão que torna possível desconsiderar os termos de aceleração vertical do escoamento.

Uma abordagem ainda mais simplificada para a modelagem bidimensional seria a partir das equações de onda difusiva. Trata-se de uma redução das equações de Águas Rasas, no qual o termo da quantidade de movimento é representado apenas pelas parcelas do atrito do leito e do gradiente de pressão barotrópica (gravidade). Nesse caso, os termos relacionados à aceleração não permanente, advecção, turbulência e efeitos de Coriolis são desprezados (USACE, 2016).

Segundo BRUNNER (2014), a utilização da onda difusiva representa uma grande vantagem em termos de estabilidade e esforço computacional despendido na modelagem. Porém, esse método possui aplicação limitada a situações onde o escoamento é predominantemente governado pelas forças inerciais e de atrito. Normalmente, essa não é uma situação observada em um escoamento resultante de uma ruptura de uma barragem. Sendo assim, o autor recomenda a análise de sensibilidade entre o método da onda difusa e as equações do momento completo para verificar se a vantagem computacional não resulta em uma indevida redução na precisão do modelo matemático.

O modelo matemático proposto por Saint-Venant também corresponde a uma simplificação das equações de Navier-Stokes que pode ser empregado na simulação da propagação hidráulica dos hidrogramas provenientes da ruptura de barragens. Esse modelo representa o escoamento unidimensional (1D), no qual se admite a distribuição de velocidades apenas no sentido preferencial do fluxo.

WANG *et al.* (2017) conclui que o escoamento resultante da ruptura hipotética de uma barragem apresenta, claramente, características tridimensionais, sobretudo quando há uma região urbana no vale a jusante. Os autores descrevem que a componente vertical da velocidade apresenta grande influência no escoamento da inundação. A ocorrência de fenômenos como vórtices, colisão e reflexão no entorno de estruturas a jusante são caracterizadas pelos autores como tipicamente 3D. Modelos computacionais baseados em fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) incorporam as equações completas de Navier-Stokes e podem ser utilizados na representação do escoamento proveniente de uma ruptura de barragem em três dimensões

Como limitação para a análise tridimensional do escoamento WANG *et al.* (2017) citam a dificuldade na apresentação detalhada da superfície 3D no vale a jusante, principalmente em relação à rugosidade das estruturas. Os autores ressaltam que esse aspecto também não é representado de maneira adequada nos modelos 2D e 1D. Esses ainda demonstram limitações na representação do escoamento proveniente de ruptura de barragens. Apesar disso, os autores pontuam que, na literatura, grande parte dos estudos de propagação de inundações decorrentes da ruptura de barragens tem sido elaboradas a partir de modelos 1D e 2D, sendo esses métodos considerados válidos.

Observa-se que nos modelos matemáticos apresentados para a caracterização de um escoamento, existem coeficientes que representam as forças de atrito que atuam no movimento de um fluido. O coeficiente de rugosidade de Manning é o mais utilizado nesses modelos para representar a resistência imposta pelo leito ao escoamento do fluido. Segundo USACE (2016), a determinação desse parâmetro é altamente variável e depende de vários aspectos como: a cobertura da superfície do curso de água,

características da vegetação, alinhamento e irregularidade no leito, obstruções, material suspenso e mudanças sazonais.

Valores de referência para o coeficiente de Manning foram estimados por vários autores como CHOW (1959), ALDRIDGE & GARRET (1973) e BENSON & DALRYMPLE (1967). Na maioria dos casos, os valores apresentados foram definidos a partir da observação de fluxos de água em regime de escoamento permanente, o que não é o caso do escoamento resultante da ruptura de uma barragem.

3.4 Análise de Incertezas em Modelos

No âmbito da modelagem matemática e computacional de processos físicos, incertezas são categorizadas, normalmente, em três classes: i) Aleatórias, as quais descrevem a variabilidade natural e residual de um processo físico; ii) Epistêmicas, que representam a falta de conhecimento na descrição do processo e iii) Globais, que refletem as falhas do modelo e dos dados de entrada (KENNEDY & O'HAGAN, 2001). Sendo assim, essas incertezas podem ter origem na definição dos parâmetros, na inadequação dos modelos, na variabilidade residual e paramétrica, nos erros de observação e nas codificações dos modelos.

Segundo BEVEN (2009), existem duas formulações técnicas para se descrever incertezas, uma derivada da teoria dos conjuntos e a outra proveniente da estatística. O autor descreve que, na teoria dos conjuntos, incertezas existem quando há um conjunto de alternativas possíveis e apenas uma é necessária. Com base nos conceitos estatísticos, BEVEN (2009) relaciona a incerteza com a probabilidade de que certa alternativa seja aquela necessária. A teoria da probabilidade permite quantificar as incertezas, no espectro de 0 a 1, considerando o conjunto universal de alternativas. O valor 0 corresponde a eventos impossíveis e 1 para eventos de ocorrência certa.

PATÉ-CORNELL (1996), em sua pesquisa relacionada às incertezas em análises de risco, descreve que a identificação e quantificação das incertezas ajuda a elucidar o que é conhecido e o que não é a respeito do fenômeno modelado. Segundo a autora, nem todas as análises demandam um tratamento completo das incertezas. O nível de refinamento do tratamento depende de uma série de fatores, como a magnitude das

consequências de um fenômeno e sua probabilidade de superação. A autora apresenta seis níveis para o tratamento das incertezas em análises de risco, sendo eles: nível 0) detecção da ameaça e identificação dos modos de falha; nível 1) abordagem do pior-cenário; nível 2) quase-pior cenário e envoltórias superiores plausíveis; nível 3) melhores estimativas e valores centrais; nível 4) avaliação de risco probabilística (curva de risco única) e nível 5) avaliação de risco probabilística (múltiplas curvas de risco).

Os níveis apresentados por PATÉ-CORNELL (1996) vão do mais simples (0) ao mais sofisticado (5). Os quatro primeiros níveis não contemplam uma análise quantitativa das incertezas nem consideram noções de probabilidade. Já os dois últimos se baseiam nesses conceitos, o que torna possível quantificar as incertezas.

PAPPENBERGER & BEVEN (2006) descreveram que uma parte significativa da comunidade ainda se mostrava bastante relutante em adotar o conceito de incertezas ao realizar previsões. Os autores relatam que naquela época era comum observar resultados sem a apresentação das faixas de incertezas para os tomadores de decisão, em eventos científicos, publicações e consultoria. Ressalva-se que comunicar o correto intervalo de incerteza não é trivial e que ainda hoje apresentar essa análise não é uma prática comum na modelagem computacional, conforme discute SALTELLI *et al.* (2020) e RAZAVI *et al.* (2021), apesar dos avanços observados.

PAPPENBERGER & BEVEN (2006) elencam sete argumentos utilizados à época para justificar o não uso da análise de incertezas em modelagens hidrológicas e hidráulicas. Ao avaliar cada um dos sete motivos, os autores sugerem que nenhum deles é convincente na maioria das aplicações. Isso vale, pelo menos, nos casos em que a estimativa de incertezas não é limitada por restrições computacionais. Os pontos apresentados por PAPPENBERGER & BEVEN (2006) estão apresentados a seguir

1. Análises de incertezas não são necessárias em modelos fisicamente realistas;
2. Análise de incertezas não é útil para acrescentar conhecimento ao processo;
3. Incerteza ou distribuições de probabilidade não podem ser entendidas pelos tomadores de decisão, políticos e pelo público;
4. Incertezas não podem ser incorporadas no processo de tomada de decisão;

5. Análise de incertezas são muito subjetivas;
6. Análises de incertezas são muito difíceis de serem executadas;
7. Incertezas não importam na tomada de decisão final.

Se na época da publicação PAPPENBERGER & BEVEN (2006) já questionavam os pontos apresentados para o não uso de análises de incertezas, hoje, devido aos avanços da área, esses pontos são ainda mais questionáveis. SALTELLI *et al.* (2020) apresenta uma série de avanços e benefícios na utilização de análises de incertezas em modelos matemático computacionais que desconstrói alguns dos argumentos apresentados. Os autores apontam como um dos principais benefícios da análise de incertezas a indicação do nível de desconhecimento acerca do fenômeno modelado e RAZAVI *et al.* (2021) indica que identificar o nível de desconhecimento dos modelos é uma das maneiras de garantir que modelos sejam úteis à sociedade.

FROEHLICH & GOODELL (2012) também indicam que as incertezas raramente são consideradas durante a avaliação de estudos de ruptura hipotética de barragem. No entanto, esse é um tema que vem sendo estudado por diferentes pesquisadores, sendo algumas aplicações apresentadas a seguir.

3.4.1 Aplicações em estudos de ruptura hipotética de barragens

FROEHLICH & GOODELL (2012) indicam diferentes fontes de incertezas nos estudos de ruptura hipotética de barragens. A escolha dos parâmetros, as condições iniciais e de contorno, o conhecimento incompleto a respeito do fenômeno e os erros de aproximação da solução dos modelos e na sua estruturação lógica são alguns exemplos.

Como alternativa para o tratamento de incertezas, grande parte dos guias de diretrizes para elaboração de estudos de ruptura hipotética de barragens (e.g., COLORADO, 2020; CDA, 2019; ANA, 2016; FEMA, 2013; CADAM, 2000; ICOLD, 1998) sugerem a elaboração de análises de cenários. Nos guias avaliados, observa-se a indicação do desenvolvimento de, pelo menos, dois cenários nos estudos de ruptura hipotética. Um associado ao nível de água normal de operação no reservatório e outro associado ao nível de água máximo *maximorum*. Ressalta-se que essa avaliação é feita principalmente sobre as incertezas relativas à condição inicial da ruptura, não

considerando as incertezas relacionadas aos parâmetros de brecha nem relativas à propagação hidráulica da onda de inundação.

Entre as etapas de simulação da abertura da brecha de ruptura e da propagação hidráulica dos hidrogramas, diferentes autores indicam que a primeira etapa é a que apresenta maior nível de incerteza. BELLOS *et al.* (2020), ao avaliar a incerteza paramétrica na primeira etapa, observou que o grau de incerteza nos valores das vazões de pico dos hidrogramas defluentes da ruptura do é maior que nas profundidades de inundação. Em uma análise similar, PETER (2017) apresentou a mesma conclusão. O número de parâmetros que podem ser considerados como variáveis aleatórias na etapa de simulação da brecha é consideravelmente maior do que na etapa de modelagem hidráulica. Além disso, a faixa de incertezas atreladas a esses parâmetros também costumam ser superiores, o que justifica maior nível de incerteza para a primeira etapa. BELLOS *et al.* (2020) considera sete parâmetros como variáveis aleatórias para a simulação da brecha de ruptura, enquanto PETER (2017) considera três. Já na etapa de modelagem hidráulica observa-se apenas um parâmetro, associado à rugosidade do terreno, que foi considerado constante pelos dois autores.

Equívocos conceituais em modelos de ruptura de barragens são relatados por MORRIS *et al.* (2008), principalmente em relação ao modo de desenvolvimento do processo erosivo das barragens. O uso desses modelos pode atribuir incertezas relacionadas a sua concepção. CEATI (2017) indica que o desconhecimento a respeito do processo erosivo das barragens também é relevante na etapa de simulação da abertura da brecha de ruptura, sendo um dos principais responsáveis pela incerteza nos valores da vazão de pico dos hidrogramas de ruptura em alguns casos.

WAHL (2004) investigou incertezas a respeito dos principais modelos empíricos de previsão de brecha de ruptura. Considerando a base de dados apresentada por WAHL (1998), com 108 casos históricos de ruptura, o autor aplicou as equações de previsão e comparou os resultados obtidos com os valores observados. A quantificação das incertezas foi realizada a partir do método de predição do erro, sendo considerado pelo autor que as faixas de incertezas na previsão dos parâmetros de brecha são

grandes. Para largura média da brecha o autor observou que os valores podem variar em mais ou menos um terço de uma ordem de magnitude, enquanto que para o tempo de formação a faixa de incerteza é de mais ou menos uma ordem de grandeza.

Dada as incertezas nos modelos de previsão de brecha, diferentes autores avaliaram os efeitos da variação dos parâmetros de brecha na predição da vazão de pico dos hidrogramas de ruptura a partir de análises de sensibilidade. De modo geral os resultados dessas análises confirmam a expectativa de que os parâmetros de brecha influenciam nos resultados das análises, demonstrando que alguns parâmetros mais sensíveis que outros. As características de cada caso analisado também são apontadas como um dos fatores que influenciam no modo como os parâmetros de brecha alteram os resultados da análise.

SINGH & SNORRASON (1984) constataram que para reservatórios com capacidade de armazenamento relativamente pequena, o tempo de formação da brecha é o principal responsável pelas variações na vazão de pico do vazão de pico do hidrograma de ruptura. Já para grandes reservatórios a largura da brecha foi o parâmetro mais sensível às alterações na vazão de pico. Os autores ainda descrevem variações na profundidade da brecha apresentaram pequenas variações na vazão de pico do hidrograma defluente não sendo identificada uma relação com a magnitude das barragens.

Segundo WAHL (1998), em grandes reservatórios, a vazão de pico ocorre quando a brecha alcança a máxima profundidade e largura. Em função da inércia volumétrica, as mudanças no nível de água em grandes reservatórios são relativamente pequenas durante o período de formação da brecha. Já em pequenos reservatórios, existe uma mudança mais rápida no nível do reservatório durante a formação da brecha e, como resultado, a vazão de pico tende a ocorrer antes da brecha se desenvolver completamente, segundo o autor. Para esses casos, a taxa de formação da brecha é um parâmetro crucial.

Em dois estudos de caso, AHMADISHARAF *et al.* (2016) concluíram que o tempo de formação da brecha é o parâmetro mais importante na estimativa da vazão e tempo de pico do hidrograma defluente. A largura de brecha apresentou maior relevância na

duração do hidrograma, apresentando menor peso na estimativa dos demais atributos.

FROEHLICH (2008) pontua que a análise de sensibilidade fornece informações importantes sobre o comportamento dos modelos, como foi apontado pelos exemplos apresentados na literatura. Por outro lado, o autor indica que essa é uma técnica limitada para a estimativa das incertezas, uma vez que não fornece a probabilidade associada aos resultados do modelo dada a combinação de um conjunto de dados de entrada.

A fim de estimar probabilidades para os resultados das análises, diferentes autores têm aplicado técnicas estatísticas para a avaliação de incertezas dos hidrogramas de ruptura de barragens em função da variação nos parâmetros de brecha. Duas vertentes são observadas nos estudos apresentados na literatura. A primeira está relacionada à predição do erro dos modelos de previsão de brecha, enquanto a segunda corresponde ao processo iterativo de simulação em que se realiza um grande número de repetições de um modelo determinístico variando os dados de entrada de maneira aleatória.

O método de predição dos erros preconiza que os erros nos modelos de previsão de brecha se comportam segundo uma distribuição de probabilidade. WAHL (2004) utilizou essa técnica para estabelecer uma faixa de incertezas para os valores esperados de alguns modelos empíricos de predição. O autor considera a distribuição Normal para representar a variabilidade dos erros. No entanto, não se sabe, *a priori*, se esses erros apresentam esse comportamento. De maneira similar, FROEHLICH (2008) e FROEHLICH (2016) consideraram os erros Normalmente distribuídos para estimar as incertezas de seu modelo de previsão.

Dentre os processos iterativos de simulação, o Método de Monte Carlo (MMC) representa um dos principais. Basicamente, o método consiste na execução de múltiplas repetições de um modelo considerando o sorteio aleatório dos parâmetros de entrada, determinando um conjunto de diferentes respostas que pode ser avaliado estatisticamente. Uma das premissas desse método é a estabilidade estatística dos resultados, que garante que a adição de uma repetição adicional não altera de maneira significativa os resultados da análise. Para isso, em alguns casos é

necessário realizar um grande número de repetições. Segundo GOODELL (2019), para se observar a convergência estatística em modelos de ruptura hipotética de barragens, é necessário um número de repetições da ordem de 5.000 a 10.000, a depender do número de variáveis aleatórias consideráveis. Métodos que visam reduzir o número de repetições necessárias para alcançar a estabilidade estatística também são aplicados nesse contexto. Como exemplo, citam-se o sorteio guiado do *Latin Hypercube Sampling* (LHS) e da Expansão em Polinômio de Caos (EPC). A Tabela 4 apresenta a descrição de alguns exemplos de aplicação desses métodos.

Os trabalhos apresentados na Tabela 4 demonstram uma variabilidade nos modelos de distribuição de probabilidade para os parâmetros de brecha. Observa-se que em cada caso os modelos de distribuição e seus parâmetros foram definidos a partir de diferentes critérios. Na maioria dos casos, o modelo de distribuição foi definido a partir de premissas de cada pesquisador. Entre os trabalhos consultados, apenas KALININA *et al.* (2020) testa diferentes modelos (Beta e Uniforme) para a definição dos modelos de distribuição. O uso de uma base de dados com casos históricos de ruptura também não é comum na estimativa dos parâmetros dos modelos, sendo essa prática observada apenas em KALININA *et al.* (2020) e AHMADISHARAF *et al.* (2016), sendo que esse último aplica a técnica para apenas um dos três parâmetros considerados como variáveis aleatórias. Observa-se que a maioria dos modelos são estimados com aquilo que os autores julgam como valores plausíveis ou com base nos valores esperados dos modelos de regressão estatística definidos para previsão das brechas.

Tabela 4 – Exemplos de pesquisas que consideram a análise de incertezas nos estudos de ruptura hipotética a partir da aplicação de métodos estatísticos

Autor (ano)	Método de sorteio, repetições, modelo de brecha e rotina de cálculo	Parâmetros aleatórios e modelos de distribuição	Truncado	Método para estimativa dos parâmetros
Bellos <i>et al.</i> (2020)	MMC. 10.000 repetições. HEC-RAS (paramétrico). Rotina implementada em MATLAB.	$B \sim U(100;200)$ $El.fundo \sim U(251;270)$ $Z \sim U(0;2)$ $T_f \sim U(0,2;0,5)$ $C_d \sim U(1,2; 1,6)$ $NA \sim U(300; 326)$		Intervalos considerados como faixa de valores plausíveis. Barragem: Altura (92 m), profundidade da fundação (10 m), largura e cota de crista (330 m e 329), NA normal (326 m).
Kalinina <i>et al.</i> (2020)	EPC. 2.000 repetições. BASEMENT (fisicamente baseado). Rotina implementada em UQLAB (MATLAB).	$H_B \sim \text{Beta}(1,28; 2,98)$ $V \sim \text{Beta}(1,28; 2,98)$ $L_{cr} \sim U(256; 610)$ $L_{ch-rel} \sim U(5,9; 123,6)$ $W \sim U(1;163,66)$ $S_s \sim U(28,28; 45,98)$ $S_b \sim \text{Beta}(3,22; 32,48)$ $M_b \sim \text{Beta}(0,33; 2,07)$ $M_s \sim \text{Beta}(0,40; 1,88)$	[100; 250] [9.200; 2,1x10 ⁵] [0,03; 0,23] [0,01; 0,4] [0,01; 0,4]	Estimativa conforme o princípio da máxima entropia. Baseado em um conjunto amostral de casos históricos de ruptura de barragens de concreto em arco com altura superior a 100 m localizadas na Suíça (14 observações).
Goodell <i>et al.</i> (2018)	MMC. 10.000 repetições. HEC-RAS (paramétrico). Rotina com o controlador externo McBreach.	$El.fundo \sim N(968;0,39)$ $L_{Bfundo} \sim N(9,24; 1,56)$ $Z \sim N(0,5; 0,17)$ $T_f \sim N(0,50;0,13)$ $C_d \sim N(2,75;0,08)$ $C_{pip} \sim N(0,5; 0,07)$ $El.pip \sim N(968;0,39)$	[967;970] [0;21] [0;2,1] [0,1;1,0] [2,0;3,5] [0,1;0,9] [967;970]	$\mu \pm 3\sigma$ igual aos mínimos e máximos dos parâmetros estimados pelos modelos indicadas por FERC. Premissa para $El.fundo$ e valores de referência para C_d e C_{pip} .
Peter (2017)	MMC. 5.000 repetições. BASEbreach (fisicamente baseado). Rotina implementada em MATLAB.	$\alpha \sim U(2,5; 3,2)$ $\beta \sim U(50^\circ; 85^\circ)$ $\gamma \sim \text{LN}(-8,8; 0,75)$		Análise da forma do reservatório no caso de α . Valores considerados plausíveis no caso de β . Ajuste com base em casos históricos no caso de γ .
Lara (2016)	MMC. 20.000 repetições. HEC-RAS (paramétrico). Rotina com o controlador externo McBreach.	$El.fundo \sim N(17,5; 0,83)$ $L_{Bfundo} \sim N(789;236)$ $Z \sim U(0;1)$ $T_f \sim N(2,15;0,62)$ $C_d \sim U(1,44;1,82)$ $C_{pip} \sim U(0,5; 0,6)$ $El.pip \sim N(41;7)$	[15;20] [79;1.500] [0,3;4,0] [20;62]	Uso de premissas para $El.fundo$ e $El.pip$. Uso de modelos empíricos de previsão para L_{Bfundo} . Valores de referência para Z ; T_f ; C_d ; C_{pip} . Barragem 1: Altura (95 m) largura crista (5.308 m).
Ahmadishar af <i>et al.</i> (2016)	LHS. 10.000 repetições. Modelo paramétrico e rotina de cálculo implementados no Goldsim.	$B \sim \text{Tri}(44;399;159)$ $T_f \sim \text{Tri}(0,66;19,42;6,06)$ $H_B/H_d \sim \text{Tri}(0,3;1,2;1,0)$		Uso de equações de previsão para B e T_f . Estatística de 53 casos apresentados por WAHL (1998) para H_B/H_d . Barragem: Altura (40,7 m); Volume (25,5 Mm ³); Crista (399 m).
Altinakar <i>et al.</i> (2013)	LHS. 40 repetições. DSS-WISE (paramétrico). Rotina "lhsdesign" do MATLAB.	$B \sim \text{LN}(4,137; 0,195)$ $T_f \sim \text{LN}(-0,577;0,320)$		Predição dos erros do modelo de FROELICH (1995) segundo WAHL (2004). Considera-se os erros distribuídos segundo uma distribuição Log-Normal (base 10).

B : Largura média da brecha (m); $El.fundo$: Cota de fundo da brecha (m); Z : Declividade da parede lateral (m/m); T_f : Tempo de formação da brecha (h); C_d : Coeficiente de descarga da brecha (m^{1/2}/s); NA : Nível de água no reservatório no instante da ruptura (m); H_B : Altura da brecha (m); V : Volume do reservatório (m³); L_{cr} : Largura de crista (m); L_{ch-rel} : Extensão do canal relativo à altura da barragem (m/m); S_s : Declividade da parede da brecha (°); S_b : Declividade do canal (m/m); M_b : Manning da parede do canal (s/m^{1/3}); M_s : Manning do leito (s/m^{1/3}); L_{Bfundo} : Largura de fundo da brecha (m); C_{pip} : Coeficiente de descarga *piping* (m^{1/2}/s); $El.pip$: Elevação início *piping* (m); α : Coeficiente de forma do reservatório (adm.); β : Ângulo lateral da brecha (°); γ : Coeficiente de escala da taxa de transporte (adm.); H_B/H_d : Razão entre altura da brecha e altura da barragem (m/m).

Analisando os estudos apresentados, observa-se que a maior parte dos modelos de simulação de brecha aplicados nas pesquisas são paramétricos, porém também observa-se a utilização de modelos fisicamente baseados. Observa-se que grande parte das rotinas do processo de simulação probabilísticas foram implementadas em MATLAB. O uso de uma rotina implementada em um programa específico para análises probabilísticas também foi observado (e.g., Goldsim), além do uso de um aplicativo que funciona como controlador externo ao HEC-RAS (e.g., McBreach). O McBreach corresponde a um programa desenvolvido pelo grupo Kleinschmidt Associates (GOODELL, 2019) que é distribuído gratuitamente. Esse possui algoritmo e interface acoplados ao *software* HEC-RAS que permite o sorteio dos parâmetros de brecha do modelo a partir de um amostrador aleatório. Os valores gerados aleatoriamente são utilizados na definição dos valores dos parâmetros de brecha com base nas funções densidade de probabilidade estabelecidas. O aplicativo disponibiliza apenas alguns tipos de modelos de distribuição de probabilidade (e.g, Normal, Triangular, Log-Normal e Uniforme), que podem não representar da melhor maneira o comportamento dos parâmetros.

Na aplicação do controlador externo McBreach, GOODELL (2018) propõe a utilização do modelo de distribuição Normal (μ , σ) para representação dos parâmetros de brecha, no qual a relação $\mu \pm 3\sigma$ é igual aos valores mínimos e máximos dos parâmetros estimados pelas equações de previsão indicadas por FERC (2014). Essa relação garante que 99,7% da amostra fique contida entre os valores extremos obtidos pelas equações empíricas. Para a altura da brecha o autor recomenda como premissa a adoção do valor máximo associado a cota de fundação da barragem ou do topo rochoso e como mínimo uma altura igual a um quarto da altura da barragem.

Na aplicação do programa específico de análises probabilísticas Goldsim, ADMADISHARAF *et al.* (2016) propõe a utilização do modelo de distribuição Triangular (a, b, c). Para a razão H_B/H_d , os autores sugerem um modelo baseado em observações de caso históricos registrados na base de dados apresentada por WAHL (1998). Já para o tempo de formação e para a largura média da brecha, os autores sugerem adotar os valores extremos (a e b) e a moda (c) iguais aos mínimos, máximos e média dos parâmetros estimados a partir das equações empíricas disponíveis na literatura, incluindo a faixa de incerteza proposta por WAHL (2004). Os autores

propõem um modelo de distribuição de probabilidade para o tempo de formação da brecha ajustado a um conjunto de dados históricos, mas não o utilizam na aplicação. A declividade da parede lateral não foi considerada como uma variável aleatória pelos autores.

O Método de Estimativa por Pontos (MEP) é uma alternativa ao MMC para a análise probabilística de ruptura de barragens. Esse método aproxima a Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) de uma variável aleatória a partir da massa de probabilidade discreta concentrada em pontos. Segundo o método de ROSENBLUETH (1975), para um modelo com n variáveis aleatórias são necessários apenas 2^n rodadas para a estimativa dos momentos da amostra de resultados do modelos (FROEHLICH & GOODELL, 2012). Em estudos de ruptura hipotética de barragens, considera-se, normalmente, duas a sete variáveis aleatórias. Assim, o número de simulações necessárias para se obter os resultados esperados é consideravelmente menor do que no MMC, o que é considerado uma vantagem.

FROEHLICH & GOODELL (2012) e RESENDE *et al.* (2015) são dois exemplos de aplicações do MEP em estudos de ruptura hipotética de barragens. Os primeiros autores consideraram 4 variáveis aleatórias (L_{Bfundo} , Tf , Z , C_d), sendo realizadas 16 simulações, enquanto os demais autores consideraram 3 variáveis aleatórias (L_{Bfundo} , Tf , Z), com 8 simulações. Os dois trabalhos consideram as incertezas paramétricas definidas no modelo de previsão de brecha proposto por FROEHLICH (2008) a partir da predição dos erros considerados t-distribuídas. No método empregado, cada simulação representa uma probabilidade ponderada pelo coeficiente de correlação entre as variáveis. Os autores consideraram não haver correlação entre os parâmetros, sendo cada conjunto de parâmetros igualmente prováveis e a partir dessa premissa as probabilidades de excedência dos resultados foram estimadas. Apesar da vantagem do número reduzido de combinações necessárias para a análise, observa-se como limitações, a não garantia, *a priori*, dos erros do modelo utilizado serem t-distribuídos e de uma correlação nula entre os parâmetros.

A abordagem Bayesiana também foi utilizada na análise de incertezas nos estudos de ruptura hipotética de barragens de terra. PETER (2017) utiliza essa técnica para definir os parâmetros do modelo matemático da taxa de transporte de sedimentos -

Equação (8), que representa a erosão gradual do material da barragem, incorporando no modelo computacional BASEBreach.

$$q_s = \gamma \times u^v \times r_h^\eta \quad (8)$$

na qual: q_s = taxa de sedimentos; γ = coeficiente de escala global; u = velocidade do escoamento; r_h = raio hidráulico da brecha; v e η = expoentes que combinam as formulações de transporte e as leis de atrito

Uma análise Bayesiana Multinível foi aplicada por PETER (2017) para a ajuste dos expoentes da equação de transporte de sedimentos (v e η), considerados como valores fixos e com incerteza epistêmica e também para o coeficiente de escala global (γ), considerado como variável aleatória com incerteza epistêmica. O conhecimento *a priori* de v e η foi definido a partir de equações empíricas descritas na literatura, sendo os parâmetros distribuídos pela distribuição Normal Bivariada. Para o coeficiente de escala global não foi considerado nenhum conhecimento *a priori*. Por ser uma variável aleatória adotou-se o modelo Log-Normal como distribuição *a priori* sendo seus hiperparâmetros (λ , ζ) modelados segundo a distribuição Uniforme.

Para o ajuste dos parâmetros, PETER (2017) utilizou 15 casos históricos de ruptura relatados na literatura, sendo as variáveis de interesse a vazão de pico do hidrograma e a largura média da brecha. A função formal de verossimilhança foi numericamente aproximada pela integração de Monte Carlo. Segundo PETER (2017), as distribuições *a posteriori* de v e η foram muito próximas da distribuição *a priori*, não sendo observado um grande acréscimo de conhecimento para esses parâmetros. Já para os hiperparâmetros de γ , o autor indica um grande acréscimo de informação. Considerando os valores mais prováveis, PETER (2017) indica que o modelo da taxa de transporte de sedimentos é definido conforme indica a Equação (9), sendo $\gamma \sim LN(-8,3; 0,83)$.

$$q_s = \gamma \times u^{4,4} \times r_h^{-0,77} \quad (9)$$

Estudos relacionados à análise de incertezas na etapa de propagação dos hidrogramas de ruptura também são observados na literatura. Alguns autores avaliam como as incertezas nos parâmetros de brecha refletem nos resultados da inundação a jusante, enquanto outros autores focam na análise das incertezas nos parâmetros dos modelos hidrodinâmicos adotados.

PETRASCHECK & SYDLER (1984) avaliaram a influência da largura e tempo de formação da brecha de ruptura nos níveis de inundação e tempo de chegada da onda no vale a jusante das barragens. Segundo os autores, para os locais mais próximos à barragem, ambos parâmetros podem apresentar grande influência. Já para os locais mais a jusante, o tempo de chegada do pico de vazão pode ser alterado de maneira considerável em função da variação do tempo de formação da brecha. O valor do pico de vazão e níveis de inundação se mostram menos sensíveis às mudanças nos parâmetros de brecha avaliados.

VIANINI NETO (2016) observou, com base na análise de sensibilidade do coeficiente de rugosidade, uma tendência de aumento da área inundada pela passagem do hidrograma de ruptura conforme aumenta-se o coeficiente de rugosidade de Manning. O autor observa que o coeficiente de rugosidade de Manning apresenta maior influência no trecho inicial de modelagem. TSCHIEDEL & PAIVA (2018) também observam maior influência na profundidade para as seções mais próximas da barragem, enquanto que nas áreas mais distantes verificaram influência do parâmetro hidráulico nos resultados de velocidade, vazão e tempo de pico dos hidrograma. Os autores consideram que a variação nos valores do coeficiente de Manning causa grande influência na propagação do hidrograma oriundos do rompimento hipotético de barragens.

A base de dados utilizada na implementação dos modelos hidráulicos também apresenta incertezas. As informações topográficas são uma das mais citadas fontes de incertezas. NETO & BAPTISTA (2018) desenvolveram uma análise de sensibilidade da envoltória máxima de inundação resultante da ruptura em função da resolução do Modelo Digital de Elevação (MDE). Para um mesmo cenário, os autores observaram que a área da mancha de inundação a jusante diminui à medida que a resolução da base topográfica se torna menos precisa. Segundo os autores, esse resultado contrariam as observações realizadas por COOK & MERWADE (2009) e ROCHA (2015). NETO & BAPTISTA (2018) simularam uma região urbana e verificaram que as base topográficas menos precisas não foram capazes de representar os trechos de curso de água canalizados, o que reduziu os efeitos de remanso nessas regiões, reduzindo conseqüentemente a extensão das manchas. Já em áreas rurais, bases topográficas de baixa resolução normalmente não conseguem

representar trechos de mudanças abruptas de declividade, o que pode gerar trechos maiores de planície alagadas, aumentando a área das envoltórias de inundação.

Observa-se que não há um consenso sobre os efeitos da resolução topográfica sobre a inundação proveniente da modelagem da ruptura hipotética de barragens. BEVEN & HALL (2014) caracterizam essa como uma incerteza relacionada aos métodos de obtenção de informações. Esses, segundo os autores apresentam um considerável potencial de melhoria em razão de novas tecnologias. Isso tende a reduzir as incertezas relacionadas a esse aspecto. Os autores citam exemplos de tecnologias que já fornecem informações de alta resolução (e.g., LiDAR), capazes de representar detalhes do terreno que reduzem as incertezas envolvidas. Por outro lado, as incertezas relativas aos aspectos de modelagem da brecha de ruptura e da propagação da cheia ainda carregam um grande aspecto epistêmico que demandam maiores investigações.

3.5 Estudos Anteriores Desenvolvidos com Base no Estudo de Caso

O caso selecionado para modelagem probabilística de hidrogramas induzidos pela ruptura de uma barragem de terra foi o apresentado por ZENZ & GOLDGRUBER (2013). Trata-se de um estudo promovido pelo ICOLD, uma das principais instituições de referência no tema de gestão de segurança de barragens. O estudo foi apresentado no 12^o *International Benchmark Workshop* sobre análises numéricas de barragens, realizado na Áustria em 2013. O caso apresentado corresponde a uma barragem fictícia implantada em um ambiente virtual.

O tema “C” do Workshop, que descreve o referido estudo de caso, teve como objetivo promover a discussão a respeito dos desafios computacionais na avaliação dos riscos de inundação associadas a ruptura de barragens e comunicação dos resultados. O tema foi dividido em duas partes, sendo: a primeira referente à modelagem hidráulica, com foco na estimativa dos hidrogramas induzidos pela ruptura e consequente propagação do escoamento defluente; e a segunda com foco na análise de consequências da inundação, utilizando como base os resultados da parte anterior.

Com objetivo de avaliar os resultados provenientes da aplicação de diferentes técnicas, modelos e métodos de avaliação, oito grupos de pesquisadores foram

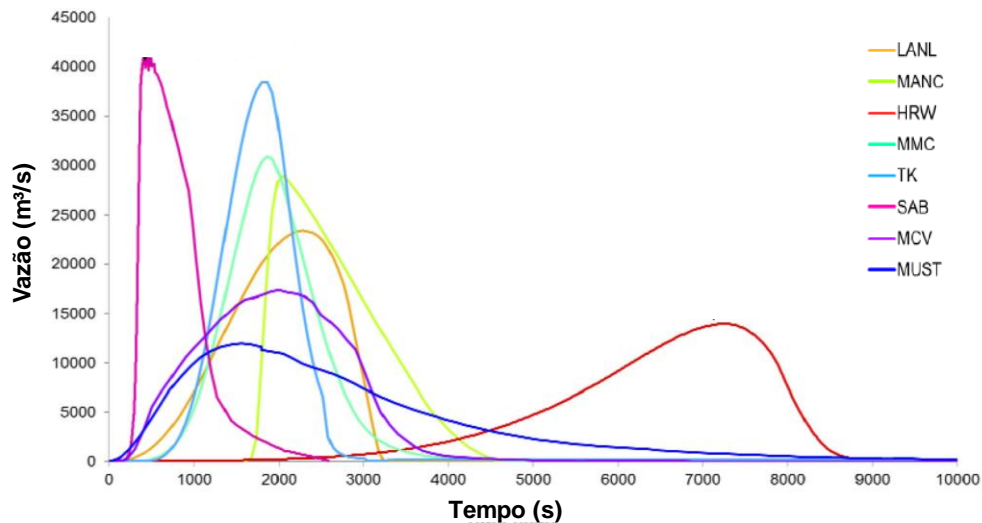
convidados para desenvolver seus estudos baseados no mesmo estudo de caso. Outros estudos apresentados anteriormente, como AHMADISHARAF *et al.* (2016) e PETER (2017), também utilizaram o estudo de caso proposto pelo ICOLD para o desenvolvimento de suas pesquisas relacionadas ao estudo de ruptura hipotética de barragens. Dessa forma, o referido estudo de caso apresenta uma base de resultados considerável e a possibilidade de utilizar essas informações para o desenvolvimento de análises comparativa, sendo esse o principal motivo para a escolha dessa referência.

Um quadro resumo com as principais características de estudos anteriores desenvolvidos no contexto do estudo apresentado por ZENZ & GOLDGRUBER (2013) está apresentado na Tabela 5. A Figura 16 apresenta um compilado dos hidrogramas resultantes da avaliação desses estudos. Uma descrição mais ampla desses estudos, utilizados como referência para análise dos resultados da presente pesquisa, está apresentada no Apêndice A.

Tabela 5 – Quadro resumo descritivo dos estudos anteriores

Autores	Sigla	Tipo de Modelo	Modelo	Análise de Incertezas
DAVISON <i>et al.</i>	HRW	Fisicamente baseado	EMBREA	Análise de sensibilidade alterando os coeficientes de erodibilidade e migração para Headcut
ALTINAKAR <i>et al.</i>	MUST	Paramétrico	Froehlich (1995)	Análise probabilística a partir do LHS considerando como variáveis aleatórias o tempo de formação e largura de fundo da brecha
MANCUSI <i>et al.</i>	MANC	Fisicamente baseado	Molinaro (1986)	Cenários comparativos desenvolvidos por diferentes métodos
SABERI <i>et al.</i>	SAB	Fisicamente baseado	BREACH	Cenários comparativos desenvolvidos por diferentes métodos
MCVAN <i>et al.</i>	MCV	Paramétrico	Froehlich (1995)	Análise comparativa com o pior cenário possível (remoção instantânea da barragem)
THAMES & KALYANPU	TK	Paramétrico	Froehlich (1995)	Análise de sensibilidade dos parâmetros de brecha resultantes de diferentes modelos empíricos
WILLANS & BUCHANAN	MMC	Paramétrico	Froehlich (1995)	Análise de sensibilidade dos parâmetros de brecha resultantes de diferentes modelos empíricos

Figura 16 – Hidrogramas de ruptura resultantes dos diferentes estudos desenvolvidos para o caso em análise



De modo geral, observa-se a partir dos resultados do *benchmark* apresentados na Figura 16, que a escolha do modelo utilizado na estimativa dos hidrogramas de ruptura, assim como a definição de seus parâmetros, afeta significativamente o tempo e a magnitude do pico de vazão. O *benchmark* não foi conclusivo em indicar o modelo de melhor desempenho dentre aqueles avaliados, sendo indicado por ZENZ & GOLDGRUBER (2013) que os resultados de cada participante foram similares em termos hidrodinâmicos.

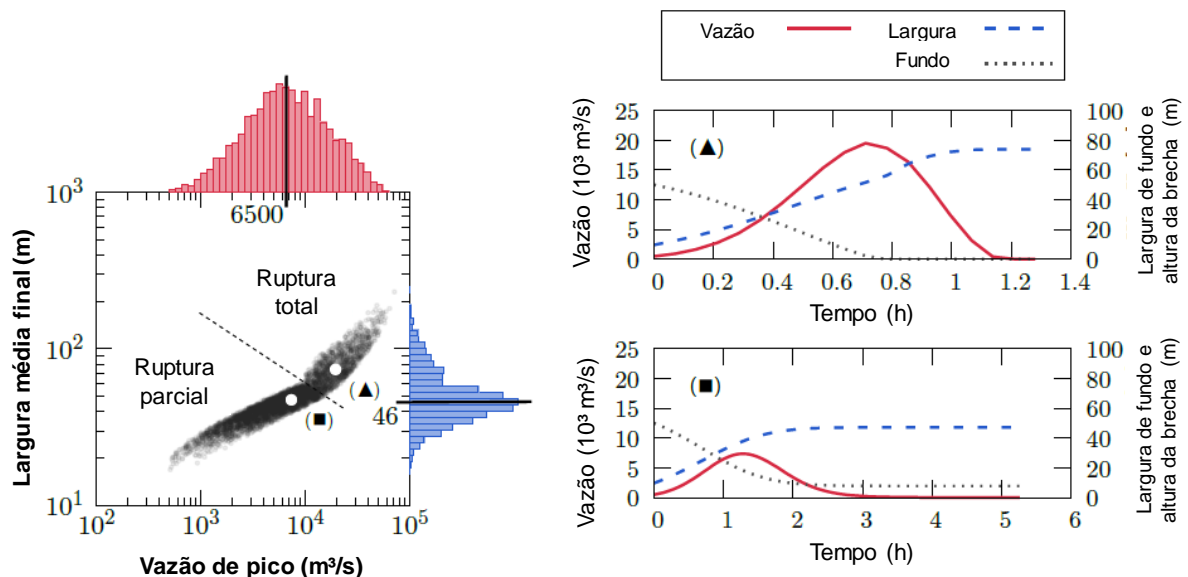
Entretanto, diferenças nos tempos de propagação dos hidrogramas foram percebidas. Os autores atribuem esse aspecto às diferenças no método de cálculo dos hidrogramas de ruptura. Entende-se que essas diferenças são responsáveis pelo formato dos hidrogramas, que está diretamente associado ao tempo para alcance do pico de vazão e, conseqüentemente, ao tempo de viagem da onda. Esse aspecto observado pelos autores reforça a necessidade de entendimento das incertezas nesse processo, uma vez que o tempo de viagem da onda é um dos principais resultados dos estudos de ruptura hipotética.

Os hidrogramas indicados por SAB (SABERI *et al.*) e HRW (DAVISON *et al.*) se destacam por apresentar comportamento distinto dos demais (Figura 16). Tratam-se de hidrogramas resultantes da aplicação de modelos fisicamente baseados que apresentam resultados distintos e opostos. Um reflete um hidrograma esbelto e com

vazão de pico mais elevada. Já o outro se caracteriza por um hidrograma mais achatado, com vazão de pico reduzida.

PETER (2017) também utilizou o caso em análise para o desenvolvimento de seu estudo, baseado em uma abordagem probabilística. Os resultados obtidos pelo autor estão apresentados na Figura 17, que demonstra a análise realizada a partir da avaliação da distribuição marginal dos resultados de vazão de pico e largura média final da brecha. A distribuição dos valores da vazão de pico apresentou uma média de $6.500 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que 90% dos valores foram observados no intervalo entre $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ e $35.600 \text{ m}^3/\text{s}$. O valor médio da largura final da brecha foi de 46 m , sendo que 90% dos valores foram observados entre os intervalos 26 m e 115 m . Dois regimes de ruptura foram observados pelo autor, divididos entre ruptura total e ruptura parcial, sendo a linha divisória dos regimes caracterizadas pelos valores de vazão de pico e largura final da brecha iguais a, respectivamente, $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ e 61 m .

Figura 17 – Resultados da modelagem da brecha de ruptura utilizando o BASEbreach: seleção de dois hidrogramas para representar em detalhe o processo de formação da brecha em detalhe, um representando a ruptura parcial (■) e outro a ruptura total (▲)



(a) Cada ponto representa um hidrograma (caracterizado pela vazão de pico e largura final da brecha) e os histogramas representam a distribuição de probabilidade marginal da vazão de pico (vermelho) e largura final da brecha (azul)

(b) Representação de dois hidrogramas selecionados (linha sólida) em conjunto com o desenvolvimento da largura média da barragem (linha tracejada) e do nível do fundo da brecha (linha pontilhada) ao longo do tempo.

Fonte: traduzido de PETER (2017)

4 IDENTIFICANDO MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DOS PARÂMETROS DE BRECHA DE RUPTURA EM BARRAGENS DE TERRA

A definição dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha é uma das etapas da modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura de barragens. Como observado em outros estudos (e.g., KALININA *et al.*, 2020 e AHMADISHARAF *et al.*, 2016), o uso de informações extraídas de registros de casos reais de ruptura é uma alternativa para identificação desses modelos. Essa avaliação é embasada em observações empíricas do fenômeno físico.

As distribuições de probabilidade dos parâmetros de brecha de ruptura em barragens de terra identificadas na presente pesquisa tiveram como base conjuntos de observações extraídos de um amplo banco de dados (BERNARD-GARCIA & MAHDI, 2020). Os parâmetros de ruptura avaliados foram: i) declividade da parede lateral (Z); ii) razão entre as alturas da brecha e da barragem (H_B/H_d); iii) tempo de formação da brecha (T_f) e iv) razão entre a larguras de fundo da brecha e o comprimento da crista da barragem (L_{Bf}/L_{crista}). De maneira resumida, a metodologia consistiu em uma análise prévia de correlação entre as amostras, seguido por uma análise comparativa por grupos em cada amostra e finalmente o ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade.

4.1 Banco de Dados

Registros a respeito de rupturas de barragens têm sido feitos há centenas de anos, possibilitando, a partir dessas informações, aumentar o entendimento a respeito desses eventos. Diferentes autores se propuseram a desenvolver bancos de dados a respeito das rupturas de barragens registradas na literatura, utilizando informações provenientes de diferentes fontes. Na presente pesquisa, optou-se por adotar um desses bancos de dados como referência para realização das análises.

Para a escolha do banco de dados de referência, foram avaliadas diferentes fontes de registros de ruptura de barragens apresentadas na literatura, desenvolvidas com diferentes propósitos. A escolha pelo banco de dados foi guiada pela atualização da base de dados e tamanho das amostras. A Tabela 6 apresenta os bancos de dados analisados no presente trabalho, fazendo uma descrição de cada referência.

Tabela 6 – Bancos de dados consultados com informações sobre rupturas de barragens

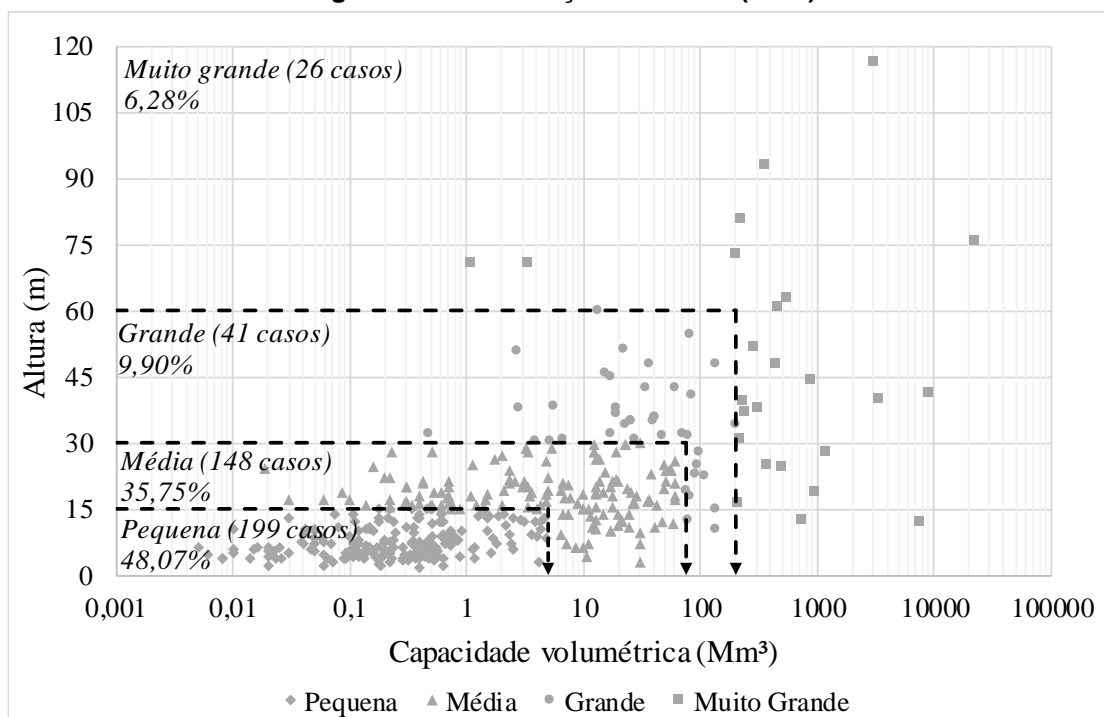
Fonte	Tamanho da amostra	Descrição
WAHL (1998)	108	Compilado de 17 fontes de informação a respeito de 108 casos de ruptura de barragens. Maioria dos casos registrados nos Estados Unidos e Canadá. Informações a respeito de barragens de água. Apresenta informações a respeito das brechas de ruptura e das características das barragens e da falha.
XU E ZHANG (2009)	75	Descrição de 75 casos de ruptura de barragens de terra e enrocamento. Informações suficientes para o desenvolvimento de um modelo empírico de previsão de brecha (parâmetros de brecha e informações das barragens e falhas), incluindo a erodibilidade dos materiais de construção da barragem. Maioria dos casos registrados nos Estados Unidos e China.
FROEHLICH (2016)	111	Descrição de 111 casos de ruptura de barragens de terra e enrocamento, sendo a maioria registrada nos Estados Unidos. Apresenta informações sobre os parâmetros de brecha e características das barragens e das falhas. Essas foram utilizados no desenvolvimento de um modelo empírico de previsão de brecha. Não descreve erodibilidade do material de construção das barragens.
ZHANG <i>et al</i> (2016)	2.487	Compilado de 1.443 casos de ruptura de barragens construídas com algum tipo de controle apresentados na literatura de referência e 1.267 rupturas de barragens naturais formadas pelo escorregamento de terra nas encostas dos cursos de água. Apresenta rupturas registradas em 50 países com destaque para os Estados Unidos, Índia, Reino Unido e China.
BERNARD-GARCIA & MAHDI, 2020	3.861	Compilado de 3.861 rupturas de barragens a partir da consulta a 196 referências da literatura, que incluem o banco de dados apresentados por ZHANG <i>et al</i> (2016), FROEHLICH (2016), XU & ZHANG (2009) e WAHL (1998). Estudos de casos apresentados na literatura técnico-científica, outros compilados de informações e apresentações técnicas de casos históricos também foram considerados. Apresenta informações sobre os parâmetros de brecha e características das barragens referentes a ruptura de barragens construídas com algum tipo de controle, formadas pelo escorregamento de terra, modelos reduzidos de laboratório, enseadeiras e barragens de rejeitos. Registros relativos a 69 países, sendo 13 observados no Brasil.

Para o desenvolvimento da presente pesquisa optou-se por utilizar a base de dados compilada por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020). A escolha por essa referência se justifica pelo fato de representar um compilado atualizado, com informações consolidadas de diferentes fontes a respeito de rupturas de barragens. A consistência da base de dados foi avaliada a partir de um processo de amostragem das informações apresentadas, na qual foi verificada a concordância entre alguns valores apresentados no banco de dados e os respectivos valores apresentados nas referências primárias, sendo observados valores iguais. Os dados extraídos da base de dados de referência para a presente análise estão apresentados no Apêndice A.

Dos 3.861 registros de ruptura de barragens disponíveis em BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020), 2.769 são referentes a barragens construídas com algum tipo de controle e 1.049 representam barragens naturais oriundas de escorregamentos de terra nas encostas dos cursos de água. Os outros 43 registros se dividem em barragens de rejeitos (19), modelos reduzidos de laboratório (18) e ensecadeiras (6). Na presente pesquisa considerou-se apenas informações sobre barragens construídas em aterro, que somam 1.954 casos.

Os casos de ruptura de barragens construídas em aterro representam, predominantemente, barragens construídas por solo homogêneo. Outros 7 tipos de barragens também constam no banco de dados, com destaque a barragens com aterro compostos, zonadas e com a presença de núcleo. Grande parte das barragens são classificadas como de média a pequena magnitude. Apenas 15% dos casos se referem a barragens de grande a muito grande magnitude segundo a classificação do CNRH (2012), conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 18 – Magnitude das barragens rompidas e registradas no banco de dados de referência segundo a classificação do CNRH (2012)



Os registros apresentados no banco de dados foram realizados desde o século XVII, sendo a maior parte datada entre 1970 e 2010, com destaque para a década de 1990, que representa 818 casos. Os principais modos de falha registrados em barragens

construídas em aterro são o galgamento (48%) e o erosão interna (19%). Outros tipos de falha como desastres naturais, erros operacionais e construtivos também são observados. Maior parte dessas falhas foram registradas durante a construção, enchimento do reservatório ou antes dos 5 primeiros anos de operação. Constatam rupturas registradas em 39 países, com destaque para os Estados Unidos com 1.790 casos e para a China com 60 observações. Foram observados 7 casos registrados no Brasil, sendo elas: Algodões (Cocal-PI, 2009), Armando de Salles Oliveira (São José do Rio Pardo-SP, 1977), Euclides da Cunha (São José do Rio Pardo-SP, 1977), Boa Esperança (São José do Rio Pardo-SP, 1977), Salles Oliveira (São José do Rio Pardo-SP, 1977), Orós (Orós-CE, 1960), Pampulha (Belo Horizonte, 1954) e EMA (1940).

O descritivo dos eventos de ruptura de barragens registrados no banco de dados conta com 45 variáveis, divididas entre diferentes categorias que descrevem a barragem, o evento de ruptura e suas consequências. Apenas uma parcela dos casos registrados apresenta informações referentes a todas as variáveis apresentadas, sendo grande parte caracterizado apenas com local e data de ruptura. As informações a respeito dos parâmetros de brecha, foco do presente trabalho, foram observadas em 314 casos para H_B/H_d , 185 para Z , 144 para L_{Bf}/L_{crista} e 84 para T_f . Somente em 64 casos foram apresentadas, concomitantemente, informações de todos os parâmetros de brecha.

Observa-se que os parâmetros altura (H_B) e largura de fundo da brecha (L_{Bf}), relativos à medida de comprimento, foram adimensionalizados, respectivamente, pela altura da barragem (H_d) e comprimento da crista (L_{crista}). Isso foi feito a fim de permitir a aplicação dos modelos de distribuição de probabilidades identificados em barragens que apresentam características distintas da média observada no banco de dados. Esse aspecto evita que durante o sorteio das variáveis sejam observados valores incoerentes com a barragem em análise como, por exemplo, alturas de brecha muito maiores que a própria altura da barragem. A declividade da parede lateral já é um parâmetro adimensional e não demandou ajustes. O tempo de formação da brecha não mede uma grandeza relacionada às características da barragem e assim entende-se que esse parâmetro também não demanda ajustes.

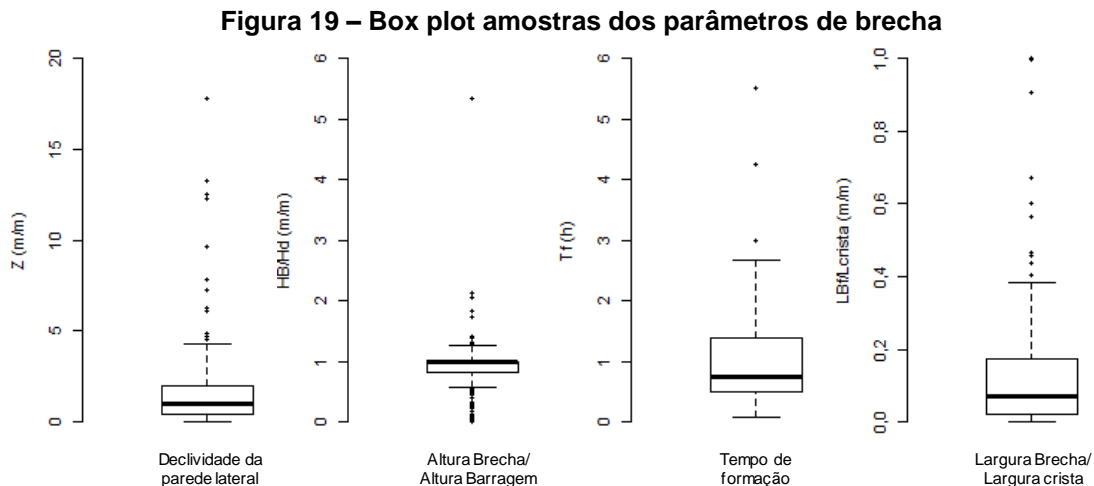
A Tabela 7 descreve os parâmetros de ruptura disponibilizados no banco de dados de referência e o correspondente considerado na identificação das distribuições de probabilidades, além do número de observações de cada amostra. A Tabela 8 apresenta a estatística descritiva das amostras e a Figura 19 apresenta o *box plot* das amostras.

Tabela 7 – Varáveis consideradas na identificação das distribuição de probabilidades

Parâmetro no banco de dados	Sigla	Unidade	Variável considerada na análise	Sigla	Unidade	Nº de observações
<i>Declividade da parede lateral</i>	Z	m/m	<i>Declividade da parede lateral</i>	Z	m/m	185
<i>Altura da brecha</i>	H _b	m	<i>Razão entre a altura da brecha e a altura da barragem</i>	H _B /H _d	m/m	314
<i>Tempo de formação da brecha</i>	T _f	h	<i>Tempo de formação da brecha</i>	T _f	h	144
<i>Largura de fundo da brecha</i>	L _{Bf}	m	<i>Razão entre a largura de fundo da brecha e o comprimento da crista da barragem</i>	L _{Bf} /L _{crista}	m/m	84

Tabela 8 – Estatística descritiva das amostras dos parâmetros de brecha extraídos no banco de dados de referência

Estatística	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _{Bf} /L _{crista} (m/m)
Tamanho da amostra	185	314	84	144
Média	1,72	0,91	1,06	0,13
Mediana	0,97	1,00	0,75	0,07
Moda	0,00	1,00	0,50	0,00
Desvio Padrão	2,53	0,39	0,95	0,18
Variância	6,39	0,15	0,90	0,03
Coeficiente de variação	1,47	0,43	0,90	1,40
Mínimo	0,00	0,00	0,08	0,00
Máximo	17,82	5,33	5,50	1,00



Ressalta-se que as informações descritas nos bancos de dados podem conter incertezas difíceis de serem quantificadas. Segundo WAHL *et al.* (2008), grande parte dos casos de ruptura não contam com testemunhas oculares e, quando contam, pode haver divergência na interpretação das partes. Os autores descrevem que as ações de resgate, mitigação e recuperação são prioritárias durante um evento de ruptura de barragem. Assim, a avaliação técnica e coleta de informações a respeito da formação da brecha pode não ocorrer no instante da falha ou até mesmo pode não ser realizada. O autor indica que também há ausência de franqueza por parte dos responsáveis pelas barragens na divulgação das informações. Além disso, é comum não haver informações detalhadas a respeito do tipo de material de construção e geometria da barragem, o que impossibilita acrescentar essas informações aos registros. Esses aspectos podem afetar uma parcela dos valores registrados, principalmente em relação ao tempo de formação da brecha. Alguns valores observados na descrição das amostras merecem destaque e estão descritos a seguir.

O valor máximo de H_B/H_d corresponde à ruptura da barragem Cut-Away Dike, localizada em Quebec (Canadá), que apresentou brecha com altura 5,33 vezes maior que a altura da barragem. Trata-se de uma ruptura por galgamento registrada em 1996 em uma estrutura de 3,00 m de altura, cuja a brecha teve altura de 16,00 m, o que representa uma erosão de 13,00 m do terreno natural. Essa era uma estrutura longa utilizada para prevenção de enchentes e, portanto, representa um caso muito específico de ruptura. Casos em que a altura da brecha foi maior que duas vezes a altura da barragem também se destacam. Um deles corresponde à ruptura da Barragem Kinkad Lake (Carolina do Sul, EUA – 1977), com altura de 13,1 m e o outro

descreve a ruptura da Barragem Peru (EUA – 1998) com 1,80 m de altura. Observa-se que esses valores estão associados a barragens consideradas pequenas, sendo dois desses casos relativos a barragens com altura igual ou menor a 3,00 m, que retratam casos muito específicos de barragens de pequeno porte.

Conforme discutido na revisão de literatura (Item 3.1.1), o limite teórico para a máxima erosão vertical de uma barragem é o topo da camada rochosa, ou seja, considera-se passível de erosão, além do corpo da barragem, apenas a espessura do terreno natural de fundação. Grande parte das barragens são instaladas em talvegues de cursos de água, onde, naturalmente a espessura da camada de solo não é muito grande. Na amostra, 58 casos representam altura de brecha superior à altura da barragem, sendo a espessura média do terreno natural erodido nesses casos igual a 2,00 m. As maiores profundidades de erosão do terreno natural foram observadas nos casos da Kinkad Lake (14,90 m) e Cut-Away Dike (13,00 m), onde se observa profundidades de erosão muito acima da média, sendo consideradas situações anômalas. A partir dessa análise, optou-se por considerar os casos das barragens Cut-Away Dike, Kinkad Lake e Peru como *outliers* da amostra H_B/H_d , sendo esses subtraídos das próximas etapas de avaliação.

Ao contrário do que indica FROEHLICH (2016), de que a tendência da altura da brecha é ser igual à altura da barragem, foi observado que a maioria dos casos de ruptura registrados apresentam altura de brecha diferente da altura da barragem. Na amostra de 314 observações, 174 correspondem a brechas com altura diferente da altura da barragem, ou seja, 55% da amostra. A maior parte dos casos em que a altura de brecha foi diferente da altura da barragem se referem a rupturas em que a brecha não atinge a fundação da barragem. Esses foram 116 casos (37%). Já os casos em que, além da erosão de todo o maciço, observou-se a erosão do terreno natural de fundação correspondem a 18%.

Entende-se que, em uma análise determinística, como propõe FROEHLICH (2016), o mais indicado é considerar que a altura da brecha é igual à altura da barragem. Porém, em uma análise probabilística, considerar que a altura possa apresentar uma relação H_B/H_d diferente de 1,00 é o mais indicado, conforme demonstra os dados observados. Interessante observar a grande parcela de registros de rupturas em que a altura da

brecha foi inferior à altura da barragem. Isso demonstra que, em muitos casos, alguma região no maciço pode resistir à erosão e evitar que a brecha atinja o terreno natural de fundação. Observa-se também que a erosão do terreno natural de fundação, apesar de menos provável, não é tão rara.

O valor máximo de Z também chama a atenção. Esse corresponde à ruptura da barragem Forest Lake rompida em 2015 na Carolina do Sul (EUA) por galgamento decorrente da passagem do Furacão Joaquin. A declividade igual a 17,82 corresponde a um ângulo da brecha com o solo de $3,3^\circ$, o que representa a remoção de praticamente toda a barragem, nesse caso. Essa também é uma situação de ruptura muito específica por se tratar de um evento associado à passagem de um furacão. Como discutido na revisão de literatura (Item 3.1.3), a declividade da parede lateral da brecha pode ser associada ao ângulo de atrito de material da barragem, que normalmente varia entre 35° e 18° (Z de 1,40 a 3,00 m/m). Porém, em decorrência de outros efeitos da ruptura é possível observar ângulos mais abatidos para as brechas de ruptura, conforme demonstra a amostra, não sendo esses casos considerados como *outliers*.

Em relação ao tempo de formação da brecha destacam-se os dois casos de ruptura com tempo de formação acima de 3,0 h. O primeiro se refere ao galgamento da Barragem Banqiao, localizada na província de Henan na China em decorrência do Tufão Nina em 1975. Trata-se de um evento de rupturas em cascata cujo o tempo para formação da brecha foi de 5,5 h. A barragem era zonada e apresentava 2.200 m de comprimento de crista, 97,00 m de espessura e altura de 24,50 m. A largura média da brecha observada foi de 291,00 m, o que corresponde a uma taxa de erosão média de 52,90 m/h. O segundo caso corresponde à ruptura por galgamento da Barragem Walter Bouldin (Alabama, EUA) que também rompeu em 1975. Tratava-se de uma barragem com 2.268 m de crista, espessura de 77,00 m e altura de 5,80 m. A brecha observada apresentou largura média de 446,00 m, formada em 4,25 h, o que corresponde a uma taxa de erosão igual a 104,94 m/h. Observa-se que os dois casos se referem a brechas de ruptura consideravelmente largas, o que indica certa relação entre largura média de brecha e o tempo de formação e não demonstram ser *outliers*.

Da amostra L_{Bf}/L_{crista} destaca-se os casos de ruptura em que a largura de fundo da brecha foi igual ou muito próxima ao comprimento da crista, o que representa que a remoção de toda a barragem, incluindo uma parcela do terreno natural. As barragens Hemet (Califórnia-EUA, 1927) e Swift Irrigation Nº 2 (Montana-EUA, 1964) apresentam $L_{Bf}/L_{crista} = 1,00$ m/m, ou seja, largura de fundo igual ao comprimento da crista. Os dois casos se referem a rupturas por galgamento em decorrência de um grande volume de chuvas associado a degelo na região. Nos dois casos, as barragens apresentavam núcleo e as brechas observadas apresentavam forma retangular. Outro caso de destaque se refere à barragem Buffalo Creek Nº 1 (Carolina do Norte-EUA, 1972), que apresenta largura de fundo igual a 91% do comprimento da crista. Essa era uma barragem utilizada para armazenamento do efluente da produção mineral de carvão e se localizava a jusante de duas outras estruturas utilizadas para o mesmo fim. A ruptura da barragem Buffalo Creek Nº 1 foi ocasionada pelo efeito em cascata da ruptura das barragens localizadas a montante (barragens Buffalo Creek Nº 2 e Nº 3), sendo observada apenas uma ruptura parcial, com altura da brecha igual a 44% da altura da barragem. Observa-se que os maiores valores da amostra se referem a condições específicas de ruptura (galgamento associado a degelo e rupturas em cascata) e assim, podem não se aplicar a condições diferentes dessas. Dessa forma optou-se, nas próximas etapas, avaliar as amostras com e sem os três casos apresentados.

A moda das amostras também merece ser destacada na análise. Essa medida representa o valor com maior número de observações nas amostras e reflete, normalmente, repetições de valores. Em variáveis aleatórias contínuas é rara a grande repetição dos valores observados. No entanto, em razão das características dos parâmetros amostrados e de como os registros são realizados, foram observados nas amostras diferentes números de repetições, conforme apresentado a seguir.

Para a amostra de Z observa-se que a moda é igual a 0,00 e corresponde a brechas retangulares, que correspondem a 14 observações da amostra (8%). Na amostra H_B/H_d a moda corresponde a 1,00 e significa que a altura da brecha é igual à altura da barragem. Nessa amostra, de 314 observações, 140 são iguais a 1,00, ou seja, 45%. Para a amostra T_f , observa-se a moda igual a 0,5 h. O tempo de formação da brecha é um dos parâmetros mais difíceis de se estimar e acredita-se que os valores

apresentados na amostra são aproximações, logo entende-se que as 15 observações registradas como 0,5 h tiveram tempos próximos a meia hora que possivelmente foram arredondados. Ressalta-se que, na base de dados, grande parte dos registros de tempo de formação foi arredondada para o quarto de hora. Na amostra L_{Bf}/L_{crista} a moda é igual a 0,00 e corresponde a brechas triangulares. Foram observados na amostra 31 casos de brechas triangulares, que correspondem a 22% da amostra. Grande números de repetições podem dificultar o ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade, conforme pode ser observado em alguns casos apresentados na sequência.

4.2 Análise de Correlação entre as Variáveis

Verificar a presença de correlação entre as variáveis foi uma etapa necessária para a definição dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha, uma vez que a presença de correlação entre as variáveis permite a definição de distribuições conjuntas. A avaliação da correlação entre os parâmetros de brecha foi estimada a partir do teste de correlação de Kendall, no qual se estima o coeficiente τ (τ). Segundo AKOGLU (2018), esse teste é amplamente utilizado nas análises de regressão e estima a presença de correlações lineares e não lineares e por esses motivos foi selecionado. Por ser não paramétrico, dispensa a necessidade de normalidade e homocedasticidade dos dados, o que também justifica a escolha.

Na análise de correlação, foram utilizados apenas as observações em que foram verificadas as informações concomitantes dos quatro parâmetros de brecha considerados como variáveis aleatórias. Optou-se por utilizar apenas esses casos para evitar a correlação entre amostras com número de observações diferentes e a presença de valores não definidos (*missing values*), que poderiam distorcer os resultados da análise.

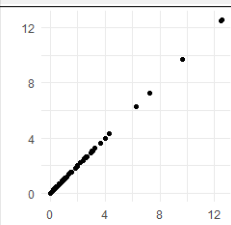
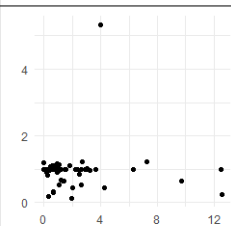
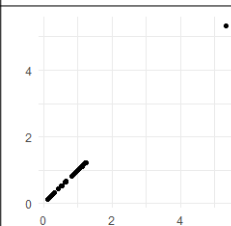
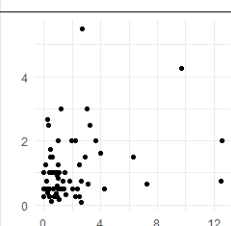
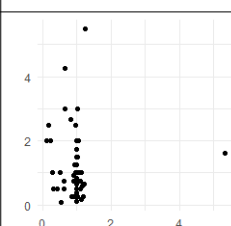
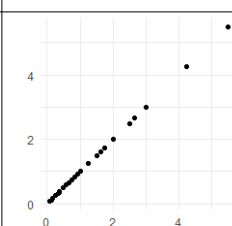
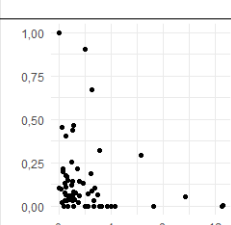
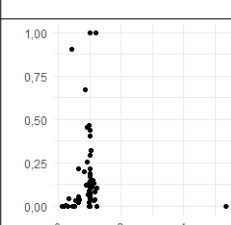
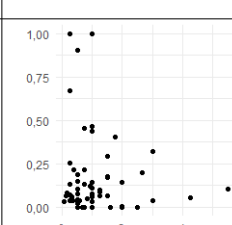
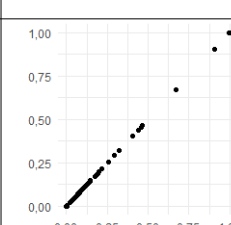
No total, 64 casos foram considerados na análise. Nessa amostra, observa-se rupturas registradas em 10 países diferentes relativas a rupturas por galgamento (46), erosão interna (20), problemas de qualidade (2) e desastres naturais (1). A maior parte dos registros foram feitos nos Estados Unidos (46) e grande parte das barragens são caracterizadas como material homogêneo (30). Barragens com núcleo (16 observações) e zonadas (12) também representam uma quantidade importante entre

os tipos construtivos das barragens rompidas e consideradas na análise de correlação.

A Tabela 9 apresenta a matriz de correlação dos parâmetros de brecha, apresentando os coeficientes de correlação de Kendall (τ) e o respectivo p-valor do teste estatístico. Os gráficos de dispersão dos dados também estão apresentados, permitindo observar a correlação de maneira visual.

Na presente pesquisa assumiu-se que não há um fator que impeça o registro dos quatro parâmetros considerados em determinados casos de ruptura. No entanto, esse aspecto não foi verificado. É importante ressaltar que isso poderia eliminar da amostra casos específicos de ruptura, como por exemplo aquelas formadas por desastres naturais, o que seria uma espécie de viés amostral.

Tabela 9 - Matriz de correlação dos parâmetros de brecha de ruptura

	Z (m/m)	H _b /H _d (m/m)	T _f (m)	L _{Bf} /L _{crista} (m/m)
Z (m/m)		$\tau: -0,0162$ $p\text{-valor} = 0,8552$	$\tau: 0,1315$ $p\text{-valor} = 0,1359$	$\tau: -0,2342$ $p\text{-valor} = 0,0070$
H _b /H _d (m/m)			$\tau: -0,0302$ $p\text{-valor} = 0,7403$	$\tau: 0,1070$ $p\text{-valor} = 0,2326$
T _f (m)				$\tau: -0,0595$ $p\text{-valor} = 0,5051$
L _{Bf} /L _{crista} (m/m)				

Z = Declividade da parede lateral; H_b/H_d = Razão entre a altura de brecha e altura da barragem; T_f = Tempo de formação; L_{Bf}/L_{crista} = Razão entre a largura de fundo da brecha e largura da crista

A partir dos valores apresentados, observa-se o maior nível de correlação entre Z & L_{Bf}/L_{crista} ($\tau = -0,2342$, p -valor = $0,0070$), valor considerado baixo. A fim de explorar mais esse resultado, uma análise posterior foi realizada segregando as amostras em razão do modo de falha. Observou-se um aumento no nível de correlação para a amostra referente ao galgamento das barragens, que apresenta 40 observações ($\tau = -0,3344$, p -valor = $0,0024$). Para o conjunto relativo à erosão interna, com 20 registros, verificou-se um nível de correlação muito próximo à amostra total ($\tau = -0,2387$, p -valor = $0,1435$).

Os níveis de correlação entre Z & T_f e H_B/H_d & L_{Bf}/L_{crista} foram da mesma ordem de grandeza apresentando, respectivamente $\tau = 0,1315$ (p -valor = $0,1359$) e $\tau = 0,1070$ (p -valor = $0,2326$). As correlações entre Z & H_B/H_d , T_f & H_B/H_d e T_f & L_{Bf}/L_{crista} foram as menores, com $\tau \approx 0$. Observa-se, nesses últimos casos, maiores valores para o p -valor, o que pode ser justificado pelo fato da correlação totalmente nula entre duas variáveis ser muito rara.

Com base nos valores observados, assumiu-se que os parâmetros de brecha podem ser avaliados como variáveis independentes. No entanto, essa não deve ser considerada como uma conclusão definitiva, sendo uma premissa para análise dos dados dentro do que se propõe a presente pesquisa. A correlação entre Z & L_{Bf}/L_{crista} , apesar de considerada baixa, é significativa e faz sentido físico, o que pode ser considerado em análises futuras, avaliando quais diferenças seriam obtidas se os dois parâmetros fossem modelados conjuntamente.

4.3 Metodologia

A identificação dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha foi realizada em duas etapas. A primeira, denominada análise comparativa por grupos, consistiu em avaliar eventuais diferenças amostrais em razão de aspectos relativos às rupturas e características das barragens. A segunda consistiu em avaliar o ajuste de diferentes modelos de distribuição de probabilidade aos conjuntos amostrais e identificar aquele com melhor ajuste.

A Figura 20 apresenta o fluxograma metodológico aplicado na presente etapa. Para as análises propostas foram utilizados *scripts* desenvolvidos em linguagem R. Bibliotecas disponibilizadas no repositório da plataforma (<https://cran.r-project.org>) foram utilizadas nas análises. A Tabela 10 apresenta a identificação das bibliotecas utilizadas em cada etapa, com a indicação de sua finalidade e referências.

Figura 20 - Fluxograma metodológico da identificação das distribuições de probabilidade de parâmetros de brecha de ruptura de barragens de terra

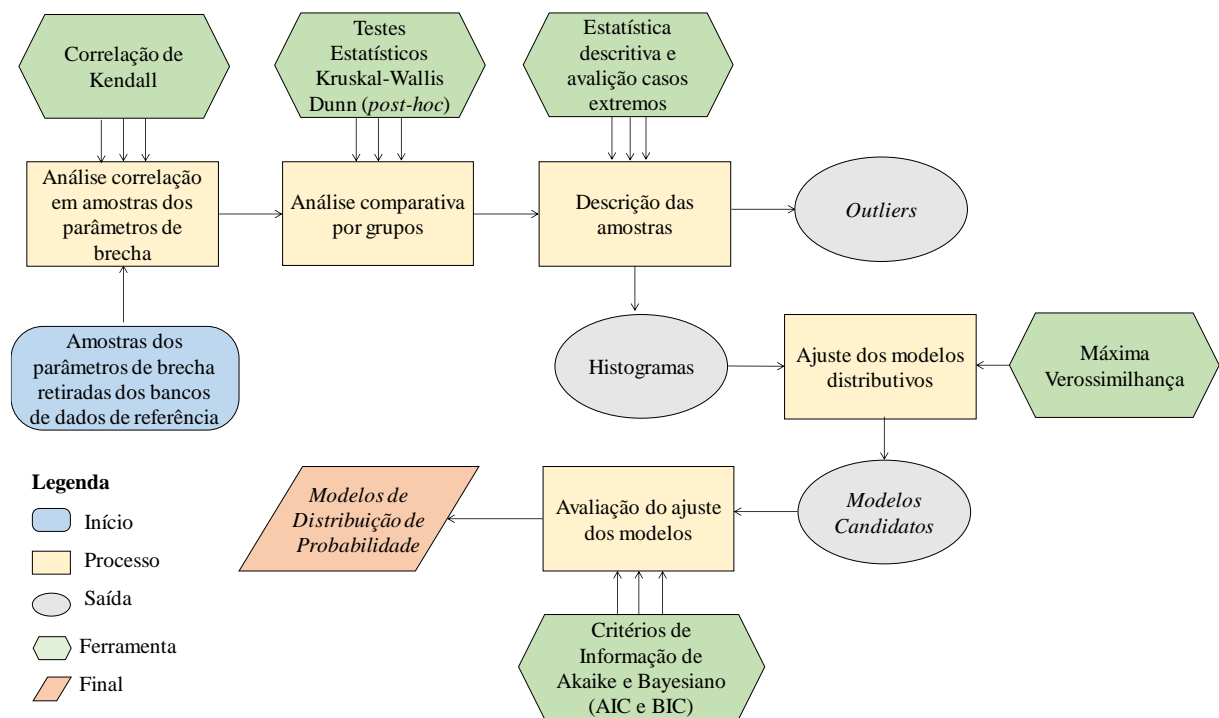


Tabela 10 - Bibliotecas disponíveis no repositório R aplicadas na presente etapa

Pacote	Finalidade	Endereço repositório CRAN
readxl	Carregamento do banco de dados	https://cran.r-project.org/web/packages/readxl/index.html
dplyr	Manipulação de dados	https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html
Tibbles	Criação de <i>dataframe</i>	https://cran.r-project.org/web/packages/tibble/index.html
rstatix	Testes Kruskal-Wallis e Dunn	https://cran.r-project.org/web/packages/rstatix/index.html
Stats	Teste Kendall e declaração das distribuições de probabilidade	https://cran.r-project.org/web/packages/STAT/index.html
ggplot2	Elaboração dos gráficos	https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html
fitdistrplus	Ajuste dos modelos de distribuição e métricas	https://cran.r-project.org/web/packages/fitdistrplus/index.html
FAdist	Declaração da distribuição Gumbel	https://cran.r-project.org/web/packages/FAdist/index.html
triangle	Declaração da distribuição Triangular	https://cran.r-project.org/web/packages/triangle/index.html
ExtDist	Declaração da distribuição Laplace	https://cran.r-project.org/web/packages/ExtDist/index.html
ald	Declaração da distribuição Laplace Assimétrica	https://cran.r-project.org/web/packages/ald/index.html

4.4 Análise Comparativa por Grupos

4.4.1 Metodologia

A análise comparativa por grupos foi realizada com o intuito de avaliar a possível influência das características das barragens e condições de ruptura na distribuição de frequência dos parâmetros de brecha. Essa análise foi desenvolvida a partir da avaliação da variância entre grupos amostrais associados a informações qualitativas (nominais e ordinais) presentes no banco de dados.

As categorias consideradas na análise comparativa por grupos foram definidas a partir da revisão de literatura, sendo selecionadas aquelas apresentadas como fatores intervenientes na formação das brechas de ruptura em barragens de terra. A Tabela 11 descreve as categorias consideradas. Ressalta-se que outras características, que não são apresentadas (e.g. inclinação dos taludes de jusante, número de bermas, carga hidráulica a montante, etc.), também podem exercer influência sobre os parâmetros de uma ruptura de barragem. Porém, em função da indisponibilidade dessas informações na base de dados de referência, não foi possível considerar todas as categorias. As variáveis apresentadas foram obtidas diretamente do banco de dados, com exceção da forma da barragem. A forma da barragem, proposta na presente pesquisa, foi definida como a razão entre a largura da crista (L_{crista}) e altura média da barragem (H_d).

A análise de variância dos grupos amostrais foi realizada a partir do teste de Kruskal-Wallis. Esse representa a decomposição da variação total entre os valores descritos em um banco de dados em várias componentes identificáveis. O intuito dessa análise é, a partir do teste estatístico, avaliar se os grupos amostrais analisados apresentam comportamento distinto entre si, de modo a demandar o ajuste de diferentes modelos de distribuição de probabilidade às amostras categorizadas.

O teste de Kruskal-Wallis (KRUSKAL & WALLIS, 1952) é um teste não paramétrico utilizado para comparar três ou mais amostras. A hipótese nula do teste é de que todas as populações possuem medianas e distribuição de frequência iguais. A hipótese alternativa é de que ao menos duas das amostras possuem medianas e

funções de distribuição diferentes. A estatística do teste de Kruskal-Wallis pode ser calculada por meio da Equação (10).

$$H = \left[\frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} \right] - 3(N+1) \quad (10)$$

na qual: N = número total de observações; n_j = número de observações em cada amostra; R_j = soma dos postos em cada amostra

Tabela 11 - Grupos das variáveis explicativas quantitativas dos parâmetros de brecha

Variável	Categorias	ID	Descrição
Modo de Falha	Desastres	DT	Terremotos, guerras, ataques terroristas, rupturas a montante, ataque de roedores
	Erosão interna	EI	Carreamento de partículas internas da barragem
	Galgamento	GG	Sobrelevação do NA para cotas acima da crista
	Problema construtivo	PC	Qualidade das obras e materiais
	Problema operacional	PO	Operação e manutenção inadequada
Nominal Tipo Específico de Barragem	Preenchimento composto	COM	Aterro composto por mais de um material
	Terra com núcleo	TNU	Aterro com núcleo argiloso
	Face de concreto	FC	Aterro com face de concreto
	Aterro homogêneo	HOM	Aterro composto por um único material
	Preenchimento hidráulico	HID	Aterro composto por material diluído em água
	Preenchimento Zonado	ZON	Aterro preenchido em camadas
Presença de Núcleo ou Revestimento	Não verificado	NÃO	Aterro sem núcleo ou revestimento
	Verificado	SIM	Aterro com núcleo ou revestimento
Erodibilidade⁽¹⁾	Alta	EA	Material com alta taxa de erosão
	Média	EM	Material com taxa de erosão média
	Baixa	EB	Material com taxa de erosão baixa
Magnitude⁽²⁾	Muito grande	MG	$H_d > 60$ m e/ou $V_{res} > 200$ Mm ³
	Grande	G	30 m $< H_d \leq 60$ m e/ou 75 Mm ³ $< V_{res} \leq 200$ Mm ³
	Média	M	15 m $< H_d \leq 30$ m e/ou 5 Mm ³ $< V_{res} \leq 75$ Mm ³
	Pequena	P	$H_d \leq 15$ m e $V_{res} \leq 5$ Mm ³
Ordinal Altura Classificada⁽²⁾	Muito grande	MG	$H_d > 60$ m
	Grande	G	30 m $< H_d \leq 60$ m
	Média	M	15 m $< H_d \leq 30$ m
	Pequena	P	$H_d \leq 15$ m
Volume Classificado⁽²⁾	Muito grande	MG	$V_{res} > 200$ Mm ³
	Grande	G	75 Mm ³ $< V_{res} \leq 200$ Mm ³
	Média	M	5 Mm ³ $< V_{res} \leq 75$ Mm ³
	Pequena	P	$V_{res} \leq 5$ Mm ³
Forma da seção da barragem⁽³⁾	Estreita	EST	$L_{crista}/H_d \leq 12$
	Intermediária	INT	$12 < L_{crista}/H_d \leq 40$
	Larga	LRG	$L_{crista}/H_d > 40$

⁽¹⁾ Adaptado de XU & ZHANG (2009) pelo autor do banco de dados; ⁽²⁾ Definido conforme CNRH (2012);

⁽³⁾ Estimativa baseada em ROSGEN (1994)

A rejeição da hipótese nula no teste de Kruskal-Wallis indica que ao menos um dos grupos presentes na amostra apresenta mediana diferente dos demais. No entanto, o teste não fornece a informação de qual ou quais grupos são diferentes entre si. Para identificar diferenças significativas entre os grupos tomados dois a dois, pode-se usar procedimentos não paramétricos de comparações múltiplas. O teste de Dunn (DUNN, 1964), cuja estatística é calculada pela Equação (11), foi o escolhido para essa análise.

$$Q = \frac{\bar{R}_2 - \bar{R}_1}{EP} \quad (11)$$

onde: \bar{R} indica o posto médio: ($\bar{R}_1 = R_1/n_1$ e $\bar{R}_2 = R_2/n_2$) e EP representa o Erro Padrão, calculado pela Equação (12).

$$EP = \sqrt{\frac{N(N+1)}{12} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (12)$$

Além de identificar os grupos que apresentam medianas diferentes dos demais, a avaliação *post hoc* é utilizada para reduzir a possibilidade de se realizar inferências falso-positivas. Assim, o uso do teste de comparações múltiplas de Dunn também é aplicado para detectar as diferenças quando elas realmente existem, sendo adotado o ajuste de Bonferroni para o p-valor (BONFERRONI, 1936). A hipótese nula do Teste de Dunn considera que não há diferenças entre a mediana e a distribuição dos valores entre as categorias dos grupos amostrais, avaliadas duas a duas.

Caso a análise comparativa entre os grupos indique comportamento distinto entre esses, propõe-se o ajuste de distribuição de probabilidades ao conjunto de dados segregados. Do contrário, deve ser proposto o ajuste para a amostra completa. Nesse caso, considera-se, com base na evidência do teste estatístico, que não há indícios de que há influência das características das barragens no comportamento amostral dos parâmetros. Adotou-se o nível de significância de 5% para a avaliação dos testes aplicados. Esse percentual é usualmente utilizado como critério em testes estatísticos.

4.4.2 Resultados

A Tabela 12 apresenta uma síntese dos resultados da análise comparativa por grupos. São indicados apenas os grupos formados pelas variáveis qualitativas que tiveram a

hipótese nula do Teste de Kruskal-Wallis rejeitada. A Tabela 13 apresenta os resultados dos testes de Dunn para os grupos em que H_0 do teste de Kruskal-Wallis foi rejeitada ao nível de significância de 5%, ou seja, um p-valor $\leq 0,05$. Os resultados completos estão apresentados no Apêndice D.

Tabela 12 - Síntese de resultados da análise comparativa por grupos (Hipótese nula do Teste de Kruskal-Wallis rejeitada)

Parâmetro de brecha	H_0 rejeitada ao nível de significância de 5% (Kruskal-Wallis)			
	Fatores interveniente	Estatística do Teste	Graus de liberdade	p-valor
Z (m/m)	Modo de falha	16,1450	3	0,0011
	Volume	9,9194	4	0,0418
H _B /H _d (m/m)	Tipo Específico	19,6470	5	0,0015
	Presença de núcleo	8,5446	2	0,0140
	Erodibilidade	10,2500	3	0,0166
	Magnitude	26,7220	4	2 x 10 ⁻⁵
	Altura	9,8714	3	0,0197
	Volume	26,4150	4	2 x 10 ⁻⁵
T _f (h)	Forma	20,9930	3	0,0001
	Não identificado	-	-	-
L _{Bf} /L _{crista} (m/m)	Altura	10,22	4	0,0369
	Forma	9,0943	3	0,0281

Tabela 13 - Síntese de resultados da análise comparativa por grupos (Teste de Dunn)

Parâmetro de brecha	H_0 rejeitada ao nível de significância de 5% (Teste de Dunn e ajuste de Bonferroni)					
	Fatores interveniente	Categoria 1	Categoria 2	N#1	N#2	p-valor
Z (m/m)	Modo de falha	EI	GG	60	104	0,005
	Volume	Não identificado		-	-	-
H _B /H _d (m/m)	Tipo Específico	HOM	ND	164	79	0,0031
	Presença de núcleo	NÃO	ND	212	71	0,0109
	Erodibilidade	EA	ND	33	235	0,0312
		M	ND	76	97	0,0041
	Magnitude	MG	P	8	114	0,005
		ND	P	97	114	1 x 10 ⁻⁵
	Altura	Não identificado		-	-	-
	Volume	M	ND	55	97	0,0030
		ND	P	97	151	0,0011
	Forma	INT	ND	88	122	0,0004
LRG		ND	43	122	0,0038	
T _f (h)	Não identificado	-	-	-	-	-
L _{Bf} /L _{crista} (m/m)	Altura	Não identificado		-	-	-
	Forma	INT	LRG	67	33	0,0167

EI = Erosão Interna; GG = Galgamento; HOM = Maciço homogêneo; NÃO = Sem núcleo; EA = Erodibilidade Alta; M = Médio; P = Pequeno; INT = Intermediária; LRG = Larga; ND = Não Definido

A análise comparativa por grupos indicou que as amostras de observações da declividade da parede lateral da brecha (Z) associadas aos modos de falha galgamento (GG) e erosão interna (EI) apresentam características distintas a um nível

de significância de 5%. As observações da razão entre a largura de fundo das brechas e o comprimento de crista (L_{Bf}/L_{crista}) também mostraram diferenças significativas (5%) entre as categorias de forma da barragem intermediária (INT) e larga (LRG). Isso indica que, para esses casos, é necessário o ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade às amostras separadas pelas categorias formadas em função das características da barragem ou condições de ruptura.

O teste de Kruskal-Wallis indicou que diversos grupos apresentaram comportamento distinto entre as amostras da razão entre as alturas de brecha e da barragem (H_B/H_d). Esse foi o caso do tipo de barragem, presença de núcleo, erodibilidade, magnitude, altura, volume e forma. O teste *post hoc* de Dunn indicou que, nesses casos, a diferença observada sempre estava em relação às categorias não definidas (ND) ou com um pequeno número de observações, como foi o caso de barragens de muito grande porte, que apresentam apenas 8 observações, o que não justifica uma avaliação distinta aos demais grupos. Assim, considerou-se que para a razão H_B/H_d o ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade deve ser realizado a partir da amostra completa. O mesmo foi considerado para a amostra do tempo de formação de brecha (T_f) que não teve diferenças indicadas pelo teste de Kruskal-Wallis.

As Tabelas 14 a 17 apresentam algumas informações a respeito das amostras divididas por grupos. As Figuras 21 a 24 apresentam os gráficos *box plot* dessas amostras, que ilustram as diferenças entre as amostras.

Tabela 14 - Informações relativas aos grupos da amostra de Z

Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil	Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil
Modo de falha				Magnitude			
DT	2	1,32	1,28	P	74	0,87	1,00
EI	62	0,62	0,65	M	61	1,00	2,02
GG	116	1,24	2,04	G	13	1,37	2,09
PC	5	0,82	0,56	MG	7	2,67	2,49
Tipo específico de barragem				Altura classificada			
COM	6	1,35	1,04	P	119	0,96	1,34
FC	5	0,25	0,56	M	50	1,00	2,11
HOM	107	0,94	1,27	G	10	1,45	1,96
TNU	25	1,22	2,44	MG	4	0,90	0,29
ZON	20	1,09	1,97	ND	2	0,46	0,46
ND	22	0,52	1,00	Volume Classificado			
Presença de núcleo ou revestimento				P	102	0,82	0,96
NÃO	134	1,00	1,30	M	43	1,19	2,20
SIM	30	0,97	2,39	G	5	3,06	3,35
ND	21	0,53	1,08	MG	5	3,26	0,85
Erodibilidade				ND	30	0,96	2,73
EB	6	0,65	0,44	Forma da seção da barragem			
EM	34	0,94	0,76	EST	43	1,04	1,56
EA	26	0,96	2,01	INT	67	0,86	1,11
ND	119	1,00	2,03	LRG	33	1,00	1,59
				ND	42	0,95	2,07

Figura 21 - Box plot da análise da declividade da parede lateral da brecha por grupos

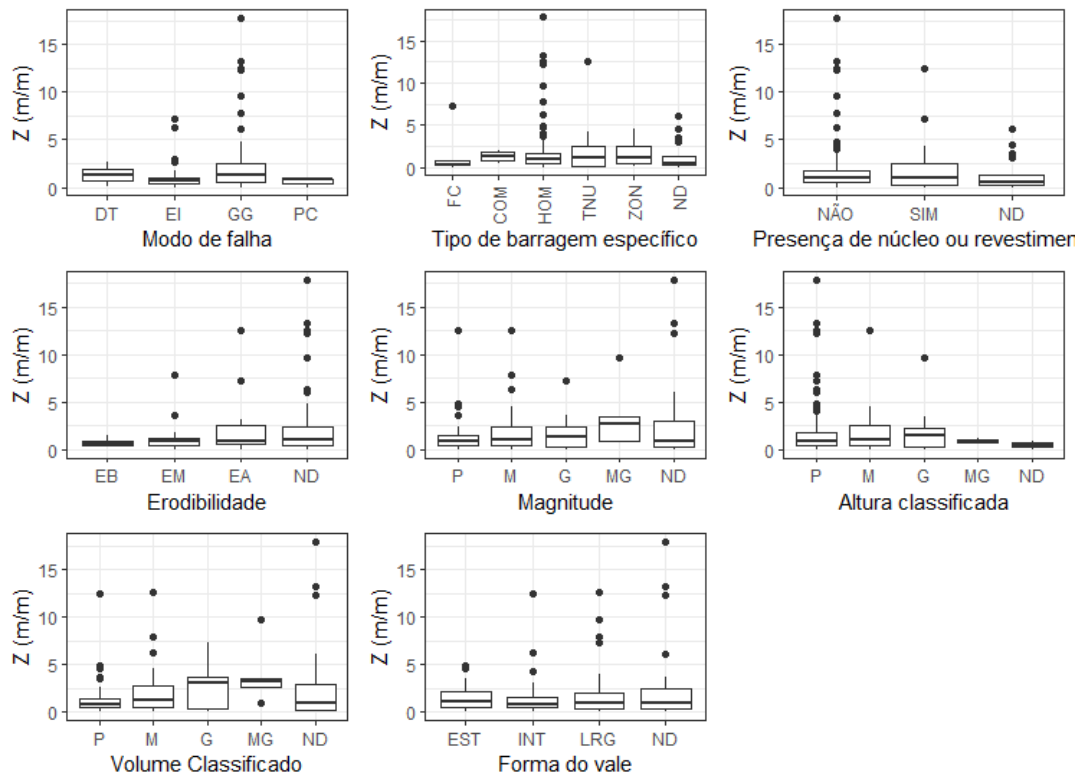


Tabela 15 - Informações relativas aos grupos da amostra de H_b/H_d

Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil	Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil	
Modo de falha				Magnitude				
DT	2	0,78	0,24	P	114	1,00	0,01	
EI	85	1,00	0,11	M	76	1,00	0,01	
GG	202	1,00	0,17	G	19	1,00	0,12	
PC	23	0,81	0,54	MG	8	0,66	0,47	
PO	1	1,00	0,00	ND	97	0,95	0,50	
ND	1	1,00	0,00	Altura classificada				
Tipo específico de barragem				P	220	1,00	0,17	
COM	8	0,90	0,14	M	70	1,00	0,11	
FC	5	1,05	0,20	G	19	1,00	0,48	
HOM	164	1,00	0,09	MG	5	0,68	0,49	
TNU	31	1,00	0,22	Volume Classificado				
ZON	27	1,00	0,00	P	151	1,00	0,08	
ND	79	1,00	0,50	M	55	1,00	0,00	
Presença de núcleo ou revestimento				G	5	1,03	0,12	
NÃO	212	1,00	0,10	MG	6	0,79	0,43	
SIM	31	1,00	0,22	ND	97	0,95	0,50	
ND	71	1,00	0,45	Forma da seção da barragem				
Erodibilidade				EST	61	1,00	0,12	
EB	6	0,81	0,29	1,00	INT	88	1,00	0,08
EM	40	1,00	0,07	1,00	LRG	43	1,00	0,04
EA	33	1,00	0,05	1,00	ND	122	1,00	0,42
ND	235	1,00	0,23					

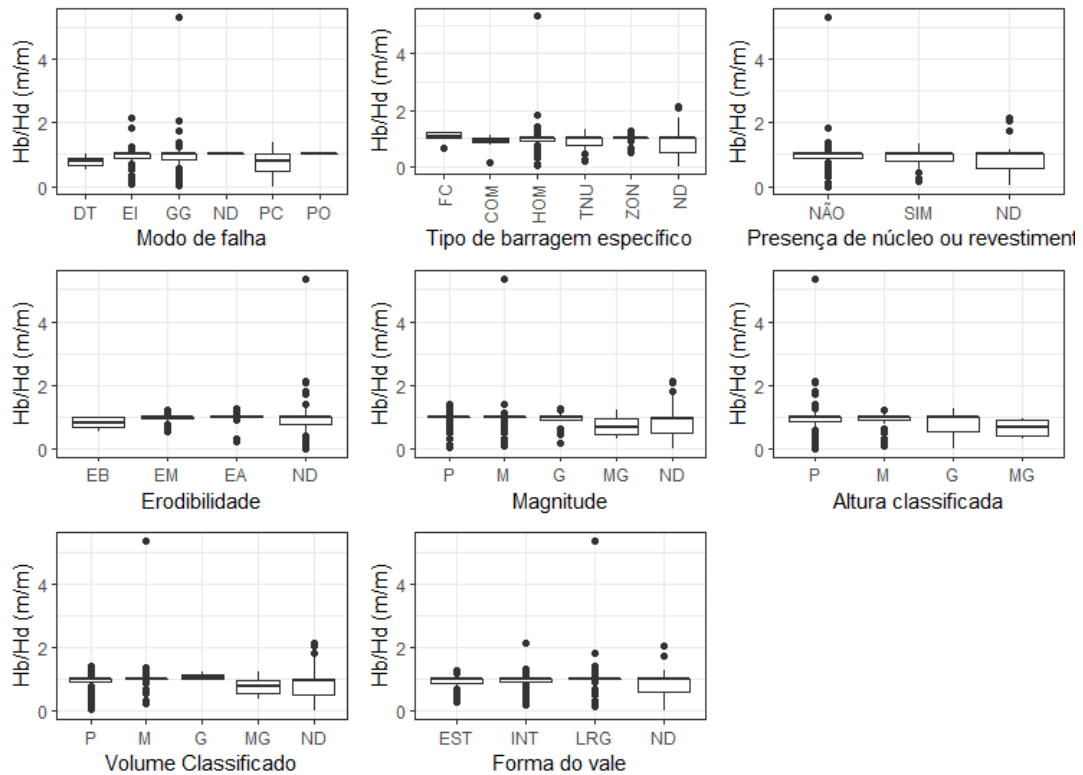
Figura 22 - Box plot da análise da razão H_b/H_d por grupos

Tabela 16 - Informações relativas aos grupos da amostra de T_f

Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil	Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil
Modo de falha				Magnitude			
DT	1	0,08	0,00	P	25	0,75	1,10
EI	27	0,92	0,50	M	30	0,88	0,94
GG	51	0,75	0,88	G	11	1,00	1,35
PC	5	2,00	1,50	MG	5	0,50	0,66
Tipo específico de barragem				Altura classificada			
COM	4	0,83	0,47	P	38	0,75	0,50
FC	3	0,67	1,04	M	25	1,00	1,50
HOM	38	0,50	0,62	G	9	0,83	1,12
TNU	21	1,00	1,50	MG	2	0,31	0,19
ZON	14	1,00	0,62	ND	10	0,63	0,50
ND	4	0,83	0,71	Volume Classificado			
Presença de núcleo ou revestimento				P	42	0,91	1,12
NÃO	56	0,75	0,50	M	23	0,67	0,50
SIM	24	0,92	1,50	G	3	1,00	0,75
ND	4	0,83	0,71	MG	3	0,83	0,54
Erodibilidade				ND	13	0,50	0,50
EB	3	2,33	0,63	Forma da seção da barragem			
EM	15	0,83	0,59	EST	17	0,83	1,25
EA	21	0,67	0,50	INT	31	0,92	0,88
ND	45	0,75	0,87	LRG	18	0,67	0,50
				ND	18	0,79	0,87

Figura 23 - Box plot da análise do tempo de formação da brecha por grupos

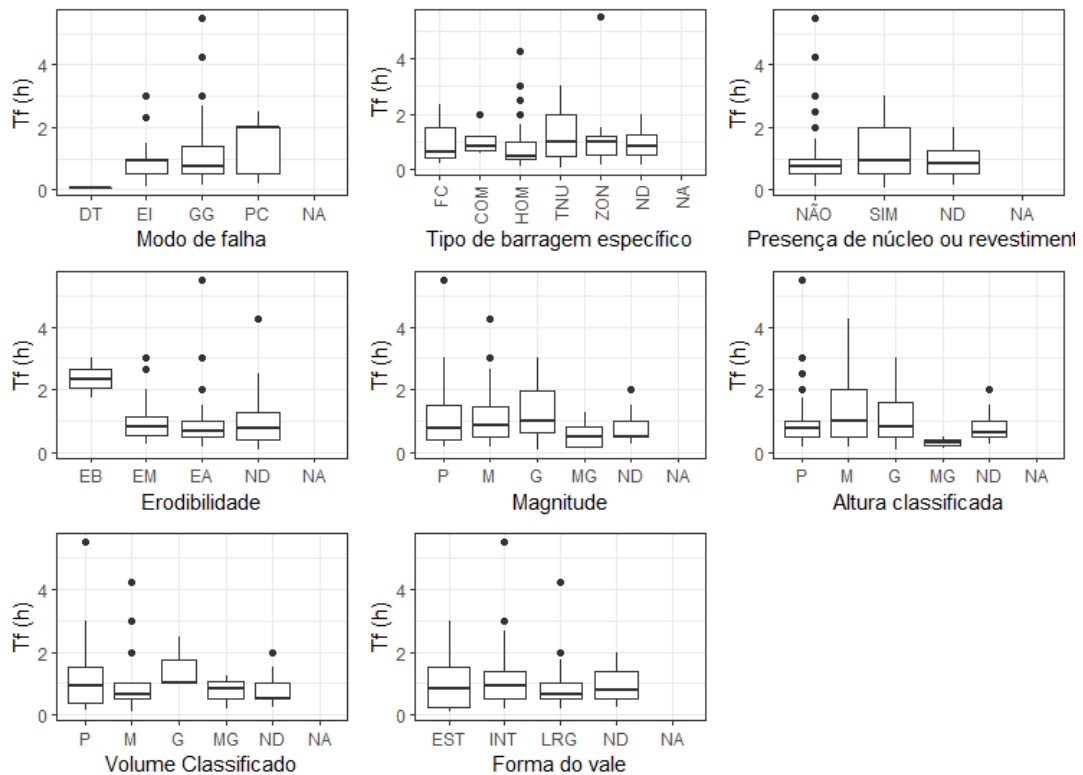
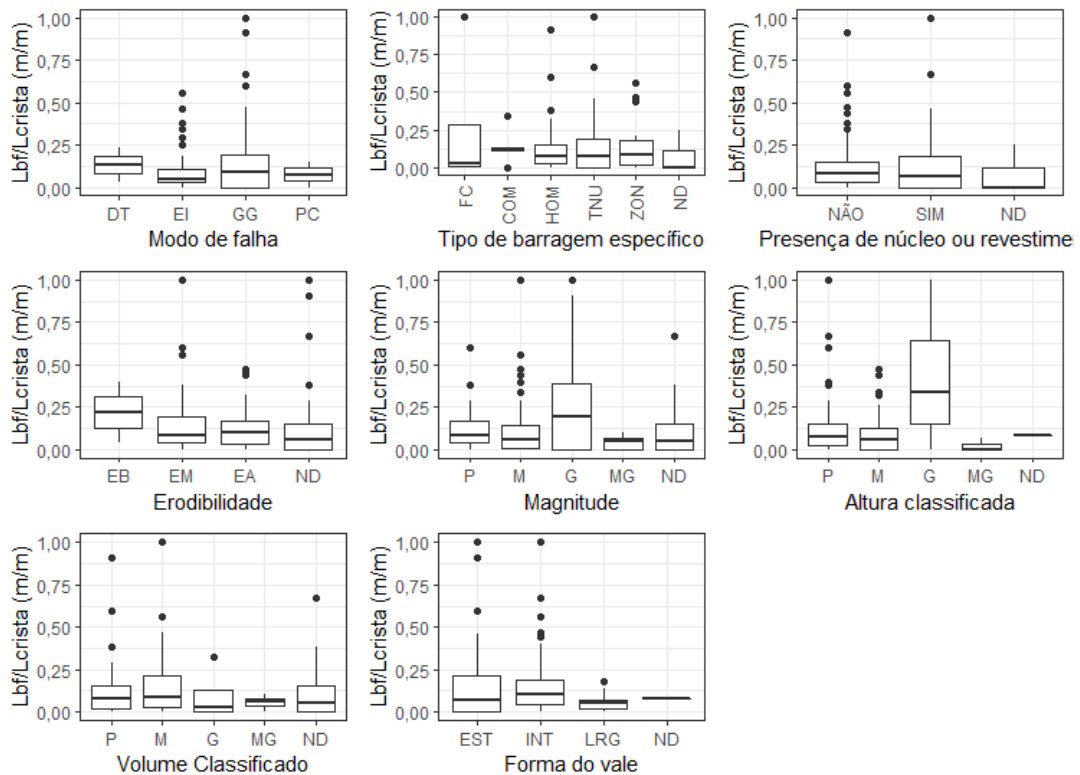


Tabela 17 - Informações relativas aos grupos da amostra de L_{Bf}/L_{Crista}

Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil	Classe	n	Mediana	Intervalo Interquartil
Modo de falha				Magnitude			
DT	2	0,13	0,10	P	66	0,08	0,13
EI	51	0,05	0,08	M	51	0,06	0,13
GG	89	0,09	0,19	G	11	0,19	0,39
PC	2	0,08	0,07	MG	5	0,05	0,07
Tipo específico de barragem				Altura classificada			
COM	5	0,12	0,02	P	92	0,08	0,13
FC	4	0,03	0,28	M	40	0,06	0,12
HOM	92	0,07	0,12	G	8	0,34	0,49
TNU	20	0,07	0,19	MG	3	0,00	0,04
ZON	16	0,09	0,17	ND	1	0,08	0,00
ND	7	0,00	0,12	Volume Classificado			
Presença de núcleo ou revestimento				P	88	0,08	0,14
NÃO	113	0,08	0,12	M	37	0,09	0,18
SIM	24	0,07	0,19	G	4	0,03	0,13
ND	7	0,00	0,12	MG	4	0,06	0,04
Erodibilidade				ND	11	0,05	0,16
EB	2	0,22	0,18	Forma da seção da barragem			
EM	30	0,09	0,16	EST	43	0,07	0,22
EA	23	0,10	0,13	INT	67	0,10	0,15
ND	89	0,06	0,15	LRG	33	0,05	0,05
				ND	1	0,08	0,00

Figura 24 - Box plot da análise por grupos da razão L_{Bf}/L_{Crista} 

4.4.3 Discussão

As diferenças significativas entre as amostras indicadas pelos testes de Kruskal-Wallis e Dunn se referem aos dados considerados na presente análise e assim, as incertezas relacionadas à obtenção desses dados se estendem para as análises. Um ponto a se ressaltar é o grande número de valores ausentes (*missing values*) que em muitos casos pode ter limitado as análises observadas. Como exemplo cita-se a avaliação dos grupos da amostra de H_B/H_d no qual o Teste de Kruskal-Wallis indicou diferenças significativas entre diferentes grupos mas que foram identificadas apenas em comparação com grupos não definidos. Esse aspecto tornou a análise limitada, uma vez que foi considerado que esse resultado não agregou a análise.

Outro aspecto que merece ser discutido é o reduzido número de observações em alguns subconjuntos considerados na análise. Esse também pode ser um limitador. Observa-se nos gráficos *box plot* e nas informações das amostras que entre alguns grupos existe uma diferença considerável entre as medianas e intervalos interquartil (e.g. T_f para barragens com e sem núcleo e diferentes erodibilidades; L_{Bf}/L_{crista} para barragens de altura grande e as demais; todos os parâmetros em relação à amostra de erodibilidade baixa; H_B/H_d para barragens de muito grande e pequeno porte, entre outros). Essas diferenças não foram significativas para os testes aplicados. Esses levam em consideração o tamanho das amostras e assim, acredita-se que, amostras maiores associadas a diferentes características e com número de observações mais similares podem apresentar diferentes resultados. No entanto, ressalta-se que a obtenção dessas amostras não é trivial.

As diferenças significativas indicadas pelos testes ao conjunto de dados analisados corroboram com alguns resultados apresentados na literatura. Esse foi o caso das diferenças entre as amostras de Z separadas pelos modos de falha galgamento (GG) e erosão interna (EI). FROEHLICH (1995, 2008 e 2016) também indica em seus modelos que os valores de Z se diferem em razão do modo de falha galgamento e *piping* (erosão interna).

A diferença significativa entre as amostras de L_{Bf}/L_{crista} em razão da forma da barragem não foi apresentada por nenhuma outra referência de modelos de previsão empíricos

de brecha consultadas. Por outro lado, diferenças apresentadas por essas referências não foram confirmadas pelos testes aplicados às amostras avaliadas.

VON THUN & GILLETTE (1990) indicam diferenças significativas de Z em função do tipo de material de preenchimento da barragem. Os autores ainda indicam que largura da brecha apresenta comportamento diferente em função da classe de volume da barragem. Já FROEHLICH (1995, 2008 e 2016) indica que a largura da brecha é influenciada pelo modo de falha. XU & ZHANG (2009) também consideram que a largura da brecha se diferencia em razão do modo de falha, além da classe de erodibilidade do maciço. Esses autores ainda indicam que a erodibilidade influencia na razão H_B/H_d e no T_f . Ressalta-se que nenhuma dessas diferenças no comportamento dos parâmetros de brecha indicadas na literatura foi considerada significativa nos testes aplicados às amostras em estudo.

4.5 Ajuste de Distribuições Teóricas de Probabilidade

4.5.1 Metodologia

Existe formalizada na literatura uma série de distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas para modelar um conjunto de observações de uma variável aleatória contínua. A qualidade do ajuste de um modelo de distribuição de probabilidade a uma amostra pode ser avaliada de diferentes maneiras. A comparação entre quantis empíricos e teóricos e a utilização de métricas são algumas delas.

Na presente análise, foram consideradas como distribuições candidatas à modelação dos parâmetros de brecha de ruptura, diferentes distribuições teóricas de probabilidade amplamente difundidas no meio técnico-científico. Optou-se por testar as distribuições Uniforme, Triangular, Normal e Log-Normal, disponibilizadas no *software* McBreach, aplicado por LARA (2016) e GOODELL (2018) para simulação dos parâmetros de brecha. Dentre essas distribuições, será identificada aquela de melhor ajuste para utilização na próxima etapa do trabalho. Outros modelos de distribuições de probabilidade também são avaliados, a fim de identificar se, além dos modelos disponibilizados pelo McBreach, outros apresentam melhor ajuste. Para essa análise foram selecionadas as distribuições Exponencial, Gama e Gumbel.

Diferentes características podem ser observadas nos modelos de distribuição de probabilidade selecionados. Observa-se distribuições simétricas, assimétricas, com limite superior e inferior, com mesma densidade para todos valores e com funções de quantis lineares e não lineares com relação aos parâmetros. Dessa forma, buscou-se considerar uma ampla diversidade de distribuições, as quais atendem à maior parte dos comportamentos de dados amostrais associados a variáveis aleatórias contínuas.

Para a estimativa dos parâmetros das distribuições candidatas, foi utilizado o Método da Máxima Verossimilhança (MVS). DELIGNETTE-MULLER (2015) indica que o MVS, junto com o método dos momentos, é um dos mais utilizados na literatura técnica e científica para a definição dos parâmetros e ajuste de distribuições de probabilidade a conjuntos amostrais. O MVS se define, basicamente, como a tentativa de maximizar uma função dos parâmetros da distribuição, conhecida como função de verossimilhança. A Equação (13) apresenta a função do estimador segundo o MVS.

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (13)$$

onde: x_i = observações da variável X ; n = número de observações; $f(\cdot|\theta)$ = função densidade da distribuição paramétrica.

Para a avaliação da qualidade do ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade às amostras, foram considerados o Critério de Informação de Akaike – AIC (AKAIKE, 1974) e o Critério Bayesiano de Schwarz – BIC (SCHWARZ, 1978). Esses critérios se aplicam apenas a estimadores de máxima verossimilhança, e reforça a escolha pelo MVS para estimativa dos parâmetros.

Os critérios de informação AIC e BIC representam métodos quantitativos para estimar a divergência entre os valores do modelo e da amostra observada, considerando o número de parâmetros do modelo e também, o número de observações no caso do BIC. Essas métricas foram utilizadas na avaliação objetiva da qualidade do ajuste das distribuições, sendo considerado que quanto menores os valores do teste, melhor é a qualidade do ajuste. As Equações 14 e 15 descrevem o modo de cálculo dos critérios.

$$AIC = 2\ln(L) + 2k \quad (14)$$

$$\text{BIC} = 2\ln(L) + 2k\ln(n) \quad (15)$$

Onde: L = Função de verossimilhança paramétrica; k = número de parâmetros do modelo e n = tamanho da amostra

Além dos critérios AIC e BIC, a qualidade dos ajustes também foi realizada a partir da análise gráfica. É desejável que os estimadores não apresentem estimativas sistematicamente maiores ou menores que os verdadeiros valores da amostra, sendo essa avaliação realizada a partir do gráfico quantil-quantil.

4.5.2 Descrição das amostras

A caracterização das amostras a partir da definição de estatísticas descritivas é um aspecto importante para o ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade às amostras. As informações apresentadas nessa análise permitem conhecer o comportamento geral dos dados, que serve como indicativo para prescrição dos modelos de distribuição de probabilidade.

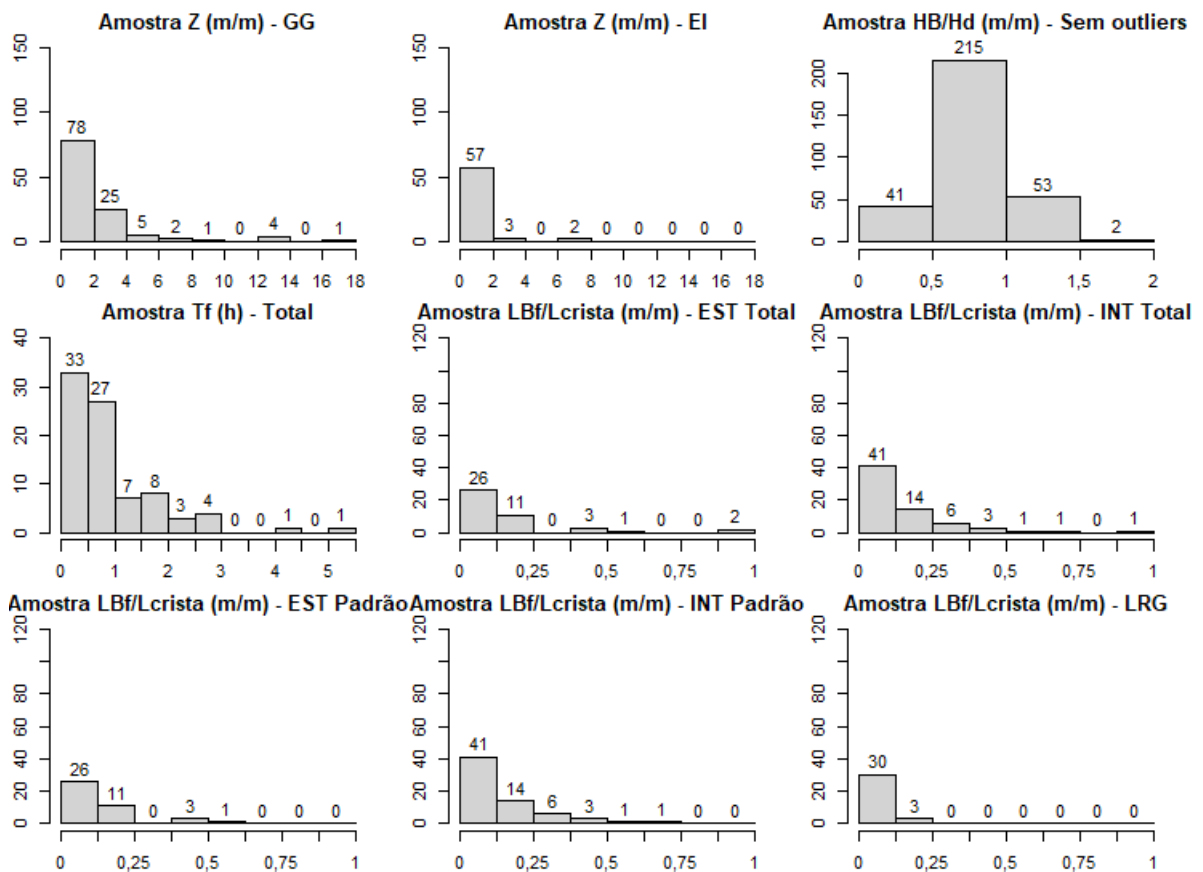
A estatística descritiva permite observar a medida de tendência central e dispersão dos dados, sendo possível observar registros de valores que seriam considerados típicos para os parâmetros, mas também valores extremos, que fogem do comportamento padrão. A caracterização das amostras extraídas do banco de dados estão apresentadas na Tabela 18 e nos histogramas da Figura 25.

Tabela 18 – Estatística descritiva das amostras utilizadas no ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha

Estatística	Z (m/m)		H_B/H_d (m/m)	T_f (h)	L_{Bf}/L_{crista} (m/m)				
	GG	EI	sem outliers	Total	EST Total	INT Total	EST Padrão	INT Padrão	LRG
Tamanho da amostra	116	62	311	84	43	67	41	66	33
Média	2,18	0,95	0,885	1,06	0,15	0,15	0,11	0,13	0,05
Mediana	1,24	0,62	1,000	0,75	0,07	0,10	0,07	0,10	0,05
Moda	0,00	0,00	1,000	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desvio Padrão	2,96	1,24	0,285	0,95	0,23	0,17	0,14	0,14	0,05
Variância	8,77	1,54	0,081	0,90	0,05	0,03	0,02	0,02	0,00
Coeficiente de variação	1,36	1,31	0,321	0,90	1,49	1,18	1,26	1,04	0,88
Mínimo	0,00	0,00	0,002	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	17,82	7,27	1,829	5,50	1,00	1,00	0,60	0,67	0,18

De maneira geral, as amostras avaliadas se caracterizam como amostras não negativas, com limite inferior igual ou maior que zero. Com base nos histogramas observa-se que as amostras Z , T_f e L_{Bf}/L_{crista} são assimétricas à direita, estando a maior densidade de dados nas primeiras classes de valores. A amostra H_B/H_d apresenta uma assimetria menos acentuada, apesar de também ser considerada como assimetria à direita em decorrência de algumas observações localizadas nas classes superiores. A assimetria das amostras representa uma importância para o ajuste dos modelos nas caudas, para poder representar os valores extremos, que apesar de menos prováveis, são possíveis e importantes durante uma análise probabilísticas.

Figura 25 - Histograma das amostras dos parâmetros de brecha extraídas do banco de dados de referência



4.5.3 Resultados

Os ajustes dos modelos estão apresentados de maneira separada para cada um dos parâmetros. Foram testados sete modelos candidatos, dentre eles quatro disponibilizados no controlador externo McBreach, a ser utilizado na discussão da próxima etapa da pesquisa e três modelos adicionais amplamente difundidos na

literatura. A partir dos critérios de informação estimados e do ajuste gráfico (apresentado no Apêndice E), foram selecionados os modelos de melhor ajuste dentre aqueles disponibilizados no McBreach e também entre os modelos adicionais. Uma análise gráfica entre os dois modelos selecionados também foi apresentada.

4.5.3.1 Declividade da parede lateral

Conforme apresentado anteriormente, a distribuição dos valores da declividade da parede lateral apresentou diferenças significativas em função do tipo de falha. Dessa forma, a identificação dos modelos distributivos foi realizada considerando dois grupos. Um formado pelos casos de ruptura por galgamento e outro por erosão interna. Os demais modos de falha (desastres e problemas construtivos) não foram considerados na análise em função do reduzido número de observações.

As Tabelas 19 e 20 apresentam a síntese descritiva e as Figuras 26 e 27 apresentam as análises gráficas do ajuste dos modelos distributivos para as amostras de Z associadas ao galgamento e erosão interna, respectivamente. Ressalta-se que, para a avaliação das distribuições Log-Normal foi necessário o acréscimo de um valor constante para tornar a série de dados sempre positiva, transformando os valores nulos em valores não nulos. Adotou-se um valor igual a 0,0001, considerado pequeno suficiente para não contaminar a amostra.

Tabela 19 – Ajuste dos modelos de distribuição para Z (modo de falha por galgamento)

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0000$; $b = 17,8248$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 2,1815$; $\sigma = 2,9493$	posição e escala	584,1165	589,6237
Triangular	$a = 0,0000$; $b = 4,81$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	NA	NA
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 2,9072$	posição e escala	465,2169	470,7241
Exponencial	$\theta = 0,4584$	taxa	414,9631	417,7167
Gama	$\eta = 0,4974$; $\theta = 0,2281$	forma e taxa	365,8905	371,3976
Gumbel	$\alpha = 1,4240$; $\beta = 1,1676$	escala e posição	483,1595	488,6667

Dentre os modelos disponíveis testados, a distribuição Gama foi indicada como melhor ajuste. Já entre os modelos disponíveis no McBreach, o Log-Normal foi o que demonstrou melhor desempenho. No entanto, a partir da análise do gráfico quantil-quantil observa-se que o modelo Log-Normal não representa muito bem a amostra na cauda direita (valores superiores). A distribuição Gama, indicada como melhor ajuste entre os modelos testados, representa melhor a amostra nessa região, apesar de

também apresentar um certo afastamento da reta quantil-quantil em algumas regiões. Sendo assim, considera-se que o modelo Gama é o de melhor ajuste para a amostra da declividade da parede lateral da brecha de ruptura associada ao galgamento.

Figura 26 - Análise gráfica dos modelos de distribuição para Z (galgamento)

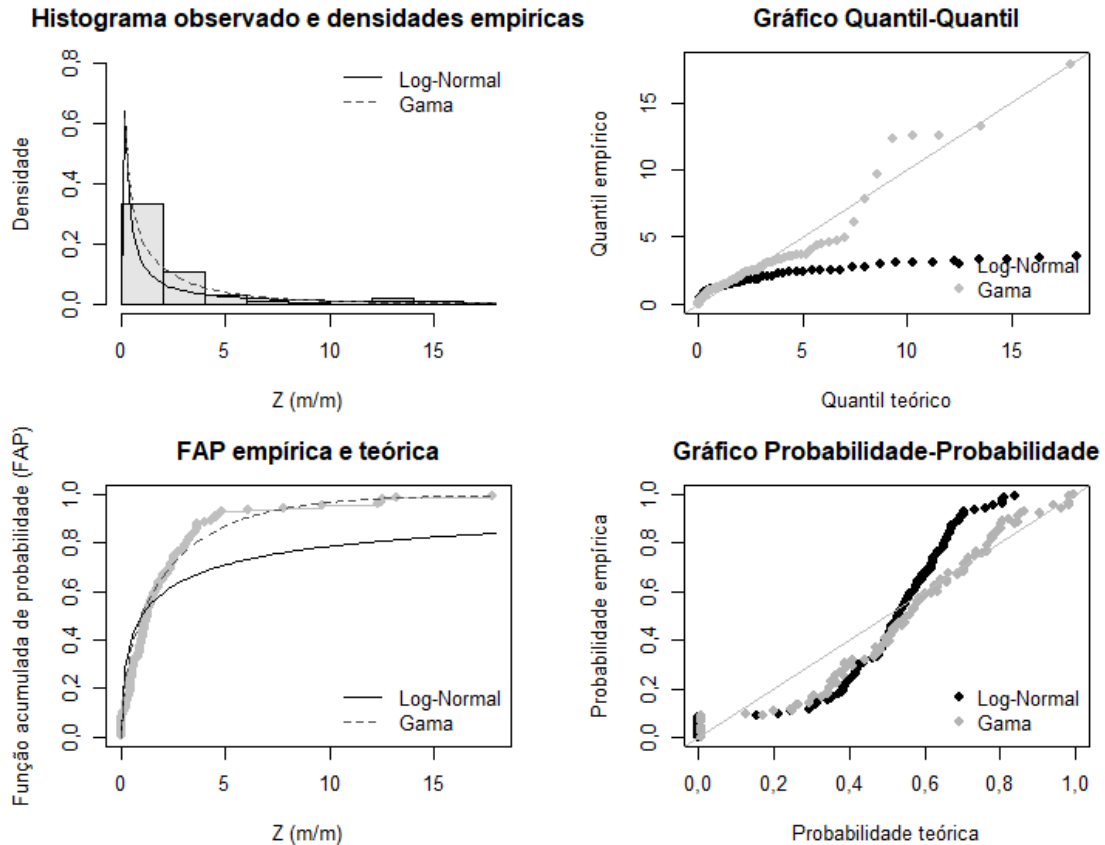


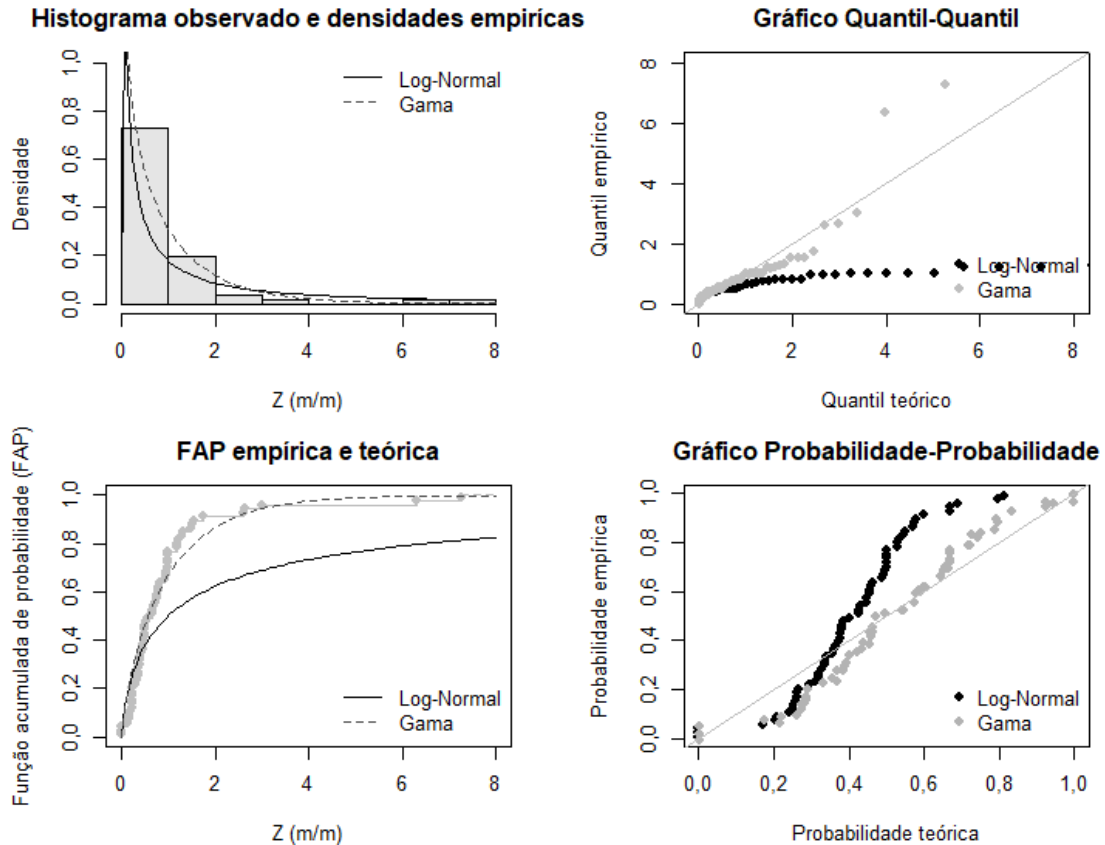
Tabela 20 – Ajuste dos modelos de distribuição para Z (modo de falha por erosão interna)

Distribuição	Parâmetros			AIC	BIC
	valores	descrição			
Uniforme	$a = 0; b = 7,2657$	mínimo e máximo	NA	NA	
Normal	$\mu = 0,9472; \sigma = 1,2310$	posição e escala	205,7144	209,9687	
Triangular	$a = 0,0000; b = 7,4145; c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	193,5261	199,9075	
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000; \sigma_{ln} = 2,2222$	posição e escala	175,0121	179,2664	
Exponencial	$\theta = 1,0557$	taxa	119,2807	121,4079	
Gama	$\eta = 0,7618; \theta = 0,8042$	forma e taxa	117,9209	122,1751	
Gumbel	$\alpha = 0,5481; \beta = 0,5549$	escala e posição	142,1973	146,4515	

De maneira similar à análise anterior, o modelo Gama apresentou melhor desempenho entre os modelos testados enquanto o Log-Normal demonstrou o melhor desempenho apenas entre os modelos disponíveis no McBreach. Novamente, a partir da análise do gráfico quantil-quantil observa-se que o modelo Log-Normal não representa muito bem a amostra na cauda direita (valores superiores). Já a distribuição Gama representa melhor a amostra nessa região, apesar de também

apresentar um certo afastamento da reta quantil-quantil. Sendo assim, considera-se que o modelo Gama é o de melhor ajuste para a amostra da declividade da parede lateral da brecha de ruptura associada à erosão interna.

Figura 27 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para Z (erosão interna)

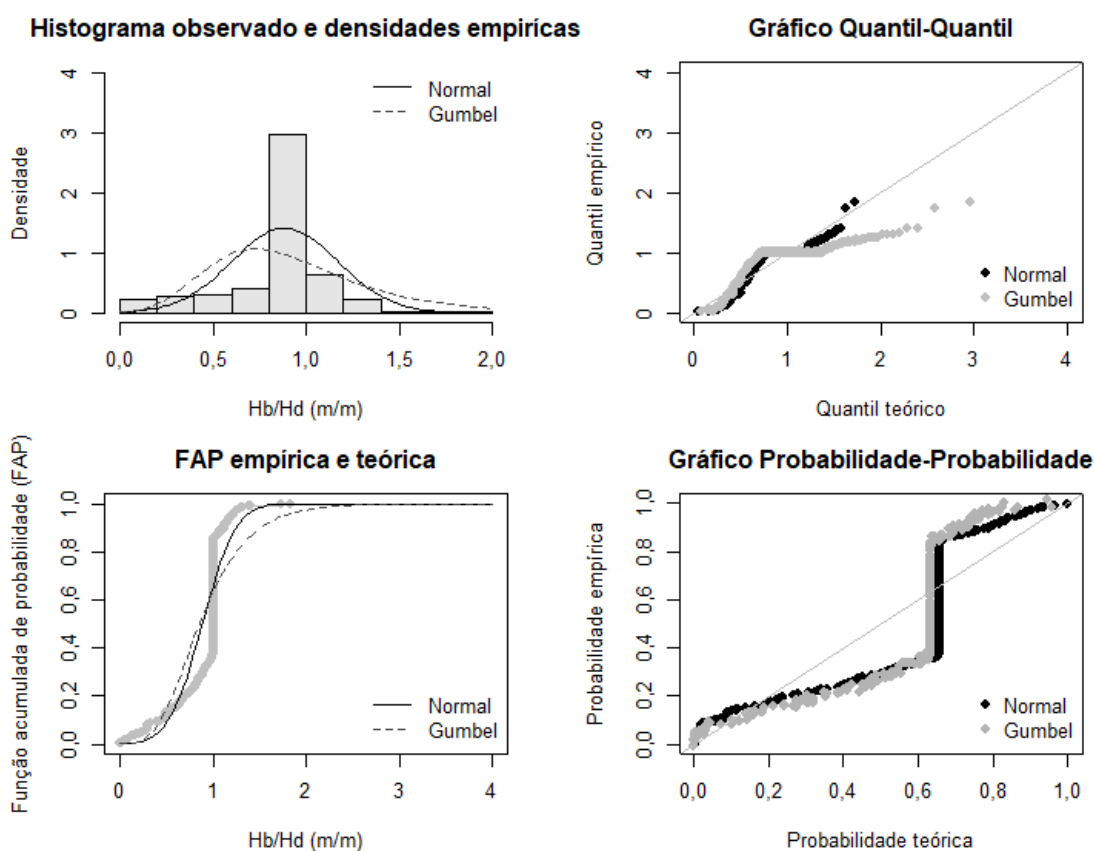


4.5.3.2 Razão H_B/H_d

A análise comparativa por grupos não indicou diferenças significativas (5%) nos subconjuntos amostrais divididos em função das características das barragens e condições de ruptura na amostra de H_B/H_d . Dessa forma, a identificação do modelo de distribuição de probabilidade foi realizada para a amostra total dos dados, excluindo as observações considerados como *outliers*. A Tabela 21 apresenta a síntese descritiva e a Figura 28 apresenta a análise gráfica do ajuste dos modelos distributivos para as amostras de H_B/H_d .

Tabela 21 – Ajuste dos modelos de distribuição para H_B/H_d

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0021$; $b = 1,8286$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 0,8854$; $\sigma = 0,2842$	posição e escala	103,9739	111,4535
Triangular	$a = 0,0000$; $b = 1,0000$; $c = 1,8353$	mínimo, máximo e moda	152,8835	164,1028
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 0,7253$	posição e escala	535,3248	542,8044
Exponencial	$\theta = 1,1294$	taxa	548,327	552,0667
Gama	$\eta = 4,2573$; $\theta = 4,8079$	forma e taxa	308,7417	316,2213
Gumbel	$\alpha = 0,3483$; $\beta = 0,7286$	escala e posição	250,1034	257,583

Figura 28 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para H_B/H_d 

Dentre os modelos testados, a distribuição de Gumbel foi o que apresentou melhores métricas de avaliação. Considerando apenas os modelos disponíveis McBreach, o Normal apresentou melhor desempenho. A análise do gráfico quantil-quantil demonstra que os modelos não representam muito bem a amostra, principalmente em relação aos quantis próximos a 1,00. O grande número de repetições do valor de H_B/H_d igual a 1,00 na amostra é um dos aspectos que dificulta o ajuste dos modelos, como pode ser observado no gráfico quantil-quantil.

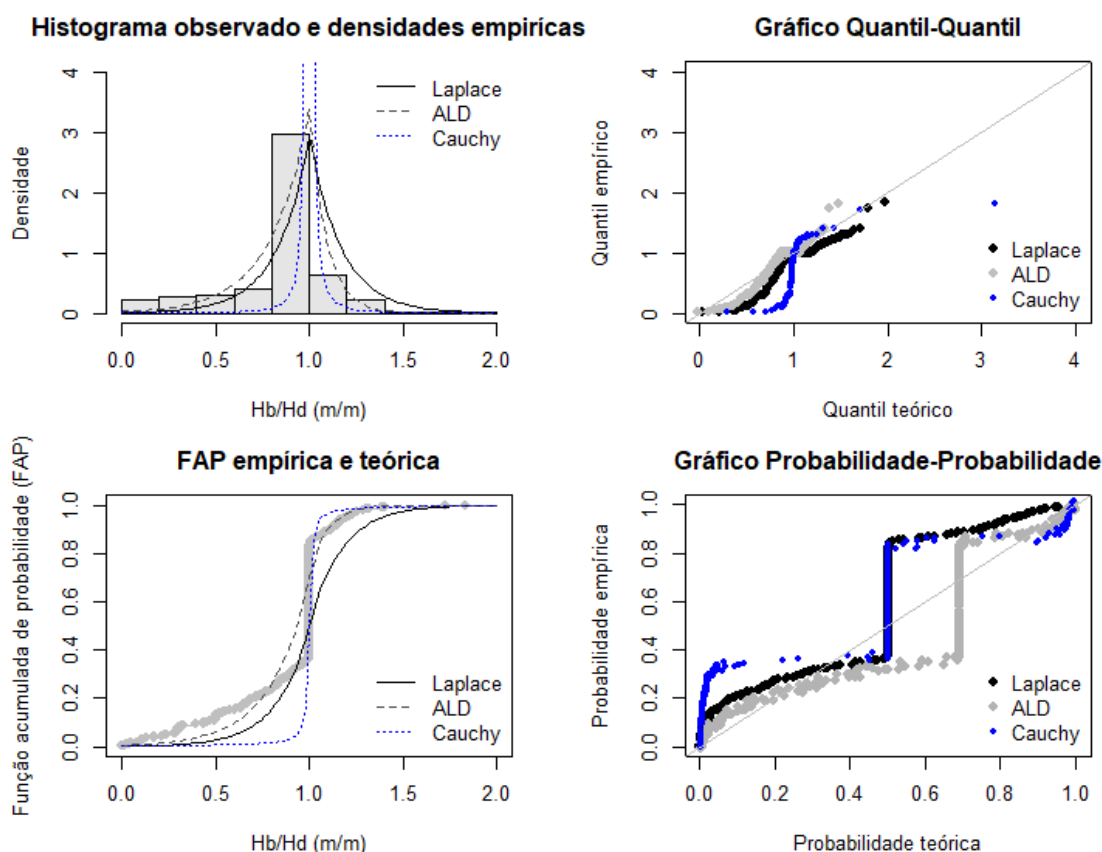
Na tentativa de melhorar o ajuste, foram testados outros modelos de distribuição de probabilidade que apresentam função de densidade de probabilidade mais próxima

ao histograma da amostra de H_B/H_d . Foram testados, adicionalmente ao que foi proposto na metodologia, os modelos de distribuição de Laplace, Laplace Assimétrico (*Asymmetric Laplace Distribution* - ALD) e Cauchy. A Tabela 22 apresenta a síntese dos ajustes e a Figura 29 apresenta a os ajustes gráficos.

Tabela 22 – Ajuste de modelos de distribuição suplementares para H_B/H_d

Distribuição	valores	Parâmetros	descrição	AIC	BIC
Laplace	$\mu = 1,0000$; $b = 0,1703$		Posição e escala	-43,892	-36,412
ALD	$m = 1,0000$; $\lambda = 0,0630$; $\kappa = 0,69328$		Posição, escala e assimetria	-128,515	-117,295
Cauchy	$\alpha_0 = 0,9999$; $\gamma = 0,0108$		Posição e escala	-175,973	-168,493

Figura 29 – Análise gráfica dos modelos de distribuição adicionais para H_B/H_d



Observa-se que as métricas das distribuições suplementares foram melhores para o ajuste à amostra de H_B/H_d . A distribuição Cauchy apresenta melhores métricas, porém apresenta um ajuste ruim nas caudas, apresentando pior desempenho nessa região se comparado com os demais modelos. Entre as duas distribuições de Laplace, a assimétrica (ALD) apresenta um melhor desempenho, principalmente avaliando o gráfico quantil-quantil. No entanto, ainda se verifica uma limitação no modelo em representar o comportamento da amostra, principalmente em relação aos quantis

empíricos iguais a 1,00. Além disso, o ajuste para a cauda esquerda (valores inferiores) é um pouco subestimado.

A partir da análise dos ajustes realizados, entende-se que os modelos considerados inicialmente na metodologia da pesquisa não representam de maneira adequada a amostra. O modelo que apresentou melhor desempenho, mas que ainda assim apresenta limitações é a distribuição de Laplace Assimétrica (ALD).

4.5.3.3 Tempo de formação da brecha

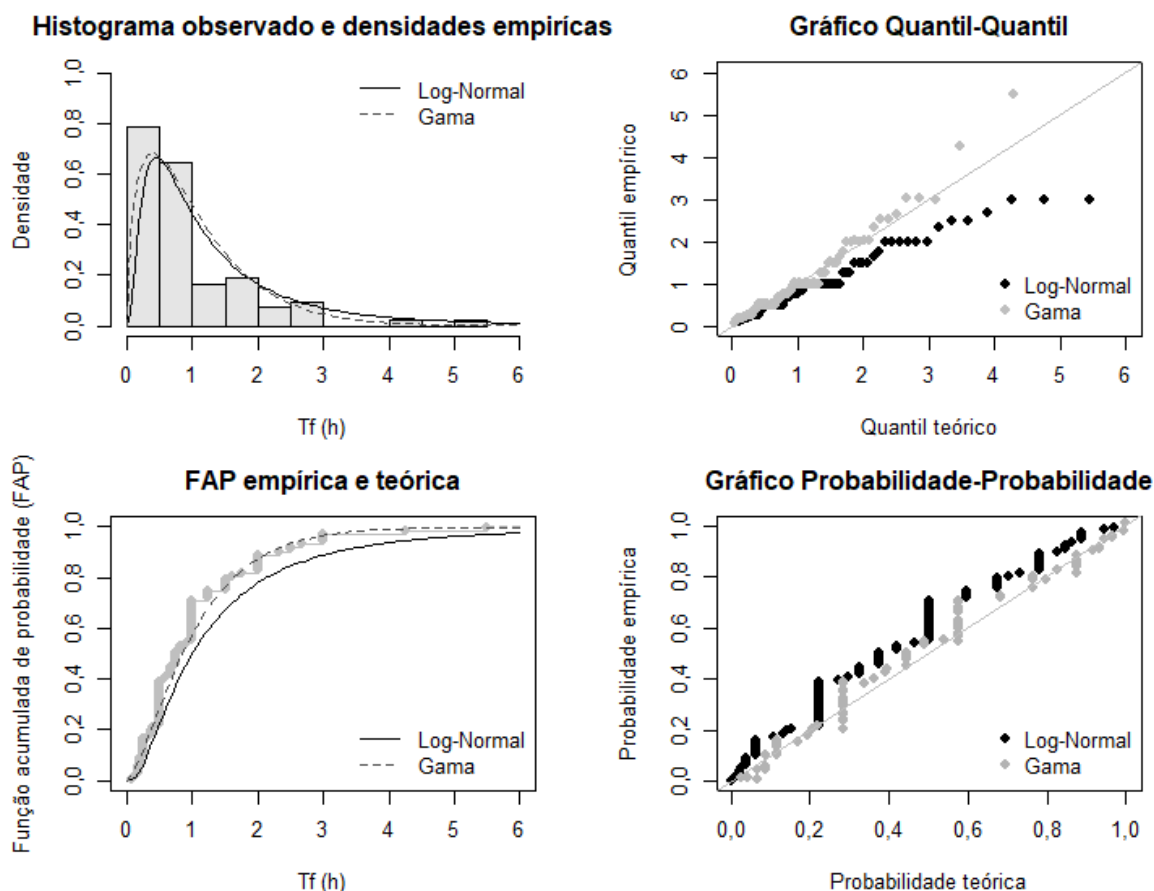
A análise comparativa por grupos não indicou diferenças significativas (5%) nos subconjuntos amostrais de T_f divididos em função das características das barragens e condições de ruptura. Dessa forma, a identificação do modelo de distribuição de probabilidade foi realizada para a amostra total dos dados. A Tabela 23 apresenta a síntese descritiva e a Figura 30 apresenta a análise gráfica do ajuste dos modelos distributivos para as amostras de T_f .

Tabela 23 – Ajuste dos modelos de distribuição para T_f

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0833$; $b = 5,5000$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 1,0616$; $\sigma = 0,9451$	posição e escala	232,8937	237,7554
Triangular	$a = 0,0833$; $b = 5,5876$; $c = 0,0833$	mínimo, máximo e moda	218,4300	225,7225
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 0,9007$	posição e escala	176,9888	181,8505
Exponencial	$\theta = 0,9420$	taxa	180,0450	182,4758
Gama	$\eta = 1,5932$; $\theta = 1,5007$	forma e taxa	172,4224	177,284
Gumbel	$\alpha = 0,5696$; $\beta = 0,6850$	escala e posição	188,5578	193,4194

Dentre os modelos avaliados, a distribuição Gama foi a que apresentou melhor ajuste. Considerando apenas os modelos disponíveis no McBreach, o Log-Normal demonstrou melhor desempenho. A partir da análise do gráfico quantil-quantil observa-se que o modelo Log-Normal não representa muito bem a amostra na cauda direita (valores superiores). A distribuição Gama, indicada como melhor ajuste entre todos modelos testados, representa melhor a amostra nessa região. Observa-se que o modelo Gama também apresenta certo afastamento da reta quantil-quantil em algumas regiões. Apesar disso, considera-se que o modelo Gama é o de melhor ajuste para a amostra do tempo de formação da brecha.

Figura 30 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para T_f



Na amostra de T_f também observa-se a repetição de alguns valores. Em razão das dificuldades em definir esse parâmetro durante ou após um evento de ruptura de barragem, nota-se no banco de dados a apresentação de valores aproximados, normalmente definidos em quartos de hora. No conjunto de 84 observações da amostra, 15 apresentam tempo de formação igual a 0,5 hora e 13 apresentam T_f de 1 hora. Além disso, outros sete tempos referentes a quartos de hora apresentam mais de uma observação. Isso apresenta uma dificuldade para o estabelecimento de uma curva quantil-quantil mais próxima a uma reta. Essa pode ser considerada como uma limitação da amostra, que apresenta valores aproximados em razão da dificuldade de obtenção dos mesmos de maneira precisa, que conseqüentemente limita a representação dos modelos.

4.5.3.4 Largura de fundo (Razão L_{Bf}/L_{Crista})

Conforme apresentado anteriormente, a distribuição dos valores da razão entre a largura de fundo da brecha e o comprimento da crista apresentou diferenças significativas em função da forma da barragem. Assim, a identificação dos modelos

distributivos foi realizada considerando três grupos, um formado pelos casos de ruptura em barragens consideradas estreitas ($L_{\text{crista}}/H_d \leq 12$), outro por barragens intermediárias ($12 < L_{\text{crista}}/H_d \leq 40$) e o terceiro relativo a barragens largas ($L_{\text{crista}}/H_d > 40$), conforme classificação apresentada anteriormente na Tabela 11.

Como discutido anteriormente, foi observado que os máximos amostrais representam condições de ruptura específicas, como rupturas associadas ao degelo ou efeito de rupturas em cascata. Dessa forma, foi realizado o ajuste dos modelos para duas amostras, uma considerando os valores máximos (total) e outra sem os valores máximos (padrão). Assim, foram avaliadas aquelas amostras que apresentam valores relacionados às condições específicas de degelo e ruptura em cascata e amostras sem esses casos.

As Tabelas 24 a 28 apresentam a síntese descritiva e as Figuras 31 a 35 apresentam as análises gráficas do ajuste dos modelos distributivos para as amostras de L_{Bf}/L_{crista} associadas a barragens estreitas, intermediárias e largas, respectivamente. Ressalta-se que, para a avaliação das distribuições Log-Normal foi necessário o acréscimo de um valor constante para tornar a série de dados sempre positiva, transformando os valores nulos em valores não nulos. Adotou-se um valor igual a 0,0001, considerado pequeno suficiente para não contaminar a amostra.

Tabela 24 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens estreitas total)

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0000$; $b = 1,0000$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 0,1534$; $\sigma = 0,2255$	posição e escala	-2,0670	1,4554
Triangular	$a = 0,0000$; $b = 1,0346$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	-28,83975	-23,55615
Log-Normal	$\mu_{\ln} = 0,0000$; $\sigma_{\ln} = 5,9854$	posição e escala	-124,0264	-120,5040
Exponencial	$\theta = 6,5208$	taxa	-73,2495	-71,4883
Gama	$\eta = 0,2515$; $\theta = 1,6397$	forma e taxa	-177,1999	-173,6775
Gumbel	$\alpha = 0,1204$; $\beta = 0,0687$	escala e posição	-31,62786	-28,10546

Figura 31 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens est. total)

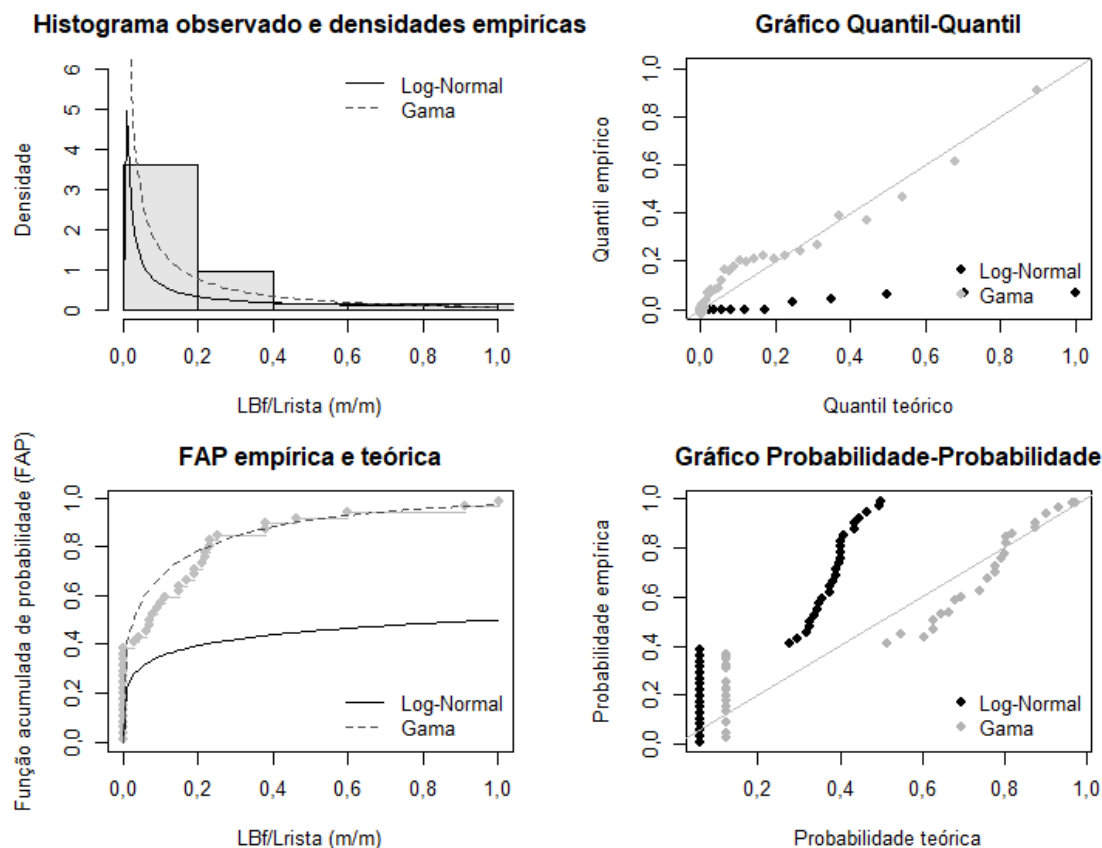


Tabela 25 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens estreitas padrão)

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0000$; $b = 0,6000$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 0,1142$; $\sigma = 0,1426$	posição e escala	-39,3461	-35,9190
Triangular	$a = 0,0000$; $b = 0,6212$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	-65,7392	-60,5985
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 6,1299$	posição e escala	-	-
Exponencial	$\theta = 8,7530$	taxa	-93,8907	-92,1771
Gama	$\eta = 0,2568$; $\theta = 2,2476$	forma e taxa	-188,780	-185,353
Gumbel	$\alpha = 0,0905$; $\beta = 0,0543$	escala e posição	-56,6999	-53,2728

Para a amostra L_{Bf}/L_{crista} relativa à ruptura de barragens estreitas, observa-se que a distribuição Gama é a que apresentou melhor ajuste. Dentre os modelos disponíveis no McBreach o Log-Normal é a que apresentou melhores métricas. Ressalta-se, principalmente a partir dos gráficos quantil-quantil, que o modelo Log-Normal não representa muito bem a amostra. O modelo Gama, além de melhores métricas, apresentou um ajuste muito melhor do que o modelo Log-Normal, sendo considerado o modelo de melhor ajuste para a amostra. No entanto, ressalta-se que o modelo Gama ainda apresenta limitações para representar a amostra, principalmente ao número de observações de brechas triangulares, que apresentam L_{Bf}/L_{crista} igual a

0,00. Ressalta-se que para a amostra padrão, sem os valores extremos associados a condições específicas de ruptura, o modelo Gama superestima os valores superiores localizados a cauda direita e não representa muito bem a amostra nessa região.

Figura 32 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (bar. est. padrão)

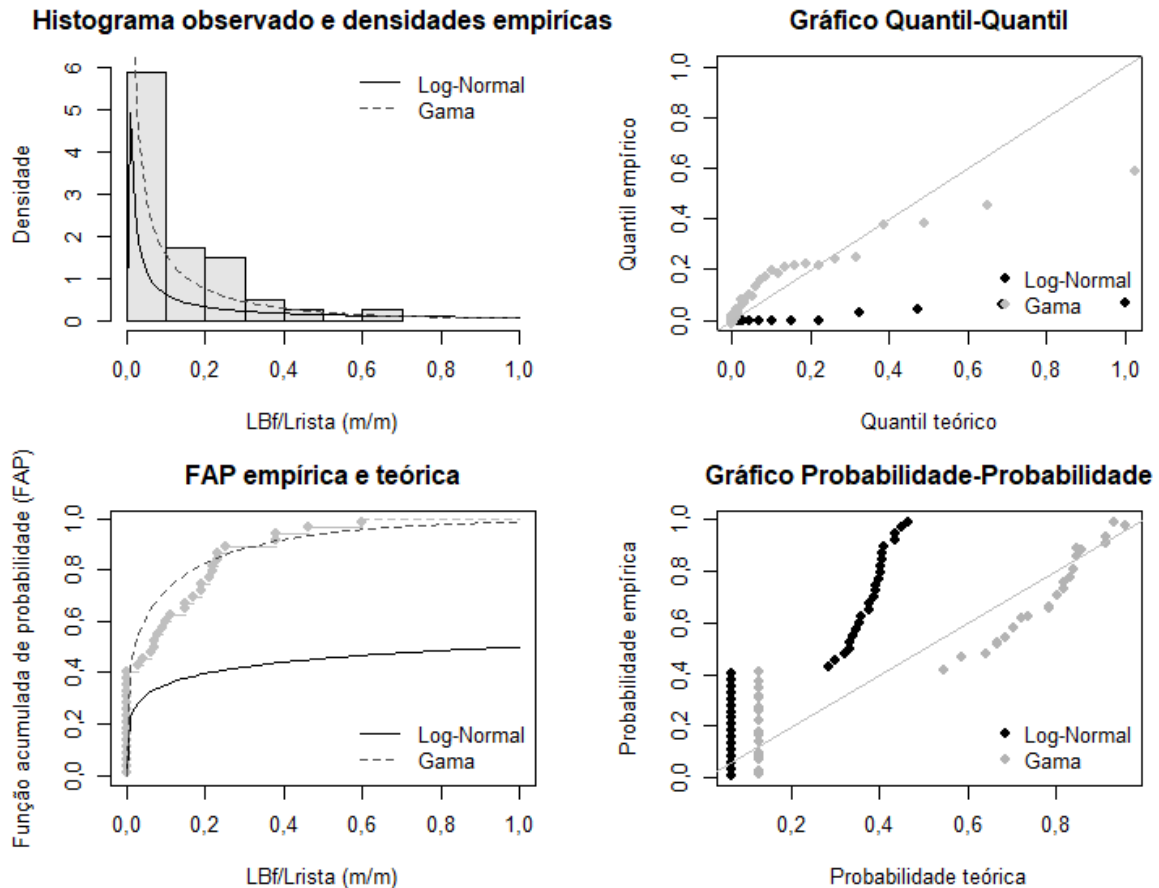


Tabela 26 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. total)

Distribuição	Parâmetros	descrição	AIC	BIC
Uniforme	valores $a = 0,0000$; $b = 1,0000$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 0,1476$; $\sigma = 0,1733$	posição e escala	-40,7327	-36,3233
Triangular	valores $a = 0,0000$; $b = 1,0186$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	-55,5621	-48,9480
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 3,9171$	posição e escala	-33,2861	-28,8767
Exponencial	$\theta = 6,7768$	taxa	120,4093	118,2046
Gama	$\eta = 0,5454$; $\theta = 3,6964$	forma e taxa	-139,611	-135,202
Gumbel	$\alpha = 0,0961$; $\beta = 0,0823$	escala e posição	-84,8667	-80,4573

Figura 33 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. total)

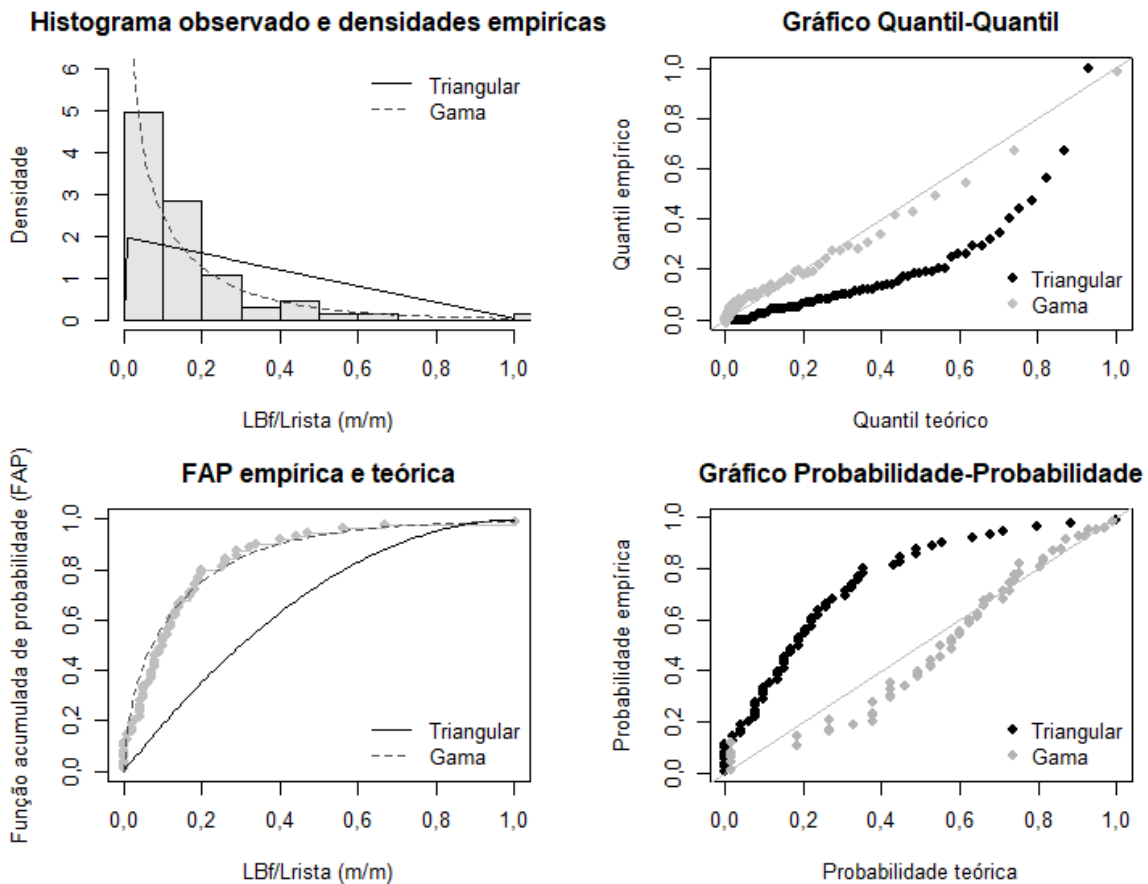


Tabela 27 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. padrão)

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0000$; $b = 0,6700$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 0,1346$; $\sigma = 0,1389$	posição e escala	-69,2224	-64,8431
Triangular	$a = 0,0000$; $b = 0,6855$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	-96,5982	-90,0292
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 3,9470$	posição e escala	-37,8622	-33,4829
Exponencial	$\theta = 7,4269$	taxa	-130,674	-128,485
Gama	$\eta = 0,5649$; $\theta = 4,1954$	forma e taxa	-146,905	-142,526
Gumbel	$\alpha = 0,0867$; $\beta = 0,0778$	escala e posição	-100,222	-95,8424

Para a amostra L_{Bf}/L_{crista} relativa à ruptura de barragens intermediárias, observa-se que a distribuição Gama foi o modelo de melhor ajuste e dentre aqueles modelos disponíveis no McBreach o modelo Triangular foi o que apresentou melhores métricas. A partir dos gráficos quantil-quantil, observa-se que o modelo Triangular, de modo geral, superestima os quantis, não representando muito bem a amostra. O modelo Gama, além de melhores métricas, apresentou um ajuste melhor do que o modelo Triangular, sendo considerado o modelo de melhor ajuste para a amostra. Porém, ressalta-se que o modelo Gama ainda apresenta limitações para representar a amostra, principalmente ao número de observações de brechas triangulares, que

apresentam L_{Bf}/L_{crista} igual a 0,00. Ressalta-se que para a amostra padrão, sem os valores extremos associados a condições específicas de ruptura, o modelo Gama superestima os valores superiores localizados a cauda direita e não representa muito bem a amostra nessa região.

Figura 34 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (bar. int. padrão)

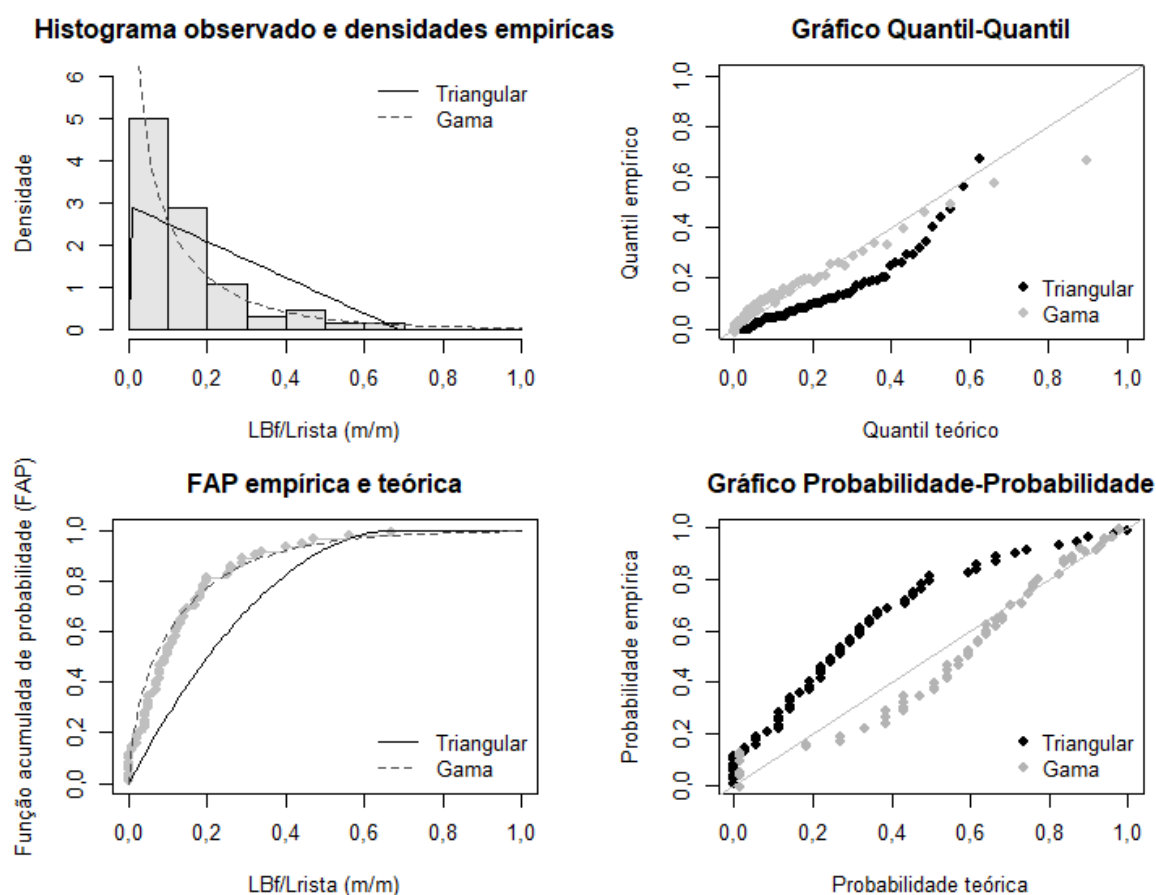
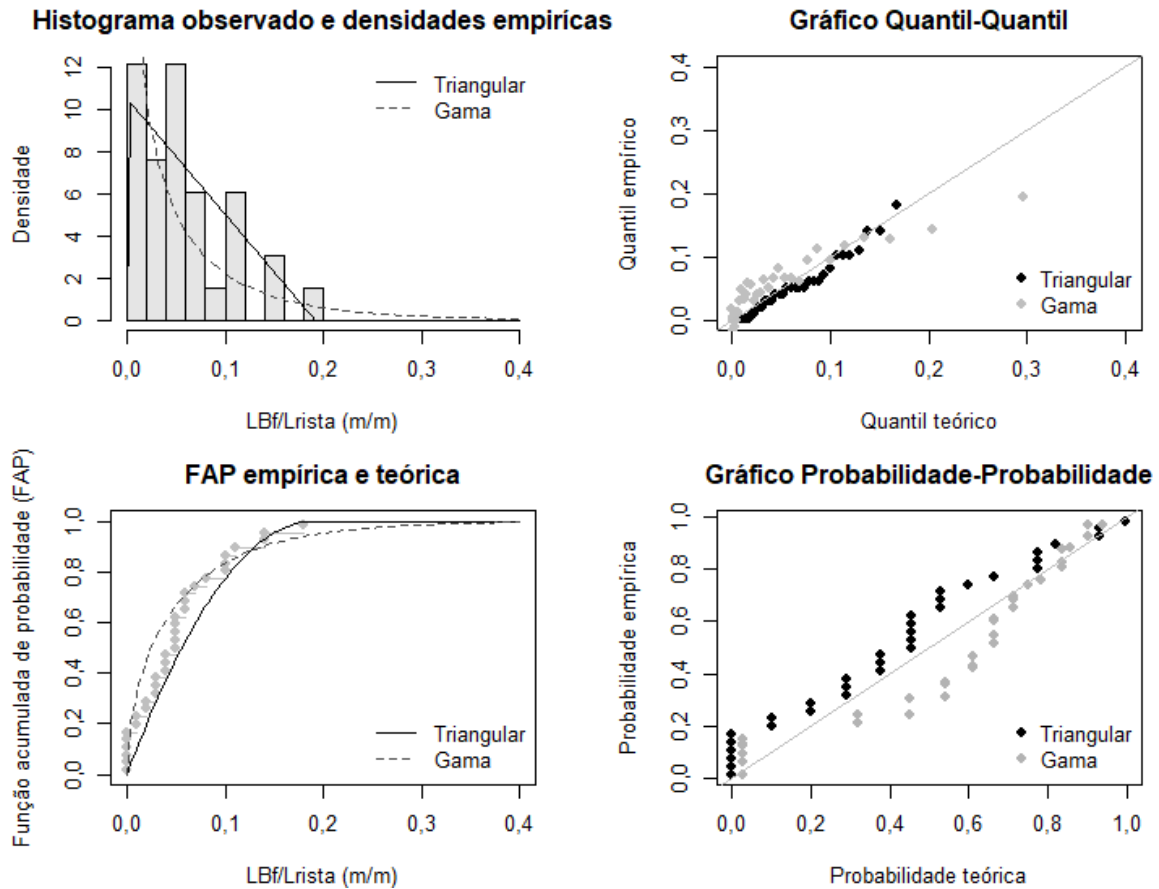


Tabela 28 – Ajuste dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens largas)

Distribuição	Parâmetros		AIC	BIC
	valores	descrição		
Uniforme	$a = 0,0000$; $b = 0,1800$	mínimo e máximo	NA	NA
Normal	$\mu = 0,0522$; $\sigma = 0,0451$	posição e escala	106,8613	103,8683
Triangular	$a = 0,0000$; $b = 0,1909$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda	-121,466	-116,977
Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 4,8078$	posição e escala	-70,2425	-67,2495
Exponencial	$\theta = 19,1493$	taxa	-126,850	-125,353
Gama	$\eta = 0,5402$; $\theta = 10,3472$	forma e taxa	-135,682	-132,689
Gumbel	$\alpha = 0,0336$; $\beta = 0,0319$	escala e posição	-114,056	-111,063

Figura 35 – Análise gráfica dos modelos de distribuição para L_{Bf}/L_{crista} (barragens largas)



Para a amostra L_{Bf}/L_{crista} relativa à ruptura de barragens largas, observa-se que a distribuição Gama também foi considerada como modelo de melhor ajuste. Dentre os modelos disponíveis no McBreach, o Triangular foi o que apresentou melhores. O modelo Triangular apresentou um bom ajuste à amostra, porém apresenta uma leve tendência a superestimar os quantis, principalmente para os menores valores. O modelo Gama, além de melhores métricas, apresentou um ajuste melhor do que o modelo Triangular, principalmente em relação à aderência à FAP, sendo considerado o modelo de melhor ajuste para a amostra. Porém, ressalta-se que o modelo Gama ainda apresenta limitações para representar a amostra, principalmente ao número de observações de brechas triangulares, que apresentam L_{Bf}/L_{crista} igual a 0,00 e aos valores superiores localizados na cauda direita, superestimando os valores nessa região.

4.6 Discussão e Conclusões Relativas à Identificação dos Modelos de Distribuição de Probabilidade dos Parâmetros de Brecha

A análise de correlação dos dados referentes aos parâmetros de brecha observadas no banco de dados demonstrou um baixo nível de correlação entre os parâmetros. Dessa forma, conclui-se que os parâmetros podem ser considerados independentes durante o sorteio dos valores nas simulações de Monte Carlo. No entanto, ressalta-se que a correlação entre Z & L_{Bf}/L_{crista} , apesar de relativamente pequena ($\tau = 0,23$), é significativa e pode ser considerada como variáveis dependentes em análises futuras, principalmente pela relação física entre os parâmetros. Essas conclusões tiveram como base uma amostra de dados com 64 observações de casos históricos de ruptura com o registro de todos os parâmetros de brecha concomitantemente.

A partir da análise dos dados, conclui-se também que alguns parâmetros de brecha apresentam comportamento amostral distinto em função de algumas características das barragens e do modo de falha. Ao nível de significância de 5%, verificou-se que o comportamento típico da declividade da parede lateral da brecha varia em razão do modo de falha da barragem (galgamento e erosão interna) e que a amostra da razão H_B/H_d se altera em razão da forma da barragem.

As Tabelas 29 e 30 apresentam os modelos considerados como melhor ajuste para as amostras avaliadas dentre aquelas disponíveis no McBreach (Uniforme, Normal, Triangular e Log-Normal) e os modelos adicionais (Exponencial, Gama e Gumbel), respectivamente. Ressalta-se que os modelos adicionais considerados na avaliação apresentaram melhor ajuste do que os modelos disponíveis no McBreach para todas as amostras. Além disso, os modelos de distribuição disponíveis no McBreach não conseguiram representar as amostras de maneira satisfatória na maioria dos casos. Exceções foram o modelo Triangular ajustado à amostra de L_{Bf}/L_{crista} associada a barragens largas, que conseguiu representar relativamente bem a amostra e o modelo Log-Normal ajustado à amostra T_f que demonstrou ajuste razoável.

Ressalta-se que nenhum dos modelos candidatos selecionados inicialmente para a presente análise conseguiram representar, de maneira satisfatória, a amostra H_B/H_d . Nesse caso foram testadas outras distribuições, sendo a distribuição Laplace Assimétrica (ADL) considerada como a de melhor ajuste. No entanto, mesmo esse

modelo ainda apresenta limitações para representar a amostra. Um dos principais motivos é a presença de um grande número de observações com o mesmo valor que representa brechas de ruptura com altura igual à altura da barragem ($H_B/H_d = 1,00$). Outras amostras como T_f e L_{Bf}/L_{Crista} também apresentam uma quantidade considerável de repetições de valores que também dificulta o ajuste dos modelos em algumas regiões dessas amostras. Nesses casos, considerou-se que os modelos representam as amostras, porém com essa limitação relacionado ao ajuste das curvas quantil-quantil, uma vez que os modelos de distribuição consideram variáveis contínuas sem repetições.

Representar esse tipo de amostra, em que grande parte das observações apresenta o mesmo valor, não é uma tarefa trivial, sendo um dos pontos que pode ser melhor explorado em pesquisas futuras relacionadas ao tema. Utilizar outros critérios para construir a amostra é uma hipótese. Na presente pesquisa tentou-se reconstruir a amostra adimensionalizando H_B por meio de outros parâmetros como a profundidade média do reservatório, largura da crista, raiz cúbica do volume e raiz quadrada da área do reservatório. Nesses casos, apesar da amostra não apresentar mais um grande número de repetições, o intervalo dos valores passou a ser muito grande, o que dificulta a utilização dos modelos em casos com características distintas daquelas observadas, em média, na amostra. Além disso, na construção da amostra a partir desses critérios observou-se uma redução significativa do número de observações, uma vez que nem sempre os registros apresentam essas informações.

O modelo Gama, por ser bastante flexível, se mostrou o modelo de melhor ajuste para todas amostras avaliadas, com exceção H_B/H_d . Sendo assim, recomenda-se que essa distribuição seja considerada nos modelos de simulação de brecha para o desenvolvimento das análises probabilísticas. Ressalta-se que o McBreach, utilizado na discussão da presente pesquisa e por GOODELL (2018) e LARA (2016), não disponibiliza essa distribuição, o que é uma limitação, uma vez que os modelos disponíveis no aplicativo não representam a distribuição das amostras dos parâmetros de brecha observadas no banco de dados de referência de maneira satisfatória.

A precisão dos modelos identificados está relacionada à qualidade dos dados utilizados. Assim, os resultados apresentados correspondem às características do

banco de dados utilizado. As incertezas relativas à construção do banco de dados podem ser melhor exploradas em pesquisas futuras, sobretudo em relação à aproximação de alguns valores relativos à altura da brecha e tempo de formação. Dessa forma, a aplicação dos modelos deve ser realizada considerando as limitações apresentadas.

Tabela 29 – Modelos disponíveis no McBreach considerados como de “melhor” ajuste

Amostra	Modelo de Melhor Ajuste	Parâmetros	
		valores	descrição
Z – Galgamento	Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 2,9072$	posição e escala
Z – Erosão Interna	Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 2,2222$	posição e escala
H_B/H_d	Normal	$\mu = 0,8854$; $\sigma = 0,2842$	posição e escala
T_f	Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 0,9007$	posição e escala
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. est. total	Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 5,9854$	posição e escala
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. est. pad.	Log-Normal	$\mu_{ln} = 0,0000$; $\sigma_{ln} = 6,1299$	posição e escala
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. int. total	Triangular	$a = 0,0000$; $b = 1,0186$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. int. pad.	Triangular	$a = 0,0000$; $b = 0,6855$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. largas	Triangular	$a = 0,0000$; $b = 0,1909$; $c = 0,0000$	mínimo, máximo e moda

Tabela 30 – Modelos adicionais considerados como de “melhor” ajuste

Amostra	Modelo de Melhor Ajuste	Parâmetros	
		valores	descrição
Z – Galgamento	Gama	$\eta = 0,4974$; $\theta = 0,2281$	forma e taxa
Z – Erosão Interna	Gama	$\eta = 0,7618$; $\theta = 0,8042$	forma e taxa
H_B/H_d	ALD	$m = 1,0000$; $\lambda = 0,0630$; $\kappa = 0,6933$	Posição, escala e assimetria
T_f	Gama	$\eta = 1,5932$; $\theta = 1,5007$	forma e taxa
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. est. total	Gama	$\eta = 0,2515$; $\theta = 1,6397$	forma e taxa
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. est. pad.	Gama	$\eta = 0,2568$; $\theta = 2,2476$	forma e taxa
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. int. total	Gama	$\eta = 0,5454$; $\theta = 3,6964$	forma e taxa
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. int. pad.	Gama	$\eta = 0,5649$; $\theta = 4,1954$	forma e taxa
L_{Bi}/L_{crista} – Bar. largas	Gama	$\eta = 0,5402$; $\theta = 10,3472$	forma e taxa

Ressalta-se que os modelos apresentados como melhor ajuste não foram os únicos considerados válidos para a representação da distribuição dos parâmetros de brecha de ruptura. Outros modelos que apresentaram piores métricas de avaliação também podem ser utilizados na representação dos parâmetros como variáveis aleatórias. O modelo Exponencial, por exemplo, apresentou bom ajuste para algumas amostras,

como Z associada à erosão interna, L_{Bf}/L_{crista} referente a barragens estreitas (padrão), intermediárias (padrão) e largas.

Considerou-se como inválidos apenas os modelos que possuem características que contradizem o significado físico do parâmetro como, por exemplo, grande probabilidade do sorteio de valores negativos ou limites não justificáveis. Esse foi o caso dos modelos Normal e Gumbel para declividade da parede lateral, tempo de formação e largura de fundo da brecha. O modelo uniforme também não se mostrou aderente a nenhum dos parâmetros, sendo desconsiderado.

Ressalta-se que, conforme discutido sobre o banco de dados (Item 4.1), não se observou um limite superior para os valores das amostras. No entanto, para alguns parâmetros, como H_B/H_d e L_{Bf}/L_{crista} , é possível definir esses limites a partir da definição da posição da rocha sã no eixo da barragem. No entanto, essa é uma informação específica para cada barragem, sendo necessário definir esse limite caso a caso. Sendo assim, uma eventual adoção de modelos delimitados superiormente deverá considerar como premissa esse ou outro critério. No caso do modelo indicado como melhor ajuste entre aqueles disponíveis no McBreach para L_{Bf} associados a barragens largas, ou qualquer outro ajuste do modelo Triangular, o limite superior indicado não tem embasamento físico, sendo apenas uma indicação dos valores amostrais, que podem alterar com a atualização das amostras ou utilização de outras amostras. Assim, a utilização desse modelo deve considerar essa ressalva. Entretanto, cabe ressaltar que a atualização dessa base de dados não é trivial, haja vista a dificuldade de obtenção de informações relativas a rupturas de barragens.

Conforme apresentado na revisão de literatura (Item 3.4.1) outros modelos de distribuição de probabilidade para os parâmetros de brecha foram propostos em pesquisas relacionadas a estudos de ruptura hipotética de barragens probabilísticos. Como diferencial dos modelos propostos na presente pesquisa em relação àqueles consultados, considera-se os seguintes aspectos:

- Análise comparativa por grupos: Alguns parâmetros apresentaram diferenças significativas entre as amostras formadas por grupos divididos em função das características da barragem ou condição de ruptura. Nos modelos consultados na

literatura, quando foi utilizada amostra de casos históricos, não foi observada essa etapa metodológica.

- Utilização de um banco de dados extenso com casos históricos de ruptura: Dos modelos consultados, apenas AHMADISHARAF *et al.* (2016) e KALININA *et al.* (2020) também utilizaram observações de casos históricos. Os primeiros autores utilizaram como referência 53 casos históricos registrados no banco de dados de WAHL (1998), valores consideravelmente inferiores ao utilizado na presente pesquisa. Já os demais utilizaram uma amostra de 14 observações de casos históricos de ruptura de barragens de concreto em arco na Suíça, que além de relativamente pequena, retrata apenas um conjunto amostral específico. A maioria dos modelos apresentados foram definidos com base nos resultados da aplicação de equações de previsão e valores considerados plausíveis, que não necessariamente representam as faixas de incertezas observadas para os parâmetros de brecha.
- Avaliação de diferentes modelos de distribuição de probabilidade: Na definição dos modelos observados na literatura, com exceção de KALININA *et al.* (2020) que testou os modelos Gama e Uniforme, não foram observados nos modelos propostos a avaliação do ajuste de diferentes distribuições de probabilidade candidatas. Apesar da distribuição Gama ter se mostrado como o modelo de melhor ajuste para maioria das amostras, essa informação não era conhecida de maneira prévia, tendo sido essa uma resposta da análise.

5 MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO HIDROGRAMA INDUZIDO PELA RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE TERRA

A fim de avaliar uma análise probabilística para a definição dos hidrogramas de ruptura de uma barragem de terra, aplicou-se as distribuições de probabilidade definidas na etapa anterior em um estudo de caso. Foi selecionado o caso proposto por ZENZ & GOLDGRUBER (2013), que representa a ruptura de uma barragem de terra por galgamento. O Método de Monte Carlo foi aplicado na simulação probabilística. Nos itens a seguir estão apresentados a metodologia, a descrição do estudo de caso, os modelos matemáticos aplicados e os resultados e discussões da análise realizada.

5.1 Metodologia para Realização das Simulações Probabilísticas

A análise probabilística dos hidrogramas de ruptura proposta na presente avaliação considera apenas a incerteza paramétrica relacionada aos parâmetros de brecha. Esses são componentes do modelo de ruptura hipotética de barragens aplicado e foram considerados como variáveis aleatórias. Assim, assume-se que as incertezas associadas aos parâmetros se propagam para a resposta do modelo. Considera-se, então, que a resposta passa a ser aleatória e depende do modelo de distribuição de probabilidades construído para representar os parâmetros.

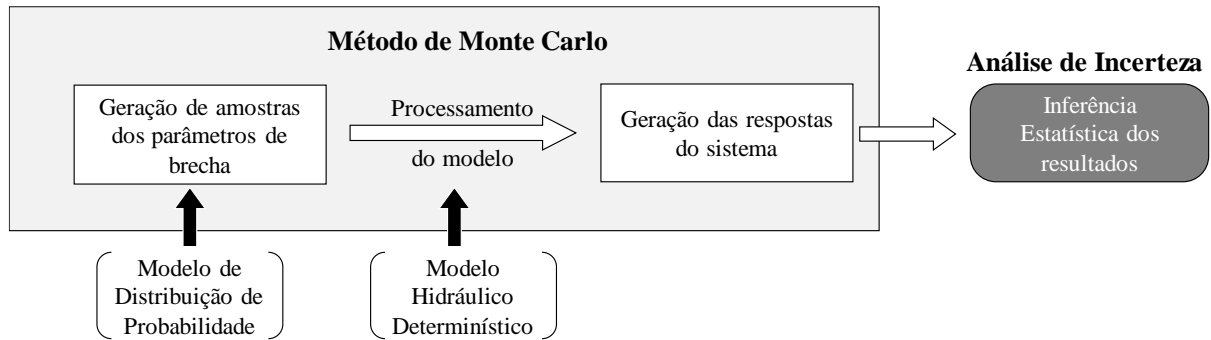
A quantificação das incertezas da modelagem é feita a partir de inferências estatísticas da resposta do sistema. Considerando a realização de um grande número de repetições do modelo, a partir da variação dos parâmetros de entrada, tem-se a mesma quantidade de resultados para o sistema. Isso permite realizar inferências estatísticas sobre essa amostra, estimando as probabilidades das respostas encontradas, conforme estabelecido pelo Método de Monte Carlo (MMC).

As etapas metodológicas adotadas na presente etapa da pesquisa estão apresentadas a seguir, bem como indicadas no fluxograma da Figura 36.

1. Definição dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha;
2. Construção de um modelo hidráulico determinístico e paramétrico que simula a ruptura da barragem;

3. Adoção de uma rotina automatizada para a amostragem aleatória dos parâmetros de brecha, configuração dos dados de entrada do modelo determinístico, processamento do modelo e registro dos resultados.
4. Inferência estatística da resposta do sistema.

Figura 36 – Fluxograma metodológico aplicado no desenvolvimento do MMC



Os modelos de distribuição de probabilidade adotados na etapa de amostragem aleatória dos parâmetros de brecha foram definidos na etapa anterior do trabalho. A metodologia e as razões para o desenvolvimento e adoção desses modelos estão apresentadas no Capítulo 4, que também discute as limitações e incertezas dos mesmos.

Inicialmente, a rotina automatizada de amostragem dos parâmetros de brecha de ruptura, configuração dos dados de entrada do modelo paramétrico de abertura de brecha, processamento do modelo e armazenamento dos resultados, seria realizada a partir da utilização do *software* McBreach 5.0.7. Porém, os modelos disponibilizados nessa ferramenta não apresentaram bons ajustes aos dados históricos analisados, conforme discutido no Capítulo 4. Dessa forma, foi aplicado uma rotina desenvolvida em linguagem Phyton (SILVA *et al*, 2021) para o sorteio dos parâmetros aleatórios a partir dos modelos identificados como de melhor ajuste às amostras. Para evitar o sorteio de valores incoerentes foi aplicada uma lógica condicional para evitar a definição de brechas com cota de fundo abaixo do topo rochoso e largura de crista maior que a distância estimada entre a posição da rocha nas ombreiras da barragem, conforme apresentado no Apêndice F. Como premissa, adotou-se que a espessura da camada do terreno natural nas ombreiras relativa à largura da crista é igual a da fundação em relação à altura da barragem.

A construção do modelo hidráulico determinístico e paramétrico, utilizado na simulação da ruptura hipotética da barragem em análise, foi realizada a partir das informações geométricas da estrutura e do terreno no qual ela encontra-se implantada. Características de cobertura do solo da região foram necessárias para a estimar a resistência ao escoamento, representada pelo coeficiente de Manning no modelo hidráulico. Condições de contorno e início da modelagem também foram definidas. Assim como os métodos, opções e tolerâncias de cálculo.

O modelo computacional escolhido para a construção do modelo hidráulico determinístico foi o HEC-RAS 5.0.7, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE). A escolha do modelo se deve ao fato do *software* ser distribuído gratuitamente, amplamente difundido e aplicado no ramo técnico-científico em estudos de inundação, inclusive, em diversos estudos de ruptura hipotética de barragens.

O MMC foi aplicado considerando 8.000 repetições, sendo observada a estabilidade estatística dos resultados. A inferência estatística das respostas provenientes do MMC foi realizada com base nos valores de vazão de pico dos hidrogramas resultantes. As incertezas dessa etapa de simulação foram estimadas pela probabilidade de superação da vazão de pico dos hidrogramas, definida a partir do conjunto de respostas da simulação. A vazão de pico foi selecionada como parâmetro de referência pelo fato de ser um resultado de simples obtenção e armazenamento. Além disso, ela representa em boa parte o impacto potencial a jusante, e de certa forma, a criticidade dos resultados. A síntese dos materiais e métodos utilizados na presente etapa da pesquisa está apresentada na Tabela 31.

Conforme discutido no Item 3.3.2 da revisão de literatura, o uso do método de *Puls* para a simulação do esvaziamento do reservatório pode ou não produzir diferenças significativas no hidrograma defluente da brecha. Uma análise de sensibilidade foi realizada utilizando tanto o método de Puls quanto o modelo hidrodinâmico, não sendo observadas diferenças significativas nos hidrogramas, conforme pode ser observado no Apêndice G. Essa análise indicou que o uso do método de Puls não produziu diferenças no resultado da análise e por esse ser ligeiramente mais estável e rápido foi adotado como o método de simulação do deplecionamento.

Tabela 31 – Síntese metodológica da modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura

Modelagem paramétrica da abertura de brecha	
Modelo	HEC-RAS 5.0.7
Módulo	Bidimensional com solução das Equações de Águas Rasas (Saint Venant 2D)
Método de solução	Equações completas da quantidade de movimento (<i>full momentum equation</i>)
Representação do reservatório	Área de armazenamento (Curva cota-volume)
Estimativa dos hidrogramas defluentes	Método de <i>Puls</i> modificado
Gatilho para início da ruptura	5 segundos após o início de cada simulação. Critério estabelecido em termos práticos de aplicação do modelo.
Modelagem probabilística	
Parâmetros considerados como variáveis aleatórias	i) largura de fundo final; ii) cota de fundo, iii) declividade da parede lateral esquerda; iv) declividade da parede lateral direita e v) tempo de formação
Parâmetros não aleatórios	i) posição central da brecha, ii) coeficiente de descarga, iii) nível de água inicial e iv) Método de progressão da brecha
Aplicação do MMC	Rotina desenvolvida em Phytton
Número de repetições	8.000

O uso das equações completas da quantidade de movimento é uma tentativa de representar o escoamento da maneira mais precisa e refinada, uma vez que são considerados os componentes físicos do escoamento do fluxo. Apesar do modelo bidimensional não ser capaz de representar a componente vertical da aceleração do escoamento, ele representa bem a onda de ruptura de barragens (WANG *et al.* (2017)). A maior incerteza em relação às características hidráulicas do escoamento bidimensional, principalmente aquelas associadas à velocidade, é mais importante para a modelagem do primeiro trecho a jusante da estrutura, onde se verifica grande turbulência e formação de ondas de choque. Um modelo hidráulico tridimensional (3D) poderia representar melhor esses aspectos. Porém, as massivas iterações que demanda o MMC a partir de um modelo hidráulico 3D não seriam exequíveis no contexto da presente pesquisa, dado o grande esforço computacional demandando.

A aproximação da vazão defluente da brecha a partir da equação de soleira também é uma simplificação do modelo e representa uma fonte de incertezas, principalmente em relação ao coeficiente de descarga a ser adotado. Sabe-se que o coeficiente de descarga pode variar em função da carga hidráulica a jusante e a montante. O modelo adotado não admite essa variação, considerando um valor constante ao longo de toda a simulação. Sendo assim, se faz necessário adotar um valor médio para esse coeficiente, o que agrega incertezas aos resultados.

5.2 Descrição do estudo de caso

Os itens a seguir apresentam a descrição mais detalhada do estudo de caso selecionado, com a apresentação das características da barragem, da base topográfica e da área a jusante, o modo de falha escolhido e uma síntese dos resultados de estudos anteriores.

5.2.1 Características da barragem sob análise

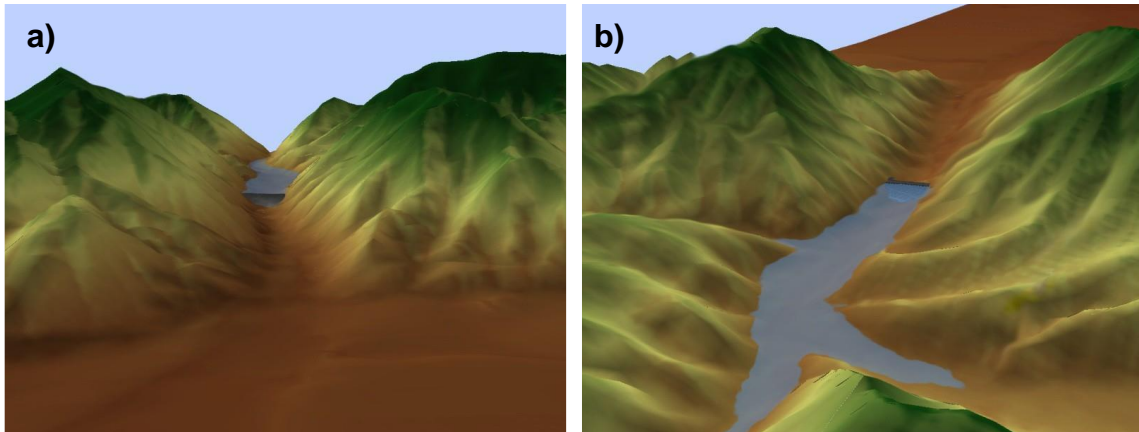
A barragem proposta para a análise no estudo de caso encontra-se projetada em terreno virtual caracterizado como uma região montanhosa, localizada a 3,5 km a montante de uma área urbana. A função principal da estrutura é o controle de cheias provocadas pelo degelo e pelo clima de monções. Além disso, o reservatório opera como um manancial de água e permite o desenvolvimento de atividades recreativas. A Figura 37 apresenta uma visão geral da estrutura e da topografia de entorno.

A barragem pode ser classificada como muito grande a partir dos critérios do CNRH (2012), com altura de 61 m (muito grande) e volume de $38 \times 10^6 \text{ m}^3$ (médio). A crista da barragem, posicionada na cota El. 272,00 m, possui 360 m de comprimento e 24 m de largura. O coeficiente de forma da barragem, estimado pela razão entre o comprimento da crista e a altura da barragem é igual a 5,90 e se classifica como uma barragem estreita. A inclinação dos taludes de montante e jusante são de 3H:1V. O aterro da barragem foi compactado por rolos compactadores pneumáticos e composto por um material homogêneo, caracterizado como areno-argiloso. Esse pode ser definido como de erodibilidade média. A resistência não drenada do aterro, selecionada para representar a tensão inicial de confinamento é superior a 478 kPa.

A fundação da barragem possui uma espessura de 3,60 m. Considerando o ponto mais baixo da cota do terreno natural na seção transversal do vale que abriga a barragem (El. 209,63 m), estima-se que o nível da rocha sã está posicionado na El. 206,03 m. A cota de fundo do reservatório encontra-se na El. 211,00 m. As Figuras 38 e 39 apresentam as seções típicas da barragem, onde é possível observar o perfil longitudinal e transversal da estrutura.

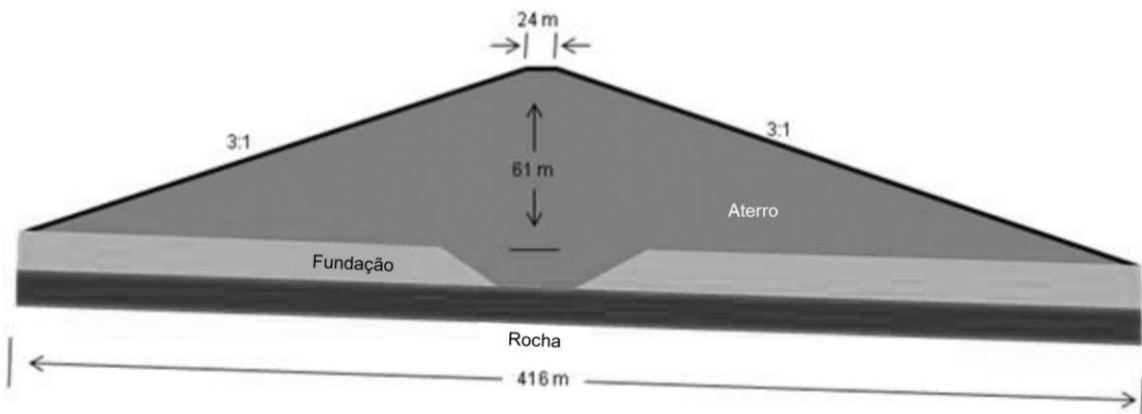
Figura 37 – Visão geral da barragem

(a) Vista frontal da barragem e vale a jusante. (b) Vista do reservatório e vale a jusante



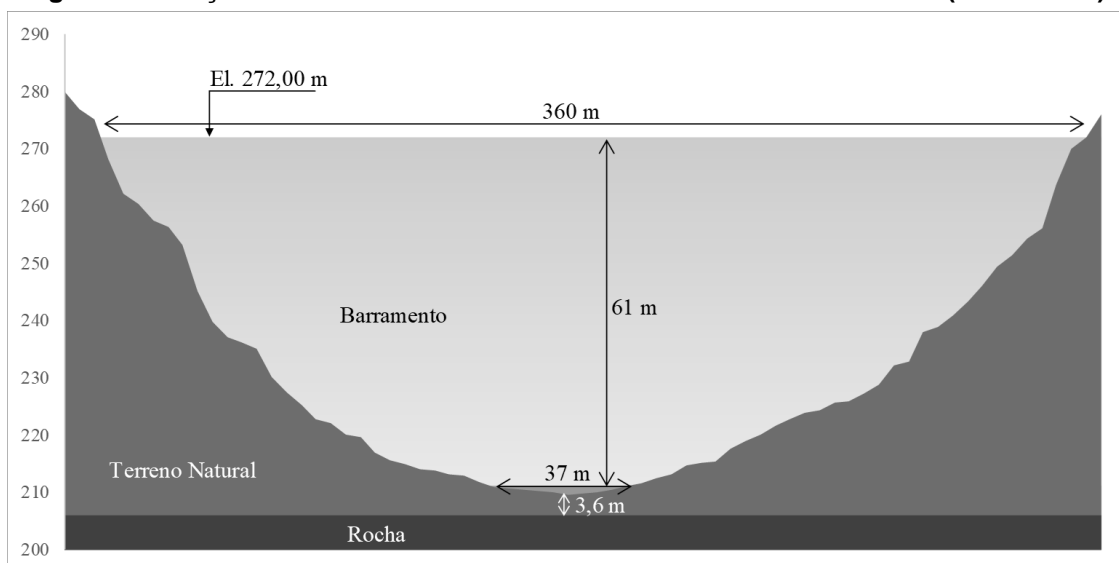
Fonte ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

Figura 38 – Seção longitudinal sem escala do barramento



Fonte ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

Figura 39 – Seção transversal do barramento extraída do MDT fornecido (sem escala)



Nas Tabelas 32 e 33 é apresentado um resumo característico da barragem e da fundação, com a apresentação de algumas cotas notáveis, dimensões e

características geotécnicas. A capacidade volumétrica do reservatório a montante da barragem é de mais de 38,28 milhões de metros cúbicos, considerado como uma classe de volume intermediário. O volume está distribuído ao longo de 61 m de profundidade e a curva cota-área-volume, que descreve essa relação, está apresentada na Figura 40.

Tabela 32 – Aspectos geométricos e geotécnicos do aterro

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Comprimento da crista	360 m	Ângulo de atrito efetivo/drenado	14°
Largura da crista	24 m	Resistência não drenada	43,09 + 0,175 σ'_{mc} kPa
Cota de crista	272 m	Velocidade de propagação da onda	152,4 m/s
Cota de fundação	211 m	Máximo módulo de cisalhamento	46.443 kPa
Declividade talude	3H:1V	Peso específico saturado	2.002 kg/m ³
Coesão efetiva/drenada	19,15 kPa	Permeabilidade	1,9 x 10 ⁻⁶ (cm/s)

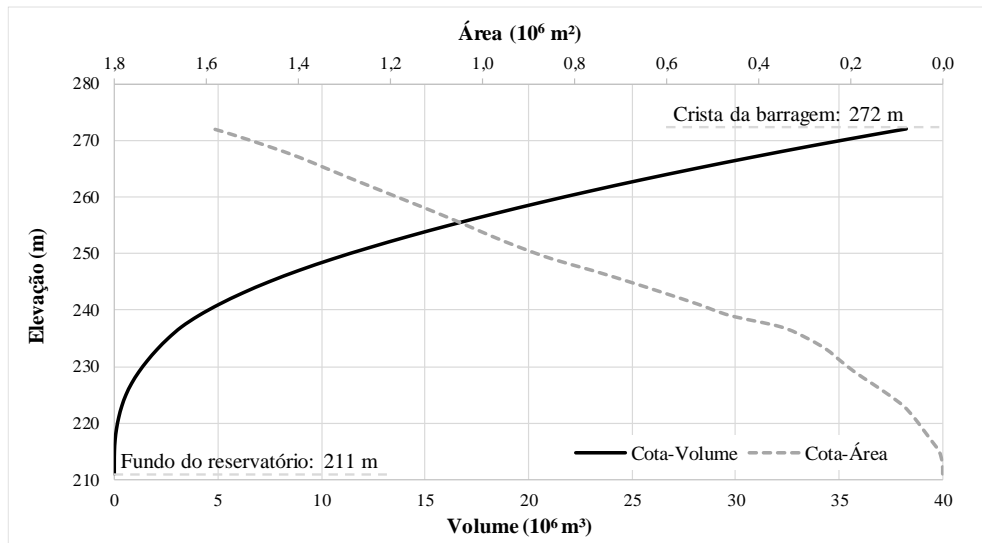
Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

Tabela 33 – Parâmetros geotécnicos fundação (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013)

Parâmetro	Valor	
	Base da barragem	Topo rochoso
Velocidade de propagação da onda (m/s)	167	185
Máximo módulo de cisalhamento (kPa)	6,75 x 10 ⁵	8,33 x 10 ⁶
Coeficiente de Poisson	0,25	0,25
Peso específico (kg/m ³)	2,242	2,402
Permeabilidade (cm/s)	9,5 x 10 ⁻⁷	9,5 x 10 ⁻⁷

Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

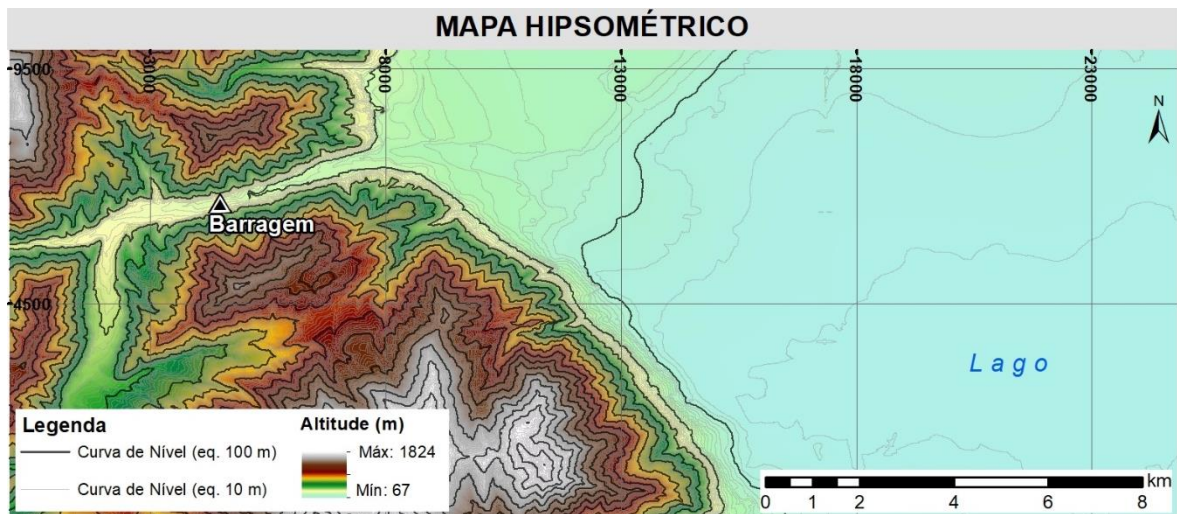
Figura 40 – Curva Cota-Área-Volume da barragem



5.2.2 Modelo Digital de Terreno (MDT)

As informações topográficas do vale a jusante da barragem foram fornecidas por meio de dois Modelos Digitais de Terreno (MDT) de resolução de 9,5 m (tamanho do lado do *grid* quadrático que apresenta a informação média de elevação da área). Um dos MDT corresponde ao terreno antes da construção da barragem, enquanto o outro representa o terreno com a projeção da barragem. O mapa hipsométrico da região de estudo, desenvolvido a partir do MDT que inclui a projeção da barragem está apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Mapa hipsométrico da região de estudo elaborado a partir do MDT fornecido



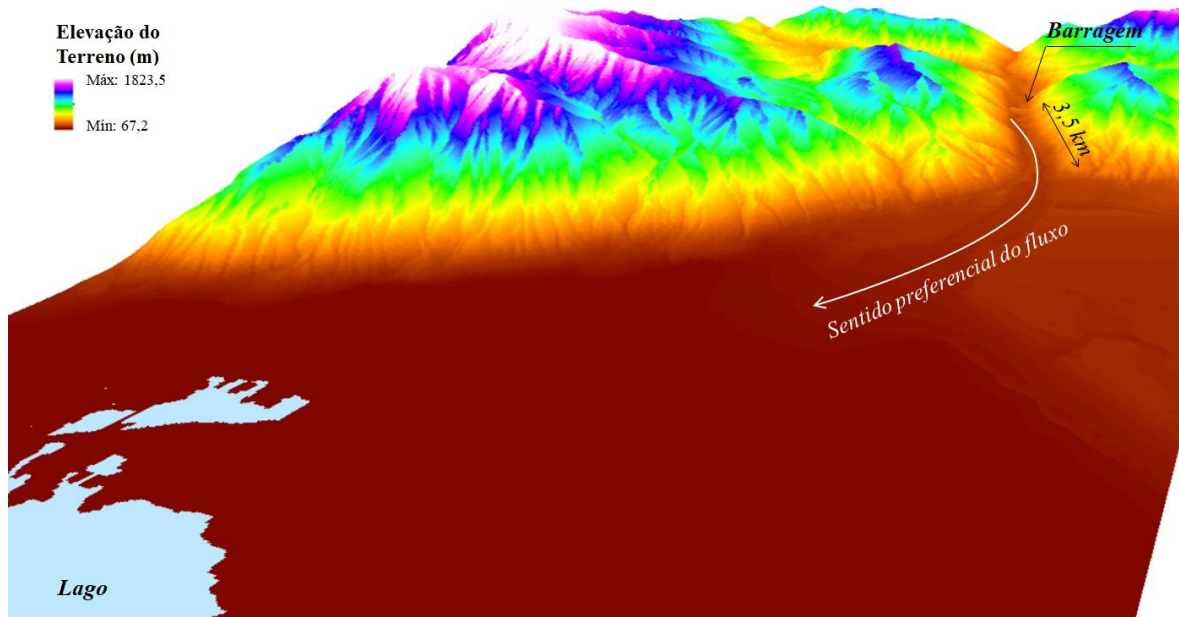
5.2.3 Características do vale a jusante

A área a jusante da barragem, definida para o estudo de propagação da onda de ruptura, se caracteriza por um primeiro trecho de vale encaixado, com extensão aproximada de 3,5 km, seguido por uma região de planície, ocupada em grande parte pela cidade de Hydropolis. Essa cidade fictícia apresenta uma parcela de sua malha urbana em volta de um lago, que representa um controle hidráulico bem definido para a parada da modelagem hidráulica. Esse ponto corresponde ao final da área representada pelo MDT.

Entre a barragem e a entrada do lago, o talvegue principal da área a jusante tem uma extensão aproximada de 15,3 km e apresenta uma declividade média de 1%. Observam-se trechos com declividade máxima igual a 11,65% e declividade mínima de 0,01%. A Figura 42 apresenta uma perspectiva do terreno a jusante da barragem, sendo possível observar as características de forma do vale a jusante.

A cobertura do solo no vale a jusante da barragem é diversificada e segue a classificação padrão *National Land Cover Dataset* (NLCD) do serviço geológico dos Estados Unidos. As principais classes de cobertura do solo observadas no vale a jusante compreendem a florestas residuais, arbustos e áreas desenvolvidas de baixa intensidade. A ocupação do solo na região a jusante da barragem é dividida, principalmente, em dois usos principais, a ocupação rural na região montanhosa e áreas residenciais na planície. Áreas comerciais, cultivos, espaços abertos, industriais e institucionais também são observados em fragmentos menores.

Figura 42 – Vista em perspectiva da área a jusante da barragem



A Figura 43 apresenta o mapa de cobertura e ocupação do solo no vale a jusante, elaborados a partir das bases fornecidas. Na Tabela 34 estão apresentadas as classes de cobertura do solo da classificação do NCLD e a interpretação realizada na presente análise. A associação das classes de cobertura do solo do NLCD a valores do parâmetro de resistência ao escoamento, representado pelo coeficiente de Manning, é realizada por diferentes referências. Essas estão apresentadas posteriormente, na etapa de construção do modelo hidráulico.

Figura 43 – Cobertura e uso do solo na área a jusante da barragem

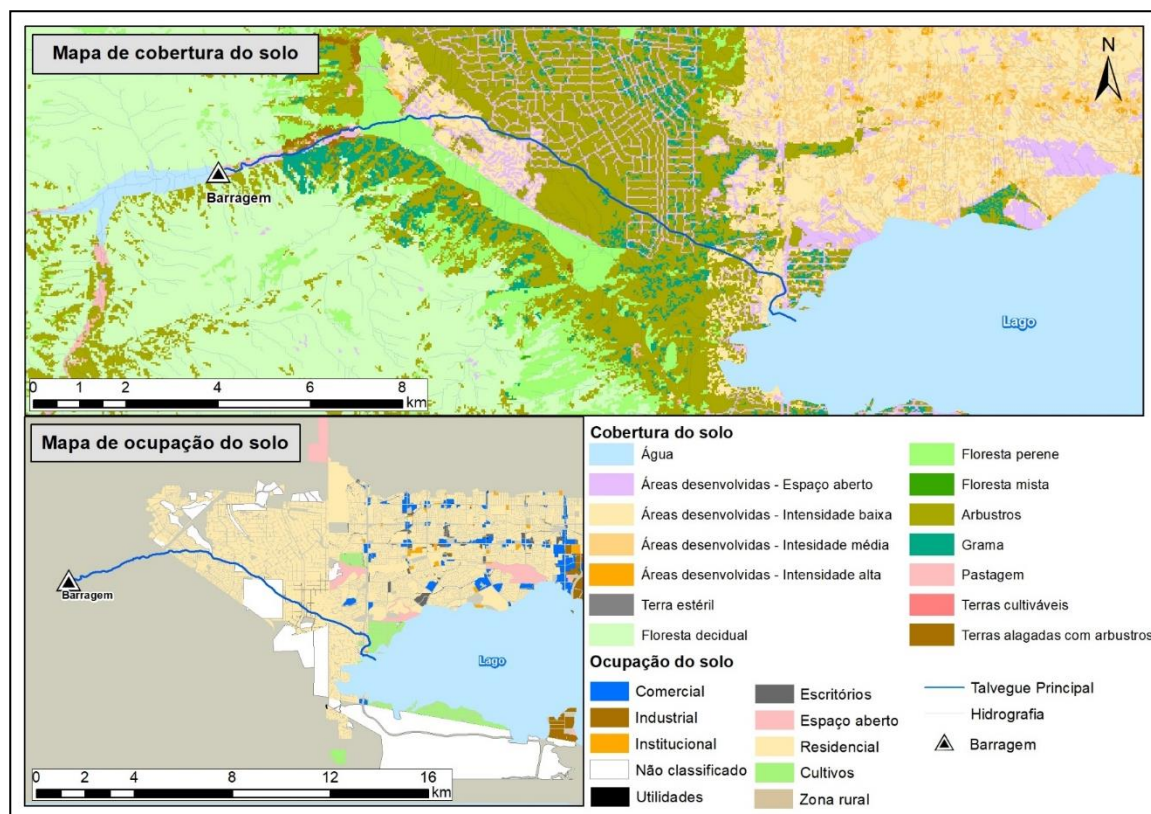


Tabela 34 – Classes de cobertura do solo no vale a jusante da barragem

Classificação do NLCD*	Descrição	Interpretação
11	<i>Open Water</i>	Águas abertas
21	<i>Developed-Open Space</i>	Áreas desenvolvidas - Espaços abertos
22	<i>Developed- Low Intensity</i>	Áreas desenvolvidas - Intensidade baixa
23	<i>Developed- Med. Intensity</i>	Áreas desenvolvidas - Intensidade média
24	<i>Developed- High Intensity</i>	Áreas desenvolvidas - Intensidade alta
31	<i>Barren Land</i>	Terra estéril
41	<i>Deciduous Forest</i>	Floresta decidual
42	<i>Evergreen Forest</i>	Floresta perene
43	<i>Mixed Forest</i>	Floresta mista
52	<i>Shrub/Scrub</i>	Arbustos
71	<i>Grassland/Herbaceous</i>	Gramma
81	<i>Pasture/Hay</i>	Pastagem
82	<i>Cultivated Cropland</i>	Terras cultiváveis
90	<i>Woody Wetlands</i>	Terras alagáveis com arbustos

*NLCD: *National Land Cover Database* (Banco de Dados de Cobertura do solo) definido pelo órgão de pesquisa geológica dos Estados Unidos (USGS)

5.2.4 Modo de falha hipotética

O modo de falha adotado para análise da ruptura hipotética da barragem foi o galgamento de origem operacional, sem associação de um evento de cheia extrema na bacia hidrográfica de contribuição. O nível de água do reservatório, considerado como gatilho para a ruptura corresponde à cota de coroamento da crista (El. 272,00 m).

Esse modo de falha foi sugerido pelos desenvolvedores do estudo de caso (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013). Optou-se por adotar o mesmo modo de falha no presente trabalho de modo a permitir a análise comparativa com os resultados apresentados em estudos anteriores.

5.3 Modelos de Distribuição de Probabilidade dos Parâmetros de Brecha

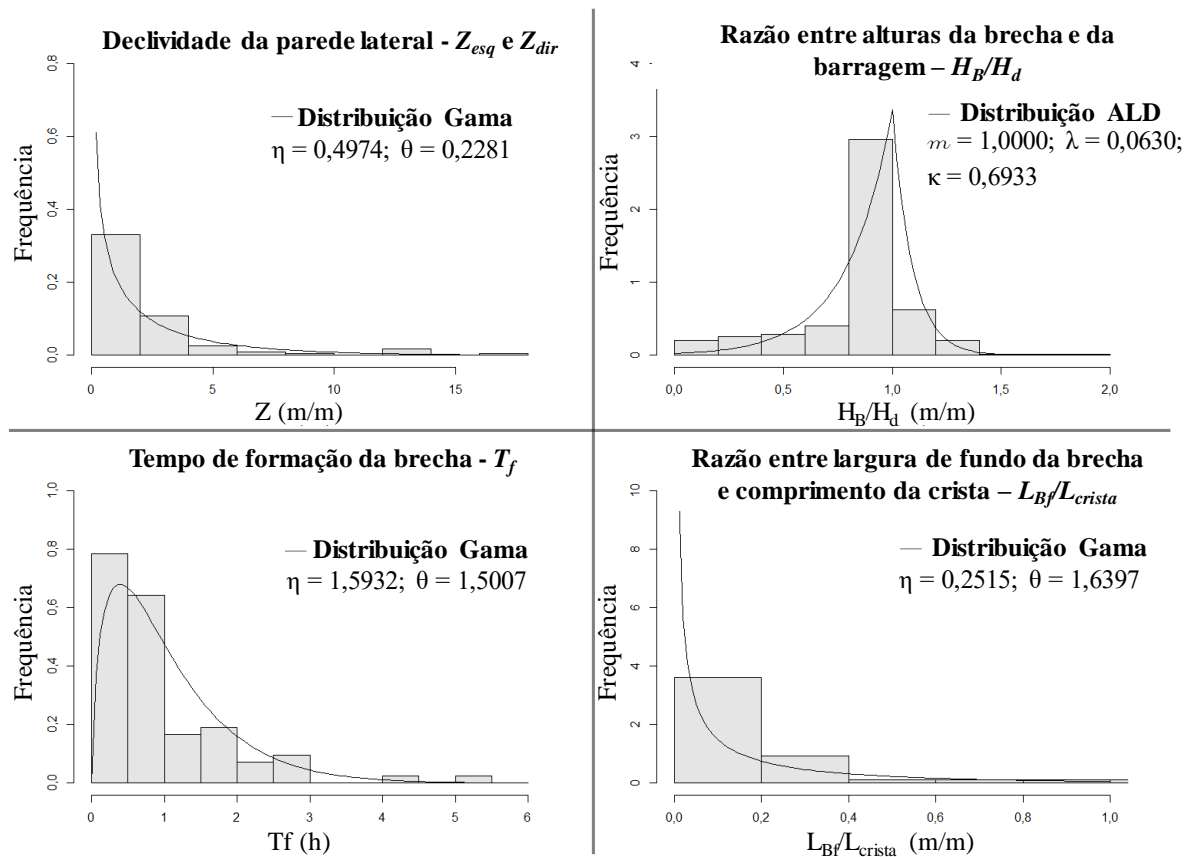
Os modelos de distribuição de probabilidade utilizados na etapa de amostragem aleatória dos parâmetros de brecha de ruptura foram definidos conforme apresentado no Capítulo 4. A Tabela 35 apresenta as características dos modelos de distribuição de probabilidade identificados e considerados como de melhor ajuste, utilizados na simulação a partir da rotina desenvolvida em Python. A Figura 44 apresenta a função densidade de probabilidade dos modelos em comparação com o histograma dos registros utilizados como referência para a definição dos modelos.

Tabela 35 – Modelos considerados como de “melhor” ajuste

Parâmetro	Modelo	Parâmetros	
		valores	descrição
$Z^{(1)}$	Gama	$\eta = 0,4974; \theta = 0,2281$	forma e taxa
H_B/H_d	ALD	$m = 1,0000; \lambda = 0,0630; \kappa = 0,6933$	posição, escala e assimetria
$T_f(h)$	Gama	$\eta = 1,5932; \theta = 1,5007$	forma e taxa
$L_{Bf}/L_{Crista}^{(2)}$	Gama	$\eta = 0,2515; \theta = 1,6397$	forma e taxa

⁽¹⁾Modelo definido para Galgamento; ⁽²⁾Modelo definido para barragens estreitas susceptíveis a ruptura por degelo

Figura 44 – Modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha



η = forma; θ = taxa; m = posição; λ = escala; κ = assimetria

Ressalta-se que, para definição dos parâmetros dos modelos distributivos adotados para o sorteio aleatório dos valores de largura de fundo e altura da brecha, foi necessário realizar o ajuste dimensional. Para o ajuste foram gerados os quantis da distribuição da variável adimensionalizada e depois multiplicou-se o valor sorteado pelo fator de adimensionalização, que no caso de L_{Bf}/L_{crista} foi o comprimento da crista (L_{crista}) e de H_B/H_d foi a altura da barragem (H_B). Ressalta-se que o parâmetro de entrada relativo à altura da brecha no modelo paramétrico adotado (HEC-RAS) corresponde à cota de fundo da brecha e esse parâmetro foi estabelecido subtraindo a cota de crista da barragem (El. 272,00 m) pela altura da brecha obtida no processo de amostragem.

5.4 Parâmetros de Brecha não Aleatórios

Além dos parâmetros de brecha de ruptura considerados como variáveis aleatórias na presente pesquisa, outros parâmetros de brecha precisam ser definidos no modelo paramétrico utilizado na modelagem da abertura da brecha. São eles: método de progressão da brecha, nível de água inicial no reservatório, ponto central da brecha e

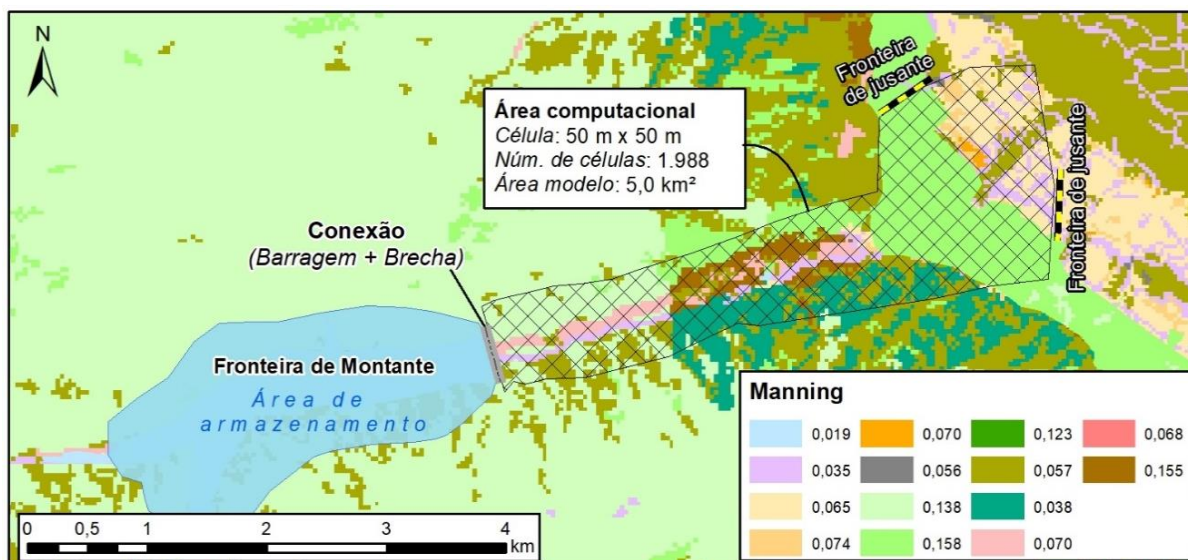
o coeficiente de descarga da brecha de ruptura. Esses parâmetros tiveram valores invariáveis em todas as repetições realizadas.

O método de progressão da brecha utilizado foi o senoidal, conforme sugere COLORADO (2020). Ressalta-se que uma análise de sensibilidade a respeito do método de progressão de brecha foi desenvolvida. Observou-se, em média, que o desenvolvimento de brechas senoidais resultam em maiores valores de vazão de pico do hidrograma. Porém, em razão do grande número de repetições realizadas no MMC, a diferença observada apresenta apenas significância estatística, sem sentido físico e, portanto, optou-se por adotar o método de progressão senoidal, que segundo COLORADO (2020) descreve melhor problema. O nível de água inicial foi considerado igual à cota de crista da barragem (El. 272,00 m), conforme indicado por ZENZ AND GOLDGRUBER (2013) nas diretrizes do desenvolvimento do estudo de caso. O ponto central da brecha foi coincidente ao ponto central da seção transversal da barragem, representado pelo ponto médio da crista da barragem (180,00 m do *offset* da crista com o terreno natural). O coeficiente de descarga da brecha de ruptura foi definido como 1,705. Valor típico de soleiras vertentes espessas (USACE, 2016).

5.5 Construção do Modelo Hidráulico

No processo de simulação de Monte Carlo, realizado para a estimativa dos hidrogramas defluentes da ruptura da barragem, foi utilizado um modelo hidráulico truncado. Esse modelo foi definido para tornar o processamento das simulações mais rápido, de modo a reduzir o tempo total de processamento do MMC. O modelo foi truncado em uma seção localizada a, aproximadamente, 5 km a jusante da barragem. Esse ponto está localizado a jusante da transição da seção do vale e se caracteriza como um controle hidráulico estabelecido pelo alargamento da seção. Com base em testes, verificou-se que a distância de 1,5 km da seção de controle foi suficiente para eliminar possíveis interferências da condição de contorno de jusante nos hidrogramas defluentes da ruptura da barragem. A Figura 45 apresenta um arranjo geral do modelo geométrico adotado, o qual apresenta os limites geográficos, as condições de contorno, a malha computacional e a distribuição dos valores do coeficiente de Manning adotados no modelo.

Figura 45 – Arranjo geral do modelo geométrico utilizado na simulação da ruptura hipotética da barragem proposta no estudo de caso



A Tabela 36 apresenta uma síntese descritiva do modelo hidráulico concebido para as simulações. Esse resumo indica as características da malha computacional, as condições de contorno e parâmetros da modelagem, além das opções de cálculo. As configurações adotadas tiveram como base as recomendações do manual do modelo computacional adotado (ASCE, 2016). As tolerâncias aos erros e o fator de ponderação adotados para o cômputo do modelo descrevem quão refinados serão os cálculos no modelo. Modelos mais restritivos tendem a apresentar resultados mais precisos, porém podem levar a instabilidades de cálculo. Considerando a complexidade em estimar um hidrograma defluente da ruptura de uma barragem, optou-se por adotar os critérios mais permissivos do modelo, a fim de facilitar sua convergência. Assim optou-se por dar preferência a modelos mais estáveis.

Tabela 36 – Resumo do modelo hidráulico concebido para modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura

Malha computacional	
Células	Quadráticas
Dimensão típica	50 m x 50 m
Número de células	1.988
Área computacional	5,0 km ²
Condições de contorno	Montante: Área de armazenamento representada pela curva cota-volume; Jusante: Profundidade normal associada a declividade de 1%
Coeficiente de rugosidade	Média aritmética dos valores adotados pelos autores convidados a desenvolver o estudo de caso proposto por ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

continua

Opções de Cálculo e tolerância	
Erro máximo na superfície da linha de água e volume	0,06 m
Fator de ponderação implícita (coeficiente Teta - θ)	1,00
Máximo de iterações para a definição da solução	40
Janela de cálculo	5 horas
Intervalo computacional	Ajuste automático baseado no número de Courant (limites entre 0,5 e 1,0)
Intervalo base	1,0 s
Intervalo máximo	64,0 s (seis duplicações)
Intervalo mínimo	1,0 s (nenhuma redução)

A definição do tamanho das células do modelo foi realizada com base em uma análise de sensibilidade. Avaliou-se 6 cenários com células variando entre 9,5 m a 60 m. Observou-se que a variação nos resultados entre os testes com células entre 9,5 m e 50 m foram mínimos, sendo a maior variação igual a 0,35%. A variação a partir de células com 60 m já foi um pouco maior, acima de 1%. Por outro lado, o tempo de processamento do modelo com células de 50 m foi 99% inferior ao tempo gasto com o modelo de células de 9,5 m, o que justificou a escolha por essa configuração. Detalhes adicionais sobre essa análise estão apresentados no Apêndice G.

Os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning, associados a cada um dos tipos de cobertura do solo identificados a jusante da barragem, estão apresentados na Tabela 37. Na Figura 45, apresentada anteriormente, é possível observar a distribuição desses valores pelo vale a jusante.

Tabela 37 – Coeficientes de rugosidade de Manning adotados na modelagem

Class. NLCD	Descrição	Interpretação	n
11	<i>Open Water</i>	Águas abertas	0,019
21	<i>Developed-Open Space</i>	Áreas desenvolvidas - Espaços abertos	0,035
22	<i>Developed- Low Intensity</i>	Áreas desenvolvidas - Intensidade baixa	0,065
23	<i>Developed- Med. Intensity</i>	Áreas desenvolvidas - Intensidade média	0,074
24	<i>Developed- High Intensity</i>	Áreas desenvolvidas - Intensidade alta	0,070
31	<i>Barren Land</i>	Terra estéril	0,056
41	<i>Deciduous Forest</i>	Floresta decidual	0,138
42	<i>Evergreen Forest</i>	Floresta perene	0,158
43	<i>Mixed Forest</i>	Floresta mista	0,123
52	<i>Shrub/Scrub</i>	Arbustros	0,057
71	<i>Grassland/Herbaceous</i>	Grama	0,038
81	<i>Pasture/Hay</i>	Pastagem	0,070
82	<i>Cultivated Cropland</i>	Terras cultiváveis	0,068
90	<i>Woody Wetlands</i>	Terras alagáveis com arbustros	0,155

5.6 Resultados das Simulações Probabilísticas dos Hidrogramas

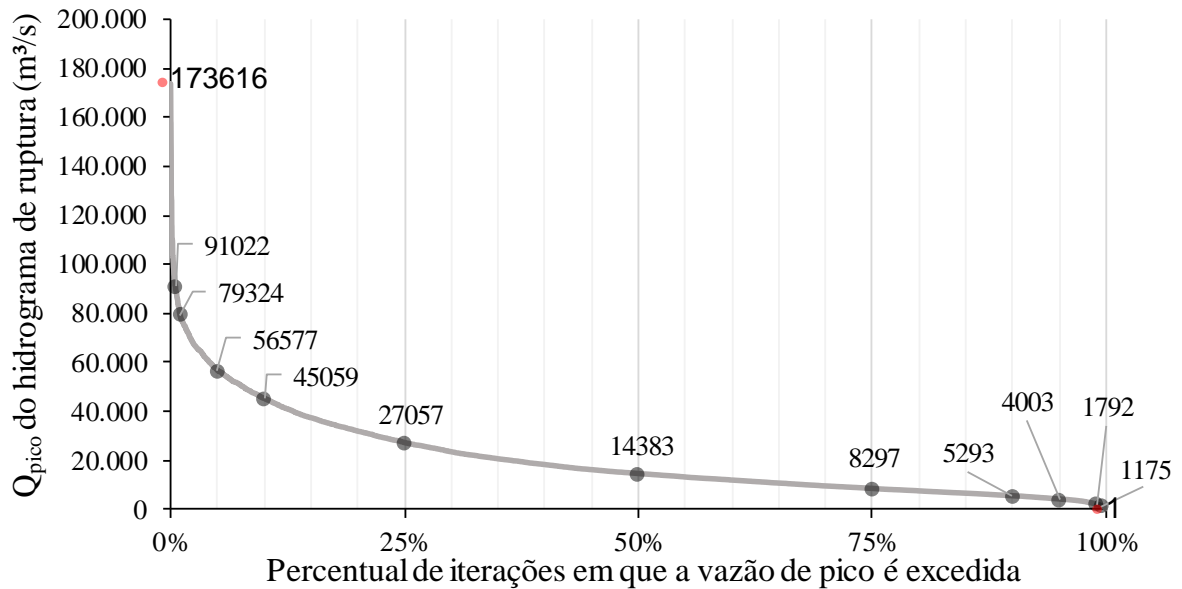
Os resultados do MMC aplicado à estimativa dos hidrogramas de ruptura a partir da amostragem aleatória dos parâmetros de brecha estão apresentados e analisados a seguir. A inferência estatística da resposta do processo de modelagem, aqui selecionada como a vazão de pico do hidrograma resultante da simulação da ruptura, representa o principal resultado da análise. Essa inferência permite descrever probabilisticamente os resultados da modelagem que variam em função dos parâmetros de entrada considerando como variáveis aleatórias, que no presente caso correspondem aos parâmetros de brecha.

Em uma modelagem probabilística realizada a partir do MMC, espera-se que a amostragem dos parâmetros siga as características dos modelos teóricos ajustados e seja aleatória, sem a presença de viés. Além disso, espera-se que o número de repetições consideradas seja suficiente para se observar a convergência estatística dos resultados. Por ter sido utilizada uma rotina específica para o sorteio dos parâmetros, foi avaliado se essas premissas foram atendidas. No processo de amostragem dos parâmetros observou-se um conjunto de valores totalmente aleatórios, sem a presença de viés ou tendência, sendo o histograma dos mesmos bastante aderentes a função densidade de probabilidade dos modelos de distribuição de probabilidade adotados. Maiores detalhes dessa análise estão apresentados no Apêndice H.

5.6.1 Análise de incertezas na vazão de pico dos hidrogramas de ruptura

A análise de incertezas na vazão de pico dos hidrogramas de ruptura foi realizada a partir da inferência estatística do conjunto de respostas do sistema. Visto o número considerável de observações geradas, é possível inferir as probabilidades de superação dos valores de resposta do sistema a partir da avaliação da curva de frequência dos resultados obtidos. Nesse caso, estabelece-se um diagrama de frequências relativas acumuladas, que descreve as frequências, ou probabilidades de superação, para os valores ordenados da variável de resposta. A Figura 46 apresenta a curva de frequências dos resultados obtidos.

Figura 46 – Curva de frequência das vazões de pico dos hidrogramas resultantes do MMC

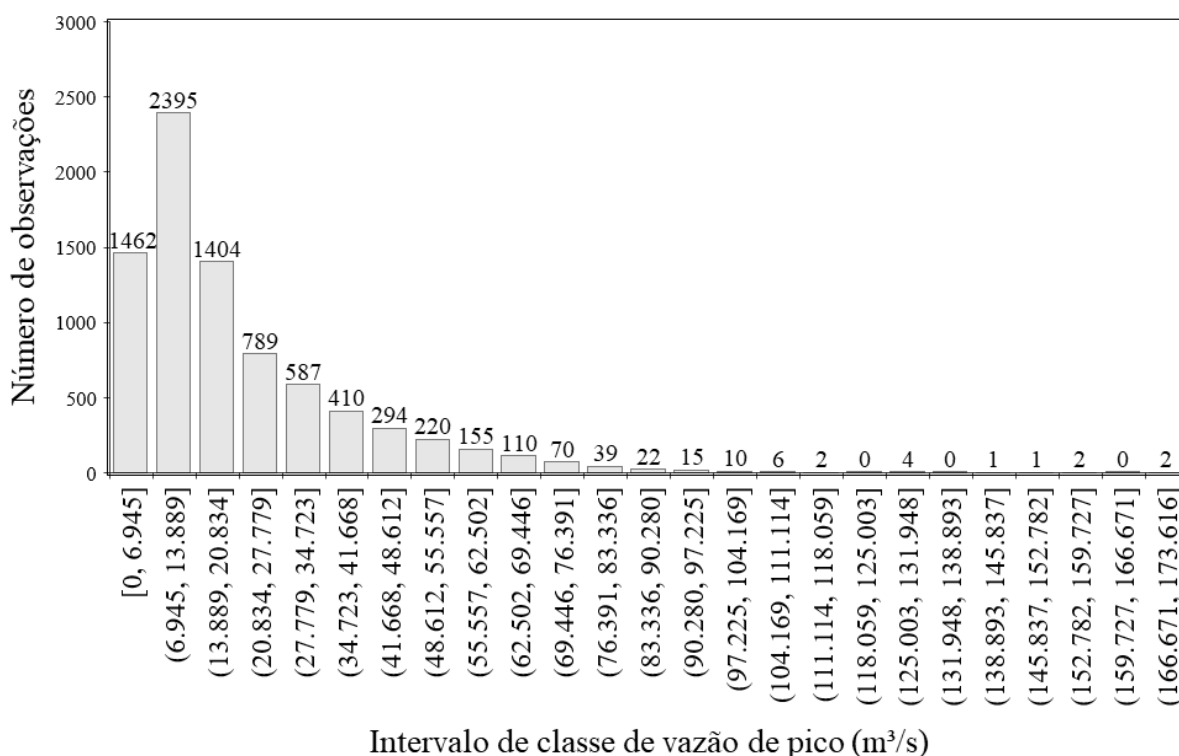


P (Q_{pico} > q)	0,5%	1,0%	5,0%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%	99,5%
Q_{pico} (m³/s)	91.022	79.324	56.577	45.059	27.057	14.383	8.297	5.293	4.003	1.792	1.175

Considerando as incertezas envolvidas na estimativa dos parâmetros de brecha de ruptura, é possível inferir que a probabilidade de gerar um hidrograma de ruptura com uma vazão de pico maior que, por exemplo, 14.383 m³/s é de 50%. As chances de observar hidrogramas com vazões superiores a 91.022 m³/s e 1.175 m³/s são iguais a 0,5% e 99,5%, respectivamente. O valor máximo observado foi igual a 173.616 m³/s e o mínimo foi inferior a 1,00 m³/s.

O histograma de frequências dos resultados também representa uma maneira de se observar a distribuição de probabilidade da amostra. A Figura 47 apresenta o histograma construído para a amostra de resultados da modelagem, onde é possível identificar as classes de valores com maiores densidades de observações. No presente caso, observa-se que as três primeiras classes de valores, definidas no intervalo entre 0 e 20.834 m³/s são a com maior número de observações, ou seja, maior frequência de valores, que nesse caso representam 66% dos valores observados. Observa-se, a partir do histograma, uma distribuição assimétrica dos valores, que consiste em um maior número de classes a direita com número reduzido de observações.

Figura 47 – Histograma das vazão de pico dos hidrogramas resultantes do MMC



5.6.2 Esforço computacional

Na presente pesquisa, foram necessárias 60 horas e 23 minutos para a execução das 8.000 iterações realizadas. O tempo médio de cada realização foi de 27,2 segundos. Utilizou-se para o cômputo do modelo um computador com processador Intel® Core™ i7-8550U CPU @ 1.80GHz-1.99 GHz, com memória RAM de 8,00 GB (utilizável: 7,88 GB), Windows 10 64bits e placa de vídeo GeForce MX 150 4096 MB GDDR5.

Ressalta-se que, conforme observado no Apêndice G, 4.000 repetições já seriam suficientes para se observar a estabilidade nos resultados do MMC. Caso esse número de repetições tivesse sido adotado, o tempo de cômputo do modelo sofreria uma redução considerável, da ordem de 50%.

5.7 Discussão dos Resultados da Análise Probabilística dos Hidrogramas

Nesse item está apresentada uma análise crítica dos resultados obtidos, organizada em tópicos. Primeiramente, é realizada uma análise comparativa dos resultados com aqueles obtidos por modelos empíricos. Na sequência discute-se sobre a correlação entre cada um dos parâmetros de brecha e a vazão de pico, identificando aquele que mais influencia a resposta do sistema. Discute-se também aspectos relacionados à

definição dos hidrogramas completos, sobre a taxa de erosão das brechas amostradas e a influência dos modelos de distribuição de probabilidade adotados para representar os parâmetros de brecha. Por fim, compara-se os resultados obtidos com estudos anteriores e discute-se sobre a propagação dos hidrogramas probabilísticos.

5.7.1 Análise comparativa com abordagens determinísticas

Usualmente, observa-se nas aplicações práticas de estudos de ruptura hipotética de barragens o uso de análises determinísticas baseadas no uso de modelos empíricos de previsão de brecha. Dado sua relevância, considera-se interessante comparar os resultados obtidos na análise probabilística com aqueles associados a uma análise determinística baseada na aplicação de modelos de previsão de brecha.

Foram avaliados cenários com a formação de brechas estimadas por diferentes modelos empíricos de previsão e um cenário considerando a ruptura completa e instantânea do maciço definida deterministicamente como “pior cenário”. Os parâmetros de brecha obtidos estão apresentados na Tabela 38 e os resultados da vazão de pico do hidrograma defluente das brechas estimadas estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 38 – Brechas definidas por distintos modelos empíricos para a barragem em análise

Modelo	L_{Bf} (m)	Z* (m/m)	El. fundo (m)	T_f (h)
FROEHLICH (2016)	65,38	1,00	211,00	0,54
XU E ZHANG (2009)	80,22	1,01	211,00	1,76
FROEHLICH (2008)	49,47	1,00	211,00	0,57
FROEHLICH (1995)	61,79	1,40	211,00	0,66
VON THUN & GILLETTE (1990)	146,40	0,50	211,00	0,80
MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984)	11,57	0,50	211,00	1,99
Cenário de ruptura instantânea	180,00	1,31; 1,26	206,03	0,05

*parede esquerda e direita

Observa-se que as brechas de ruptura provenientes da aplicação dos modelos empíricos de previsão apresentam resultados distintos. O modelo de VON THUN & GILLETTE (1990) apresenta uma largura de brecha consideravelmente maior do que os demais, enquanto o modelo de MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984) apresenta uma brecha com largura consideravelmente inferior às outras. Em relação à declividade da parede lateral, o modelo de FROEHLICH (1995) apresenta brechas com paredes mais inclinadas, enquanto os modelos de VON THUN & GILLETTE

(1990) e MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984) apresentam brechas menos inclinadas e os demais indicam a declividade de 1H:1V. Os modelos empíricos recomendam, como premissa, a definição da altura da brecha igual à altura da barragem e assim a cota de fundo estabelecida para as brechas foram as mesmas. Em relação ao tempo de formação, os modelos de XU & ZHANG (2009) e MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984) apresentam os maiores tempos de formação da brecha, enquanto os modelos de FROEHLICH (2016, 2008 e 1995) indicam a necessidade de menores tempos para a abertura das brechas.

O cenário de ruptura instantânea demonstra parâmetros de brecha extremos, indicando a maior largura de fundo e profundidade de brecha, paredes mais inclinadas e o menor tempo de formação da brecha. Em teoria, considera-se esse cenário como o mais crítico possível de se construir de maneira determinística.

Tabela 39 – Probabilidade de excedência da vazão de pico dos hidrograma associados à ruptura com brechas estimadas por diferentes equações de previsão

Modelo	Vazão de pico – q_p (m³/s)	P ($Q_p > q_p$)
FROEHLICH (2016)	35.316	16,53%
XU & ZHANG (2009)	15.004	47,75%
FROEHLICH (2008)	29.699	22,05%
FROEHLICH (1995)	28.383	23,50%
VON THUN & GILLETTE (1990)	43.384	10,94%
MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984)	7.997	76,24%
Cenário de ruptura instantânea	150.161	0,05%

A maior probabilidade de excedência da vazão de pico observada, entre os modelos testados, foi associada à aplicação do modelo de MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984), que apresenta o maior tempo para formação da brecha. Além disso, esse modelo estimou a menor largura de fundo de brecha entre aqueles testados, o que também contribui para essa observação. A menor probabilidade de excedência da vazão de pico entre os modelos testados foi verificada na aplicação do modelo de VON THUN & GILLETTE (1990), que estimou uma largura de fundo consideravelmente superior aos demais. O modelo de XU & ZHANG (2009) apresentou a segunda maior probabilidade de excedência da vazão de pico do hidrograma. A brecha estimada por esse modelo apresentou a segunda maior largura de fundo, porém indicou, também, o segundo maior tempo de formação, o que pode

justificar a segunda menor vazão de pico observada, reforçando o peso do tempo de formação de brecha na estimativa do pico de vazão do hidrograma.

A maior parte dos modelos testados apresentam resultados com probabilidade de excedência inferior a 25%. Apenas o modelo apresentado por MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984) apresentou probabilidade de excedência da vazão de pico acima dos 50%. A probabilidade de excedência da vazão de pico nesse caso foi considerada grande (76,24%). De modo geral, observa-se que os modelos empíricos de previsão de brecha apresentam resultados considerados conservadores se comparados com os obtidos da análise probabilística. Apenas uma pequena parcela de configurações de brecha ocasionou cenários mais críticos de ruptura em termos de vazão de pico obtidas na maioria dos modelos.

A altura de brecha considerada nos modelos pode ser um dos aspectos que justificam o conservadorismo observado. Dois podem ser os pontos discutidos, i) limitação do modelo de distribuição de probabilidade em representar a amostra referente à altura de brecha e ii) possível premissa conservadora relativa à consideração da brecha de ruptura sempre igual à altura da barragem. O modelo de distribuição utilizado na análise probabilística apresentou dificuldades em representar a densidade de observações de rupturas com altura de brecha igual à altura da barragem, o que pode ter reduzido o número de repetições com altura de brecha igual à altura da barragem. Nos registros históricos analisados, observou-se a existência de uma grande parcela de rupturas que não atingem a cota de fundação da barragem e, conseqüentemente, defluem menor volume, apresentam menor carga hidráulica a montante e apresentam menores vazões de pico para os hidrogramas de ruptura. Sendo assim, considerar sempre a altura de brecha igual à altura da barragem pode ser considerado uma premissa conservadora indicada nos modelos empíricos de previsão de brecha.

O cenário de ruptura instantânea demonstrou uma probabilidade de excedência muito baixa, indicando ser um cenário muito extremo, quando comparado com os resultados da modelagem probabilística. A probabilidade de excedência da vazão de pico associada a esse cenário é da ordem de 10^{-4} , valor próximo àqueles considerados como critério das vazões de projeto de estruturas de vertimento em grandes barragens. A possibilidade de definir a probabilidade de excedência desse cenário é

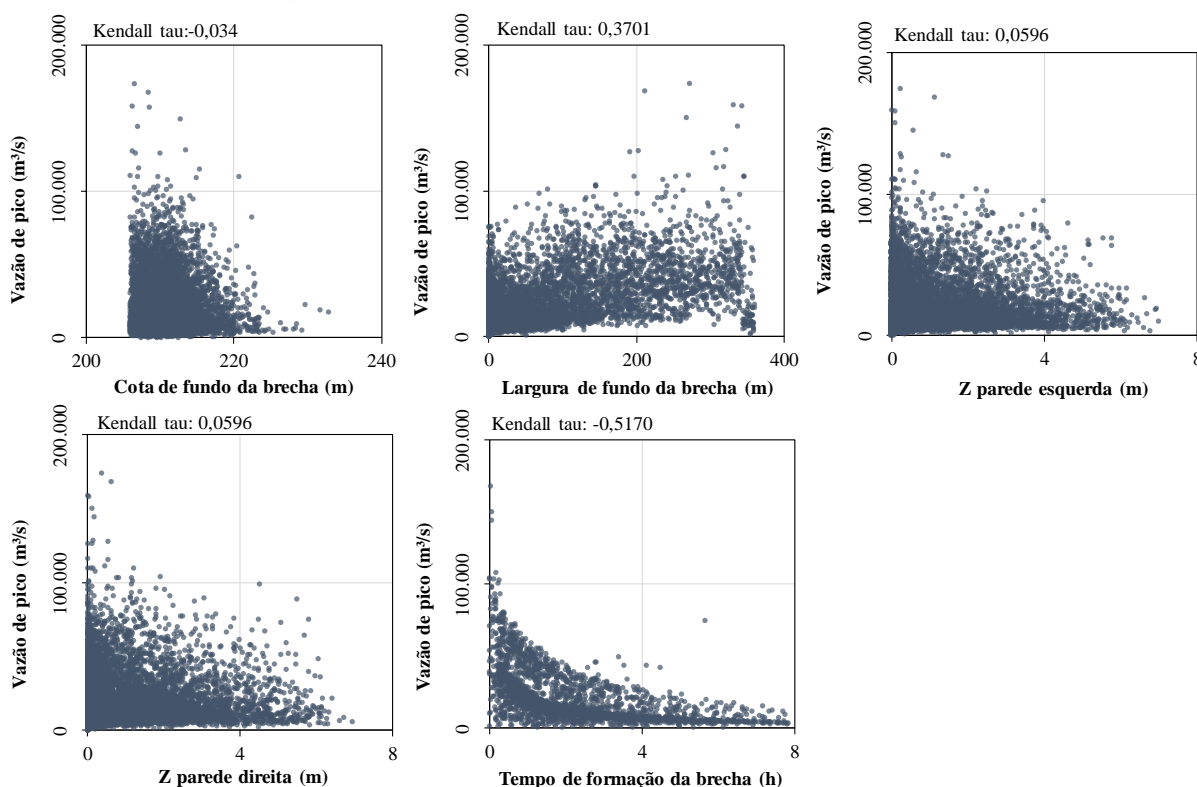
considerada como uma das vantagens da modelagem probabilística, que permite estabelecer uma probabilidade de um cenário considerado crítico, permitindo estimar o risco associado.

5.7.2 Correlação entre parâmetros de brecha de ruptura e vazão de pico do hidrograma

Conforme apresentado no item 3.4.1 de revisão bibliográfica, a análise de correlação entre os parâmetros de brecha de ruptura e a vazão de pico do hidrograma defluente já foi realizada por alguns autores no desenvolvimento de análises de sensibilidade. O tempo de formação da brecha é o parâmetro mais citado como interferente para os resultados, seguido da largura da brecha. A fim de verificar se a tendência apresentada na literatura é também observada no presente estudo, realizou-se uma análise de dispersão dos valores de vazão de pico e os diferentes valores dos parâmetros de brecha, com o cálculo dos respectivos coeficientes de correlação de Kendall (τ). A Figura 48 apresenta o gráfico de dispersão entre as vazões de pico dos hidrogramas de ruptura e os parâmetros de brecha.

Os gráficos de correlação demonstram que a vazão de pico tem uma correlação negativa com a cota de fundo e o tempo de formação da brecha. Já a correlação com a largura de fundo e declividade da parede lateral é positiva. Assim como indicado na revisão de literatura, observou-se que o tempo de formação da brecha foi o parâmetro que apresentou maior coeficiente de correlação, seguido pela largura de fundo. Ressalta-se que o coeficiente de correlação por si só não representa uma relação de causa e efeito, porém, como os parâmetros de brecha são dados de entrada para os modelos de estimativa da vazão de pico, entende-se que a correlação apresentada indica que as vazões de pico são mais sensíveis a esses parâmetros.

Figura 48 – Correlação entre vazões de pico dos hidrogramas e os parâmetros de brecha



5.7.3 Hidrogramas completos

Além da vazão de pico, parâmetro utilizado para a análise de incerteza, outros parâmetros também caracterizam os hidrogramas de ruptura, principalmente aqueles relacionados a sua forma, como os tempos de base, ascensão e recessão, bem como o volume defluente. A forma do hidrograma sofre influência de diversos parâmetros, sendo o tempo de formação um dos mais influentes. No caso de um reservatório de armazenamento de água, o volume defluente é influenciado pela cota de fundo da brecha, uma vez que apenas o volume disponível acima dessa cota é desprendido do reservatório em caso de ruptura. Assim, quanto maior a elevação de fundo da brecha, maior o volume retido e menor é aquele liberado.

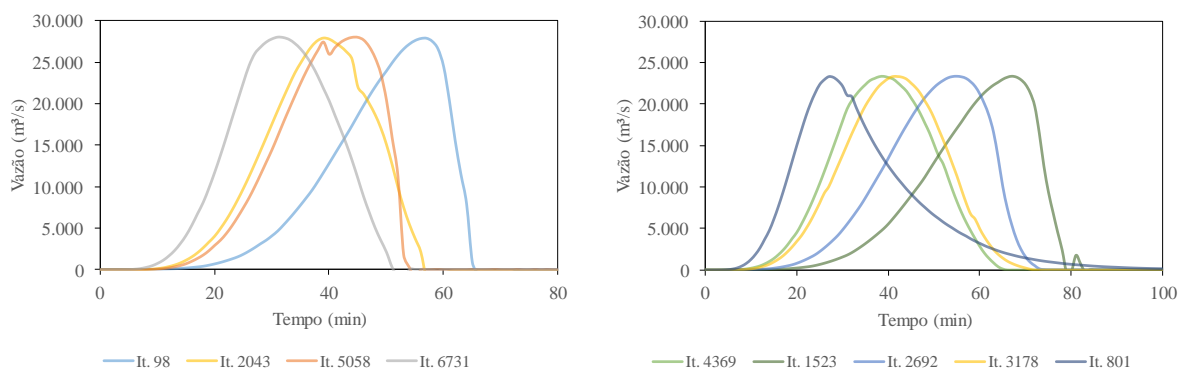
Em uma modelagem probabilística de sistemas não lineares, como é caso das rupturas de barragens, é comum obter a mesma resposta, ou respostas muito próximas, a partir de distintas e, às vezes numerosas, combinações dos parâmetros considerados como variáveis aleatórias. Essa propriedade é definida como equifinalidade e tem origem na teoria geral dos sistemas proposta por BERTALANFFY (1968). No presente caso, foi possível observar no conjunto de respostas do sistema iterações distintas que geraram a mesma vazão de pico ou valores muito próximos,

com variação da ordem de 5 m³/s, por exemplo. Esses casos apresentam a mesma probabilidade de excedência relacionada à vazão de pico, porém os hidrogramas resultantes das apresentam outras características que se diferem dos demais, como pode ser observado nos exemplos apresentados na Figura 49.

Os exemplos apresentados demonstram que, para a mesma vazão de pico ou para valores muito próximos, foram gerados hidrogramas com diferentes formas e volumes defluentes. Ressalta-se que a repetição de valores da resposta do sistema não foi algo observado com muita frequência no conjunto de respostas do sistema, mas observam-se alguns blocos de valores com comportamento similar ao exemplificado.

O aspecto demonstrado nos exemplos indica que utilizar apenas a informação relativa à vazão de pico para construir os hidrogramas completos pode não representar as demais grandezas dos hidrogramas que influenciam nos impactos de inundação a jusante. Além disso, pequenas variações nos valores selecionados podem refletir em mudanças significativas na definição dos hidrogramas completos. Dessa forma, entende-se que para a definição dos hidrogramas de ruptura completos é necessário realizar uma análise conjunta com outras variáveis de resposta do sistema, como por exemplo, o tempo de pico do hidrograma ou o volume defluente. Esses são considerados os principais parâmetros que afetam os efeitos de inundação a jusante. A vazão de pico e o volume dos hidrogramas são os aspectos mais importantes para a definição das profundidade e velocidades máximas de inundação. Já o tempo de pico da onda é o fator de maior influência no tempo de chegada da inundação, enquanto o tempo de base influencia em sua duração. Essas características são consideradas as principais informações da onda de ruptura a ser considerada em um estudo de ruptura hipotética de barragens.

Figura 49 – Avaliação dos hidrogramas de ruptura gerados a partir de diferentes iterações que apresentam mesma probabilidade de excedência da vazão de pico



Iteração	Hidrograma				Brecha				
	Q _{pico} (m ³ /s)	t _{pico} (min)	t _{base} (min)	Vol. (Mm ³)	L _{Bf} (m)	EI _{-fundo} (m)	Z esq.	Z dir.	T _f (h)
98	27.974	62	64	38,276	134,18	209,04	0,64	1,38	2,12
5058	27.972	50	55	38,276	82,52	209,22	2,11	2,80	1,30
6731	27.970	37	49	38,276	49,34	207,32	0,17	0,16	0,67
2043	27.968	45	52	38,276	49,17	206,48	0,01	2,20	0,97
4369	23.360	45	61	38,276	39,97	211,86	1,31	0,13	0,88
2692	23.357	61	70	38,276	82,39	212,76	3,88	0,01	1,68
801	23.357	33	95	38,268	0,59	215,03	0,35	2,25	0,54
3178	23.357	47	68	38,276	0,06	209,58	0,28	4,59	0,99
1523	23.356	73	78	38,276	144,38	210,33	1,81	0,35	2,70

A definição dos hidrogramas de ruptura completos relacionados a diferentes probabilidades de excedência foi realizada, na presente avaliação, a partir de uma classificação personalizada, que considera primeiro a vazão de pico em ordem decrescente e em caso de repetição de valores avalia também os tempos de base e pico da vazão além do volume defluente. Dessa forma, quando houve repetição dos valores de vazão de pico, foram considerados na ordenação, de maneira hierárquica, aqueles que apresentaram os menores tempos base, em caso de nova repetição nos tempos de base, foram considerados na ordenação os hidrogramas com menores tempos de pico, por fim, quando houve repetição de todos esses valores considerou-se na ordenação os hidrogramas com maiores volumes defluentes. A Figura 50 apresenta os hidrogramas completos referentes às diferentes probabilidades de excedência consideradas e a Tabela 40 apresenta um resumo de informações dos hidrogramas, caracterizados pela vazão de pico, tempo de pico, tempo de base e volume propagado.

Os hidrogramas completos apresentados estão associados a probabilidades de excedência da vazão de pico, priorizando, em caso de mais de um mesmo valor de vazão de pico para diferentes iterações, aqueles com menor tempo de base e pico e maior volume propagado, de maneira hierárquica. No entanto, não é possível apresentar conclusões a respeito da probabilidade de excedência dos demais parâmetros do hidrograma, uma vez que não foi realizada uma análise de distribuição de probabilidade conjunta desses parâmetros, que pode ser o objetivo de avaliações futuras.

Figura 50 – Hidrogramas de ruptura associados a diferentes probabilidades de excedência da vazão de pico

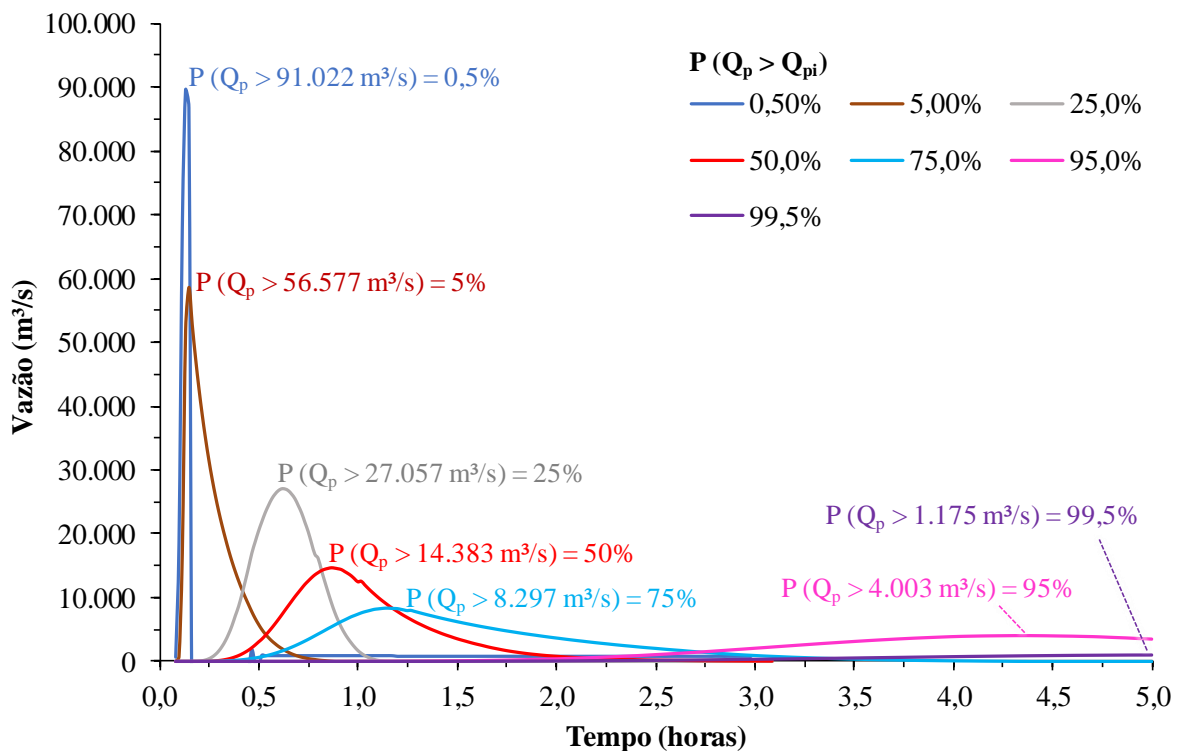


Tabela 40 – Resumo de informações dos hidrogramas de ruptura associados a diferentes probabilidades de excedência da vazão de pico

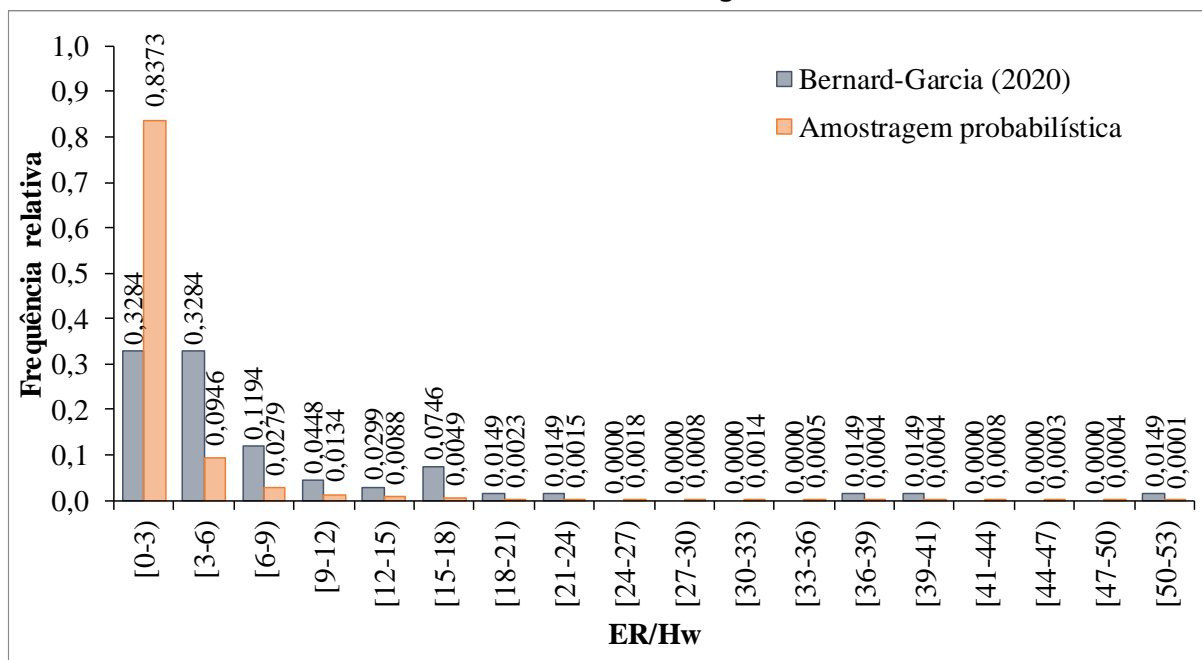
$P(Q_p > q_{pi})$	Iteração	Hidrograma				Brecha				
		Q_{pico} (m^3/s)	t_{pico} (min)	t_{base} (min)	Vol. (Mm^3)	L_{Bf} (m)	El.fundo (m)	Z esq.	Z dir.	T_f (h)
0,50%	7519	91.022	9	10	38,275	224,79	213,24	0,67	0,00	0,12
5,00%	5465	56.577	9	45	38,276	0,00	210,25	0,39	3,03	0,06
25,00%	6094	27.057	37	59	38,274	32,58	213,64	2,32	0,41	0,70
50,00%	4540	14.383	51	139	38,248	0,14	216,27	1,67	0,21	0,92
75,00%	5688	8.297	69	209	38,276	2,05	211,28	0,06	0,49	1,18
95,00%	3736	4.003	262	262	38,276	0,37	209,60	0,22	1,02	6,60
99,50%	5023	1.175	299	299	38,276	0,33	207,09	0,01	0,04	5,33

Apesar das limitações referentes às conclusões relativas à forma dos hidrogramas, é possível observar algumas tendências no comportamento dos mesmos em relação à probabilidade de excedência. Hidrogramas com vazão de pico com menores probabilidades de excedência (0,5% a 10%) tendem a apresentar uma forma mais alongada, enquanto as vazões de pico com maiores probabilidades apresentam a tendência de formas mais achatadas (90% a 99,5%). Um comportamento de transição entre as formas foi observado para os hidrogramas com probabilidade de excedência intermediárias (25% a 75%).

5.7.4 Taxa de erosão das brechas amostradas

A taxa de erosão (ER) representa a razão entre os dois parâmetros com maior grau de correlação com a vazão de pico dos hidrogramas indicados no Item 5.7.2, que são o tempo de formação e a largura da brecha. Dessa forma, esse é um importante parâmetro para definição dos hidrogramas de ruptura e a análise do comportamento desse parâmetro no processo de amostragem é interessante. Assim, no presente estudo foi avaliado a variabilidade da taxa de erosão das brechas estimadas de maneira probabilística em comparação com aquela observada nos casos históricos registrados no banco de dados de referência (BERNARD-GARCIA & MAHDI, 2020). Para tanto, foram elaborados os histogramas de ER/H_w das amostras, sendo H_w igual a carga hidráulica acima do fundo da brecha, conforme indicado na Figura 51.

Figura 51 – Histogramas da razão ER/H_w observada no banco de dados de referência e resultante da modelagem



Observa-se que o modelo probabilístico aplicado não foi capaz de reproduzir a variabilidade nos valores de ER/H_w observado na amostra dos casos históricos de ruptura. A maior parte das brechas de ruptura estabelecidas apresentaram valores de ER/H_w entre 0,0 e 3,0, enquanto nos registros históricos a maior parte dos registros apresentam valores entre 0,0 e 6,0. O modelo probabilístico ainda teve pouca aderência na cauda superior à direita, sendo a frequência relativa nas classes de valores mais elevados quase sempre abaixo dos valores observados. Assim, entende-se que esse aspecto precisa de maiores investigações, sobretudo em relação a uma eventual necessidade de estabelecer um processo de amostragem conjunta considerando um modelo de distribuição para ER/H_w .

COLORADO (2020) indica ER/H_w como um critério para validação dos parâmetros de brecha sendo seus limites iguais a 1,6 e 21. No banco de dados de referência adotado na presente pesquisa (BERNARD-GARCIA & MAHDI, 2020), os limites observados para esse parâmetro foram iguais a 0,13 e 52,07. Assim, casos históricos de ruptura demonstram que os limites indicados por COLORADO (2020) podem ser violados. Em uma amostra com 67 observações, foram registrados no banco de dados de referência 16 valores fora da faixa apresentada por COLORADO (2020). Desses, observou-se 4 casos com valores de ER/H_w acima de 21 e 12 registros com ER/H_w abaixo de 1,6.

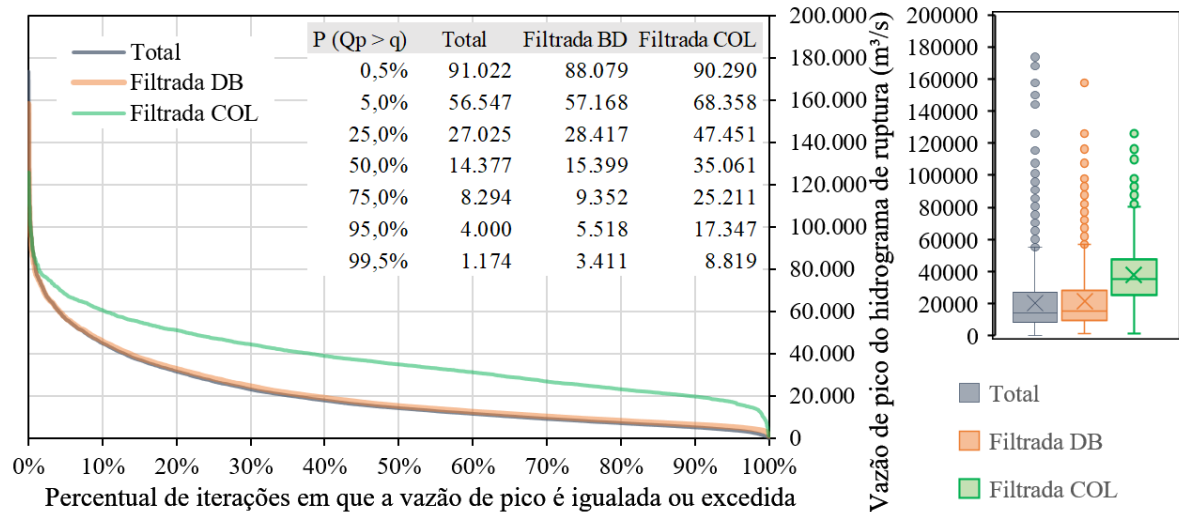
Considerando os limites observados no banco de dados de referência, foram observadas 621 violações no processo de amostragem dos parâmetros de brecha, sendo verificado 597 valores abaixo do limite inferior ($ER/H_w < 0,13$) e 24 acima do limite superior ($ER/H_w > 52,07$). Caso esses limites fossem utilizados como um critério de validação dos parâmetros de brecha, seria observada uma taxa de rejeição das amostras de 7,8%. Já se fossem considerados os limites indicados por COLORADO (2020), a taxa de rejeição já passaria para 69%, com 5.519 observações violando os limites (5.431 observações com $ER/H_w < 1,6$ e 88 com $ER/H_w > 21$). Esse aspecto demonstra que, apesar de não ter conseguido representar a variabilidade de ER/H_w , o processo de amostragem respeitou, em grande parte, os limites dos valores observados. Ao passo que os limites propostos por COLORADO (2020) foram violados em um grande número de iterações, o que indica que esse filtro não representa os dados observados no banco de dados de referência.

A aplicação de um filtro para validação das amostras, quando justificável, tem como objetivo remover situações consideradas incoerentes de acordo com o critério adotado, que deve levar em consideração aspectos relacionados ao problema físico, como é o caso da taxa de erosão. No caso da aplicação desses filtros, espera-se uma padronização da amostra, eliminando em grande parte os resultados extremos. A fim de observar esse aspecto, aplicou-se na amostra produzida na modelagem probabilística os filtros de ER/H_w indicados por COLORADO (2020) e observados na base de referência ($0,13 \leq ER/H_w < 52,07$). O resultado da análise está apresentado na Figura 52, onde é possível observar, assim como esperado, a redução na amplitude dos resultados a partir da análise das curvas de frequência e *box plot*.

Observa-se que a diferença entre as curvas da amostra completa (Total) e aquele filtrada pelos limites dos dados observados (Filtrada DB) foi mínima e quase imperceptível graficamente, o que indica que o processo de amostragem respeitou em grande parte os limites de ER/H_w observado nos registros históricos. Já a diferença entre a amostra completa e a amostra (Filtrada COL), ajustada conforme o critério indicado por COLORADO (2020), foi considerável, conforme pode ser constatado graficamente. O filtro proposto por COLORADO (2020) padroniza a amostra e altera consideravelmente os valores de ER/H_w amostrados, eliminando grande parte da variabilidade dos resultados observados, o que vai em desconformidade dos objetivos de

uma análise probabilística. Assim, considera-se que esse se aplica mais como um critério de projeto utilizado em análises determinísticas, não sendo recomendado em análises probabilísticas.

Figura 52 – Curva de frequências e box plot das vazões de pico dos hidrogramas para as amostras completa e filtrada



5.7.5 Influência do modelo de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha na análise de incertezas dos hidrogramas

Os parâmetros de brecha de ruptura representam os dados de entrada do modelo de simulação do hidrograma de ruptura de barragens. Assim, é esperado que a resposta do sistema seja influenciada pelo modelo de distribuição de probabilidade adotado para representar esses parâmetros. As incertezas relativas aos parâmetros de brecha se propagam para os resultados do sistema, logo espera-se que modelos que consideram maiores faixas de incertezas resultem em amostras de resultados que também apresentam maiores faixas de incertezas. Porém, uma dúvida resta em relação à influência da forma e modo de construção dos modelos nos resultados. A fim de explorar esse aspecto, foi realizada uma análise comparativa do uso de diferentes modelos de distribuição de probabilidade.

Primeiro comparou-se o resultado da análise probabilística a partir da aplicação dos modelos identificados no Capítulo 4 como de melhor ajuste, tanto no geral quanto dentre aqueles disponibilizados no McBreach. Os modelos foram ajustados a partir de uma mesma amostra de dados e, portanto, buscou-se avaliar as diferenças nos resultados em virtude do uso de diferentes modelos ajustados a partir de uma mesma

base de dados. Uma segunda avaliação foi realizada comparando os modelos ajustados no Capítulo 4 com outros modelos propostos na literatura com base em metodologias diferente, baseadas nos valores esperados dos modelos empíricos de previsão. Uma terceira avaliação foi realizada na comparação de dois modelos definidos com os mesmos limites propostos por AHMADISHARAF *et al.* (2016). Assim, buscou-se também avaliar como a forma dos modelos pode influenciar nos resultados das análises.

No modelo original de AHMADISHARAF *et al.* (2016), o limite superior da distribuição do tempo de formação de brecha é igual a 8,4 horas. Como a janela de simulação do modelo paramétrico está definida igual a 5 horas, admitiu-se como limite superior da distribuição de tempo de abertura da brecha o maior tempo de brecha observado no banco de dados e que fosse inferior à janela de simulação. O uso de uma janela de simulação suficiente para observar brechas de ruptura mais lentas aumentaria consideravelmente o tempo de simulação, assim, a adaptação foi proposta. Como o intuito é apenas observar o comportamento dos resultados, considera-se que essa adaptação não inviabiliza a análise, no entanto recomenda-se que estudos posteriores possam aprofundar sobre essa análise a fim de verificar a influência do aumento na janela de tempo de simulação e no ajuste do limite superior da distribuição.

A Tabela 41 apresenta os modelos adotados na análise comparativa e a Figura 53 apresenta as respectivas funções densidade de probabilidade, onde é possível perceber a diferença entre os modelos de distribuição de probabilidade. Além da forma da distribuição, observa-se também diferenças entre a região de maior densidade e formas dos modelos.

Os resultados da aplicação dos diferentes modelos estão apresentados na Figura 54, que representam as curvas de frequência e os *box plots* construídos a partir dos diferentes conjuntos de respostas do sistema. Os resultados apresentados confirmam a expectativa de que o uso de diferentes modelos de distribuição de probabilidade, na etapa de amostragem dos parâmetros de brecha, altera o comportamento da resposta do MMC. Como esperado, observa-se que quanto maior a faixa de incertezas dos modelos, maior a faixa de incertezas nos resultados. Além disso, os resultados

indicam que a forma dos modelos também influencia na análise de incertezas das vazões de pico dos hidrogramas de ruptura.

Tabela 41 – Modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha adotados na análise comparativa

Modelo	Parâmetro Brecha			
	Cota de fundo	Largura de fundo	Declividade da parede lateral	Tempo de formação
Melhor ajuste	H _B /H _d ~ ALD (1,00; 0,06; 0,69)	L _{Bf} /L _{crista} ~ Gama (0,25; 1,64)	Gama (0,50; 0,23)	Gama (1,59; 1,50)
Melhor ajuste Mcbreach	Normal (217,99; 17,34)	Log-Normal (1,00; 46,80)	Log-Normal (0,100; 2,18)	Log-Normal (0,44; 1,06)
Goodell (2018)	Normal (231,39; 8,45)	Normal (78,98; 22,47)	Normal (1,26; 0,24)	Normal (0,95; 0,15)
Ahmadisharaf (2016)	Triangular (197,69; 253,81; 210,85)	Triangular (1,73; 263,52; 63,58)	Triangular (0,50; 1,40; 0,99)	Triangular (0,14; 4,79; 0,73)
Uniforme	Uniforme (197,69; 253,81)	Uniforme (1,73; 263,52)	Uniforme (0,50; 1,40)	Uniforme (0,14; 4,79)

Gama (forma; taxa); Normal (posição; escala); ALD (posição; escala; assimetria); Log-Normal (moda, média); Triangular (mínimo; máximo; moda); Uniforme (mínimo; máximo)

Figura 53 – Modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha adotados na análise comparativa

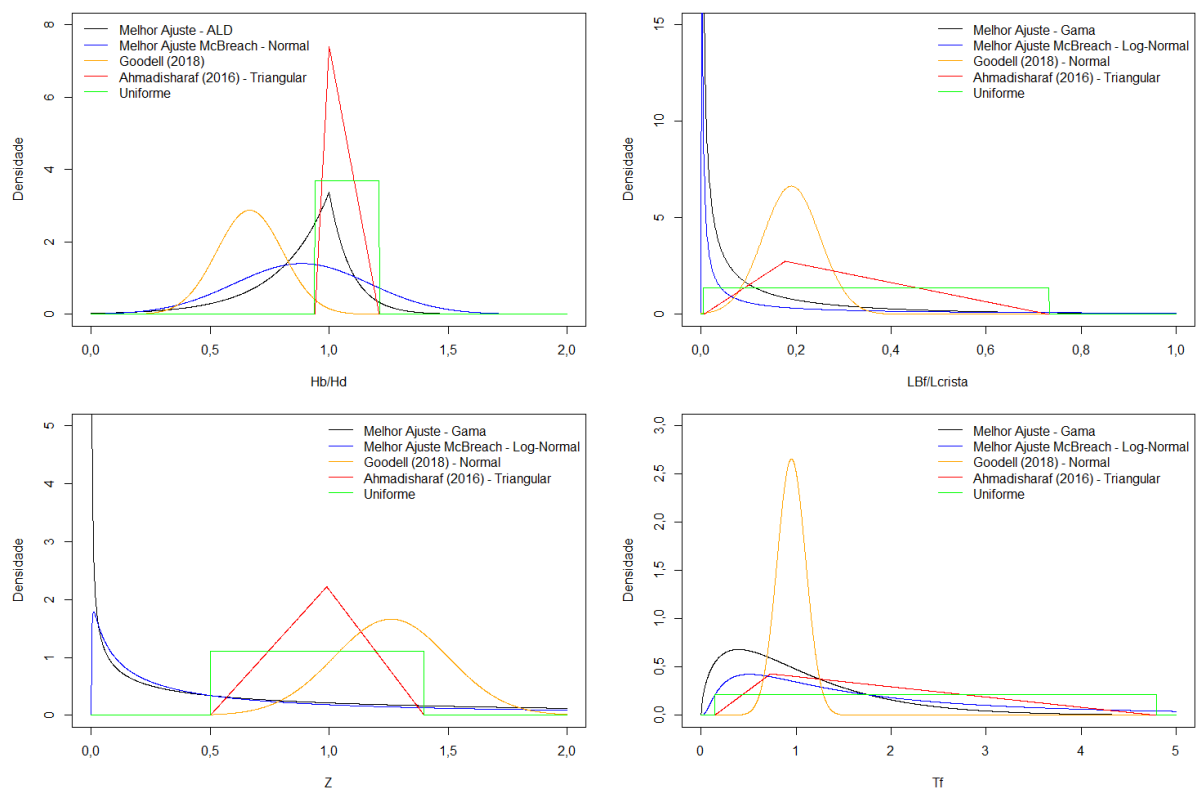
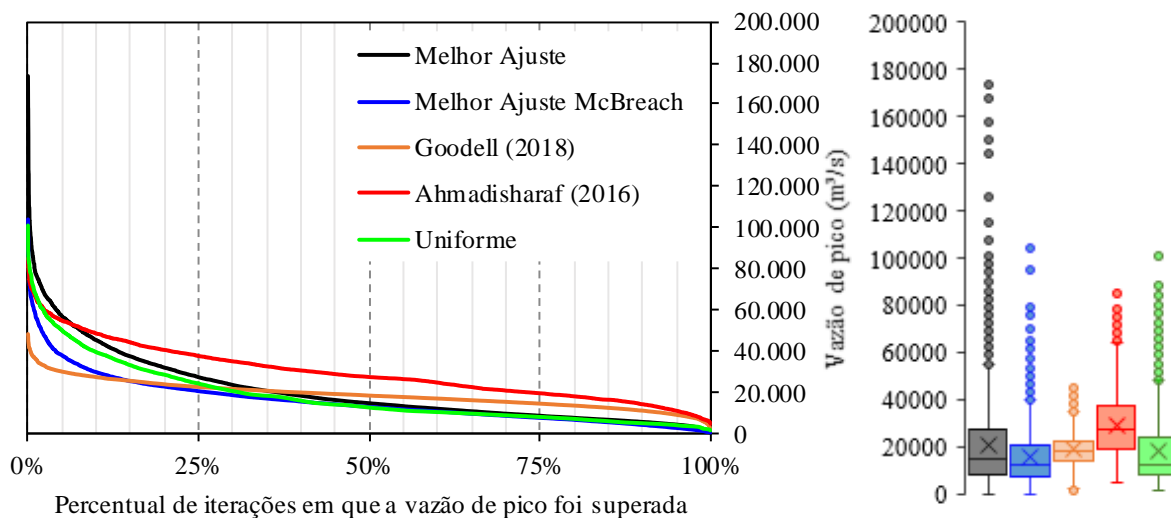


Figura 54 – Curva de frequência e box plot das amostras de vazão de pico resultantes do MMC com diferentes modelos distributivo para os parâmetros de brecha



Ao comparar a resposta do sistema ao uso dos modelos identificados como melhor ajuste e melhor ajuste dentre os disponíveis no McBreach (Log-Normal, Normal, Triangular, Uniforme), observa-se que o resultado proveniente da aplicação do McBreach apresentou menor amplitude de valores. Conforme discutido no Capítulo 4, os modelos disponíveis no McBreach não foram capazes de representar de maneira completa a incerteza relativa aos parâmetros de brecha observados na literatura e assim, entende-se que menor variabilidade nos resultados está relacionado a falta de aderência entre os modelos propostos e a faixa de incerteza observada na base de dados. Gerar maior variabilidade na amostra dos resultados, com maior amplitude de valores, pode ser considerado como uma vantagem, principalmente quando isso reflete o comportamento da amostra utilizada como referência para a definição dos modelos e em uma modelagem capaz de simular cenários menos prováveis, porém factíveis. Assim, considera-se que o uso do McBreach na análise probabilística dos hidrogramas de ruptura é limitado. Dessa forma, entende-se que a rotina desenvolvida em Python para a aplicação do MMC no HEC-RAS apresenta maior representatividade das incertezas observadas e permite observar resultados mais abrangentes e aderentes ao comportamento amostral.

Na comparação entre os modelos baseados na proposição de AHMADISHARAF (2016) e o Uniforme, ambos estabelecidos entre os mesmos limites, observa-se que a forma da função densidade de probabilidade também influencia nos resultados. O modelo Uniforme, por não apresentar uma região com maior densidade de

probabilidade, pode ser interpretado como um modelo com menor grau de informação, apresentando maior grau de incerteza. Assim, por se tratar de um modelo que representa uma faixa maior de incerteza, é observado que o resultado associado ao modelo Uniforme apresenta também maior faixa de incertezas do que aquele proposto por AHMADISHARAF (2016). Por outro lado, o modelo Uniforme não representa as características da amostra dos parâmetros de brecha observadas em casos históricos de ruptura ou estimadas a partir das equações de previsão. Isso demonstra que esse modelo, apesar de conseguir representar algumas situações extremas não observadas em outros modelos baseados nos mesmos critérios, não apresenta informações relacionadas ao problema físico observado.

A análise comparativa apresentada reforça o entendimento sobre a influência dos modelos de distribuição de probabilidade nos resultados de uma análise probabilística. Observa-se que não só a base de dados ou limites considerados na construção dos modelos influenciam nos resultados da análise probabilística, mas também o tipo de modelo, seu modo de construção e suas características associadas. Dessa forma, entende-se que a definição desses modelos é uma das principais etapas para o desenvolvimento de uma análise probabilística.

5.7.6 Comparação com estudos anteriores do caso em análise

Frente à gama de possibilidades para o desenvolvimento de um estudo de ruptura hipotética de barragens, buscou-se analisar o comportamento dos resultados obtidos na presente pesquisa com os resultados obtidos em estudos anteriores. Esses foram desenvolvidos por diferentes métodos e premissas, não sendo objetivo dessa avaliação realizar uma análise quantitativa, tampouco identificar o método com melhor desempenho dentre aqueles avaliados.

Os resultados obtidos na presente avaliação foram comparados com os resultados dos estudos apresentados por ZENZ & GOLDGRUBER (2013) e PETER (2017), os quais utilizaram o mesmo caso empregado na presente análise, conforme descrito no Item 3.5 da revisão de literatura. ZENZ & GOLDGRUBER (2013) apresentam os resultados do estudo de ruptura hipotética desenvolvido por 8 diferentes autores, que buscaram estabelecer um *benchmark* entre diferentes modelos computacionais. Já Peter (207) utilizou um modelo fisicamente baseado no desenvolvimento de uma

análise probabilística. A Tabela 42 apresenta a probabilidade de superação da vazão de pico dos resultados apresentados pelos diferentes autores convidados por ZENZ & GOLDGRUBER (2013) com base nos resultados obtidos na análise probabilística. Os resultados apresentados refletem as experiências individuais de cada modelador e não comunicam as incertezas aos resultados. A comparação com os resultados da análise probabilística é uma maneira de definir as incertezas associadas aos resultados obtidos.

Tabela 42 – Estimativa das incertezas dos hidrogramas apresentados no benchmark (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013) em comparação com a amostra resultante do MMC aplicado

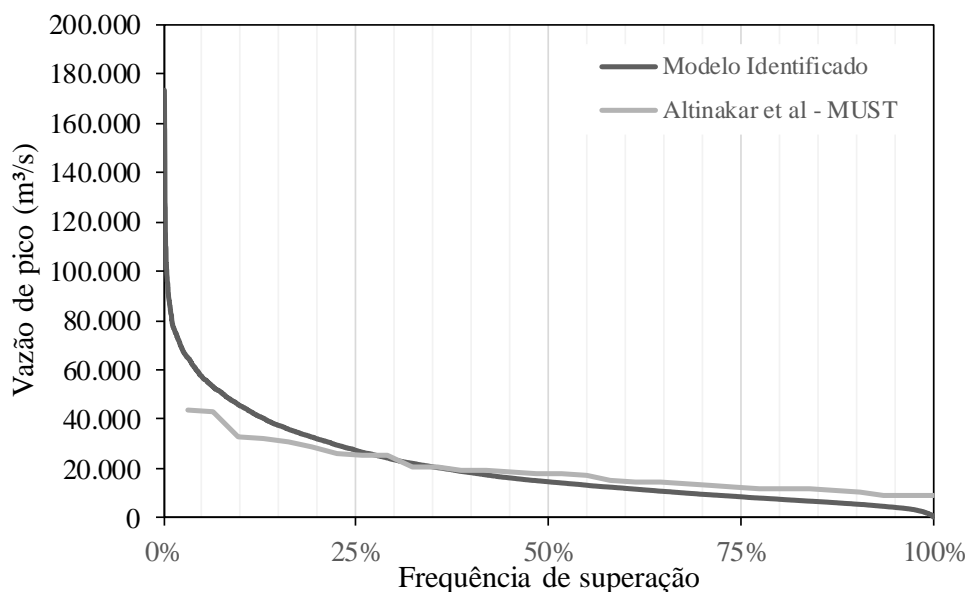
Autor	Sigla	Tipo de Modelo	Q_{pico} (m³/s)	P (Q_p > q_p)*
SABERI <i>et al.</i>	SAB	Fisicamente baseado	41.020	12,3%
THAMES & KALYANPU	TK	Paramétrico	38.336	14,0%
WILLANS & BUCHANAN	MMC	Paramétrico	30.771	21,0%
MANCUSI <i>et al.</i>	MANC	Fisicamente baseado	28.677	23,2%
LANL	LANL	Não informado	23.284	30,0%
MCVAN <i>et al.</i>	MCV	Paramétrico	17.311	41,6%
DAVISON <i>et al.</i>	HRW	Fisicamente baseado	13.683	52,5%
ALTINAKAR <i>et al.</i>	MUST	Paramétrico	11.973	59,0%

*Estimado a partir do MMC com as distribuições de probabilidade consideradas como aquelas de melhor ajuste.

Considerando que todos os resultados apresentados pelos modeladores que participaram do *benchmark* são válidos e possíveis, fica evidente a presença de incertezas nesse tipo de análise. De modo geral, observa-se que a maior parte dos resultados apresentados pelos modeladores apresentam probabilidade de excedência relativamente baixa, abaixo dos 30%. Apenas duas estimativas apresentaram valores com probabilidade de excedência acima dos 50%, que podem ser considerados como valores pouco conservadores e mais facilmente superados por outras combinações de parâmetros.

ALTINAKAR *et al* (2013) também apresenta uma análise probabilística em seu estudo. As curvas de frequência das vazões de pico dos hidrogramas resultantes da avaliação desses autores e da presente análise estão apresentadas na Figura 55. Observa-se uma diferença considerável entre as duas curvas, sendo a incerteza estimada por ALTINAKAR *et al* (2013) bem inferior à observada na presente pesquisa.

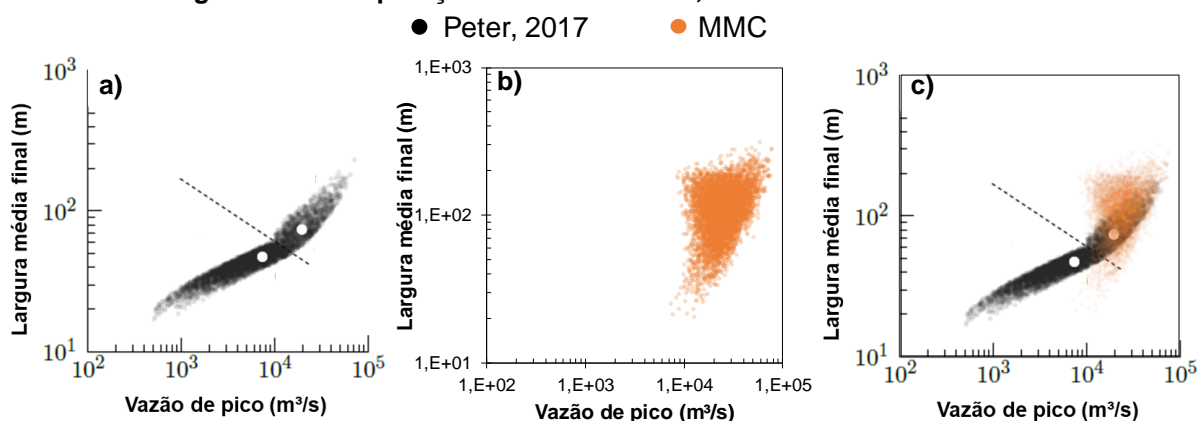
Figura 55 – Comparação curva de frequência da vazão de pico do hidrograma de ruptura resultante do MMC aplicado e do LHS proposto do ALTINAKAR et al. (2013)



Conforme discutido no item 5.7.5, as diferenças nas curvas podem ser explicadas pelas distintas faixas de variação e quantidade dos parâmetros considerados como variáveis aleatórias. Ademais, o modo de construção dos modelos e a diferença do modelo paramétrico também podem contribuir para as diferenças observadas. Análises de risco baseadas nas diferentes abordagens resultariam em resultados distintos, o que poderia gerar diferentes impactos. Dessa forma, mantêm-se o julgamento sobre a importância de uma criteriosa seleção dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha.

PETER (2017) apresentou seus resultados a partir de um gráfico de dispersão entre a largura média da brecha de ruptura e a vazão de pico do hidrograma defluente, replicado na Figura 56. O autor identifica dois regimes de ruptura, divididos na Figura 56a pela linha tracejada entre ruptura total (ramo superior) e ruptura parcial (ramo inferior).

Figura 56 – Comparação resultados Peter, 2017 e MMC desenvolvido



A partir da análise gráfica dos resultados apresentados por PETER (2017) na Figura 56a, é possível observar que a relação funcional entre a vazão de pico do hidrograma e a largura média da brecha de ruptura se aproxima mais de uma relação linear do que aquela observada na presente análise Figura 56b. Esse aspecto sugere que no modelo aplicado por PETER (2017) a largura média da brecha apresenta maior impacto na definição dos valores de vazão de pico do hidrograma do que no modelo paramétrico aplicado na presente pesquisa.

Outro aspecto divergente que pôde ser observado na análise comparativa dos resultados, notadamente no gráfico de sobreposição dos valores da Figura 56c, diz respeito ao ramo inferior dos pontos de dispersão dos valores indicados por PETER (2017). Esses correspondem ao que o autor define como rupturas parciais. O modelo paramétrico aplicado na presente pesquisa não representa cenários de ruptura parciais da maneira que foram abrangidos pelo modelo fisicamente baseado aplicado por PETER (2017). Esse aspecto é relevante para a análise, uma vez que impacta de maneira considerável na quantificação das incertezas na vazão de pico do hidrograma defluente da ruptura. Dessa forma, de modo similar ao que foi observado anteriormente, análises de risco baseadas nos resultados dos dois estudos apresentariam conclusões consideravelmente diferentes, com consequentes impactos e decisões para gerenciamento do risco.

As diferenças observadas na análise comparativa dos resultados da presente pesquisa e daqueles provenientes de estudos anteriores reforça a importância de continuidade da pesquisa sobre o tema. A partir da análise realizada, observa-se que mesmo em uma análise de incertezas ainda há incertezas. A depender do método e

dos modelos de distribuição utilizados na análise, é possível observar diferentes respostas que geram diferentes avaliações de risco. Essas podem levar a diferentes tomadas de decisão de considerável impacto socioeconômico e ambiental.

5.7.7 Propagação dos hidrogramas

O modelo truncado utilizado na estimativa das incertezas dos hidrogramas de ruptura não permite estabelecer uma relação direta entre as probabilidades de excedência das vazões de pico dos hidrogramas e as probabilidades de superação dos demais parâmetros hidráulicos da inundação ao longo de todo o vale a jusante. Assim, não se deve considerar que a probabilidade de superação da vazão de pico do hidrograma de ruptura é igual à probabilidade de superação dos parâmetros da inundação. Para avaliar esse aspecto, é preciso incorporar ao MMC um modelo hidráulico de propagação e registrar todos os resultados da inundação a cada simulação empregada, o que não fez parte do escopo da presente pesquisa.

De maneira exploratória, apenas para observar o comportamento da propagação dos hidrogramas, foi realizada na presente pesquisa uma análise simplificada da propagação dos hidrogramas. Foram realizadas simulações hidráulicas dos hidrogramas definidos durante a análise de incertezas em um modelo expandido, que representa toda a área a jusante da barragem. Os hidrogramas associados às diferentes probabilidades de excedência selecionadas foram utilizados como condição de contorno de montante do modelo hidráulico completo. A jusante, o contorno foi definido pelo lago e pelo limite do modelo digital de terreno, considerando a ocorrência da profundidade normal. O modelo completo está apresentado na Figura 57. Com exceção do modelo geométrico, representado pela malha computacional e condições de contorno, todas as demais configurações e métodos adotados na construção do modelo completo foram iguais àquelas apresentadas no Item 5.5 para o modelo truncado.

Os resultados da avaliação da propagação dos hidrogramas foi realizado a partir da análise pontual dos parâmetros hidráulicos da inundação associada à passagem dos hidrogramas em seções transversais de referência e por uma análise espacializada em mapas temáticos. Foi observado o amortecimento dos hidrogramas ao longo do vale a jusante, com a verificação da atenuação das vazões de pico (Figura 58), o

tempo de viagem da onda (Figura 59), os níveis de água máximos a jusante (Figura 60) e as envoltórias máximas de inundação (Figura 61).

Observa-se que os hidrogramas com vazão de pico maiores, apresentam curvas de atenuação mais acentuadas do que os hidrogramas com vazões de pico menores (Figura 58). A variação das vazões de pico é maior nas seções mais próximas à barragem, sendo observada uma convergência nos valores para as seções mais distantes da barragem. Isso ressalta a importância de se avaliar incertezas principalmente para as regiões mais próximas a barragem.

Na última seção transversal de referência (ST-08) observa-se que os hidrogramas apresentam forma e vazão de pico muito similares, tendo como principal diferença os tempos de pico e de base (Figura 58). Esse aspecto indica que, para seções mais afastadas da barragem, os controles hidráulicos do vale a jusante tendem a exercer maior influência nos hidrogramas, direcionando os mesmos para uma mesma forma e vazão de pico, o que pode resultar em áreas de inundação aproximadas. No entanto, as diferenças entre os tempos de chegada da onda ainda são consideráveis e podem representar enchentes com impactos diferentes.

Figura 57 – Modelo completo utilizado para a propagação dos hidrogramas a jusante

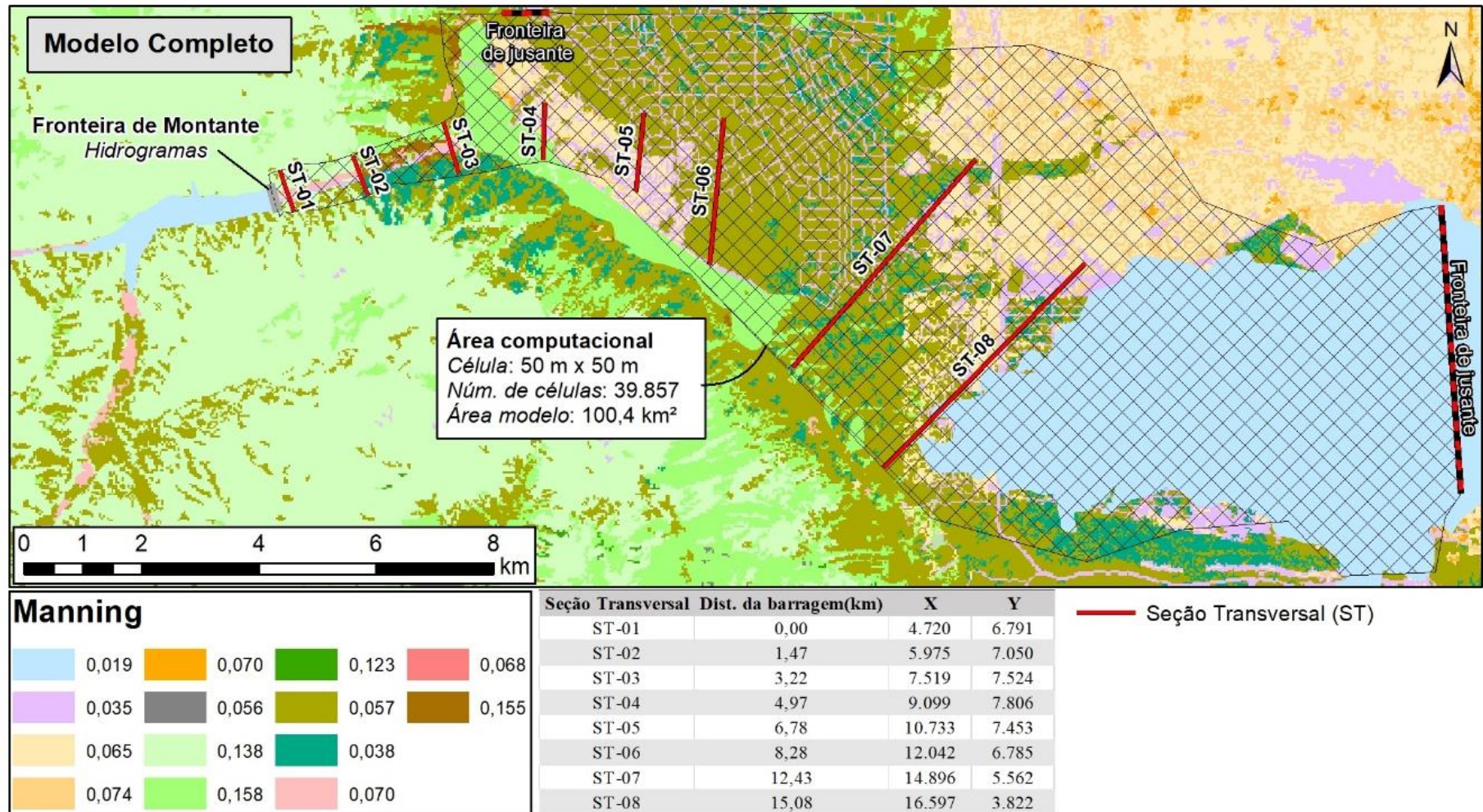
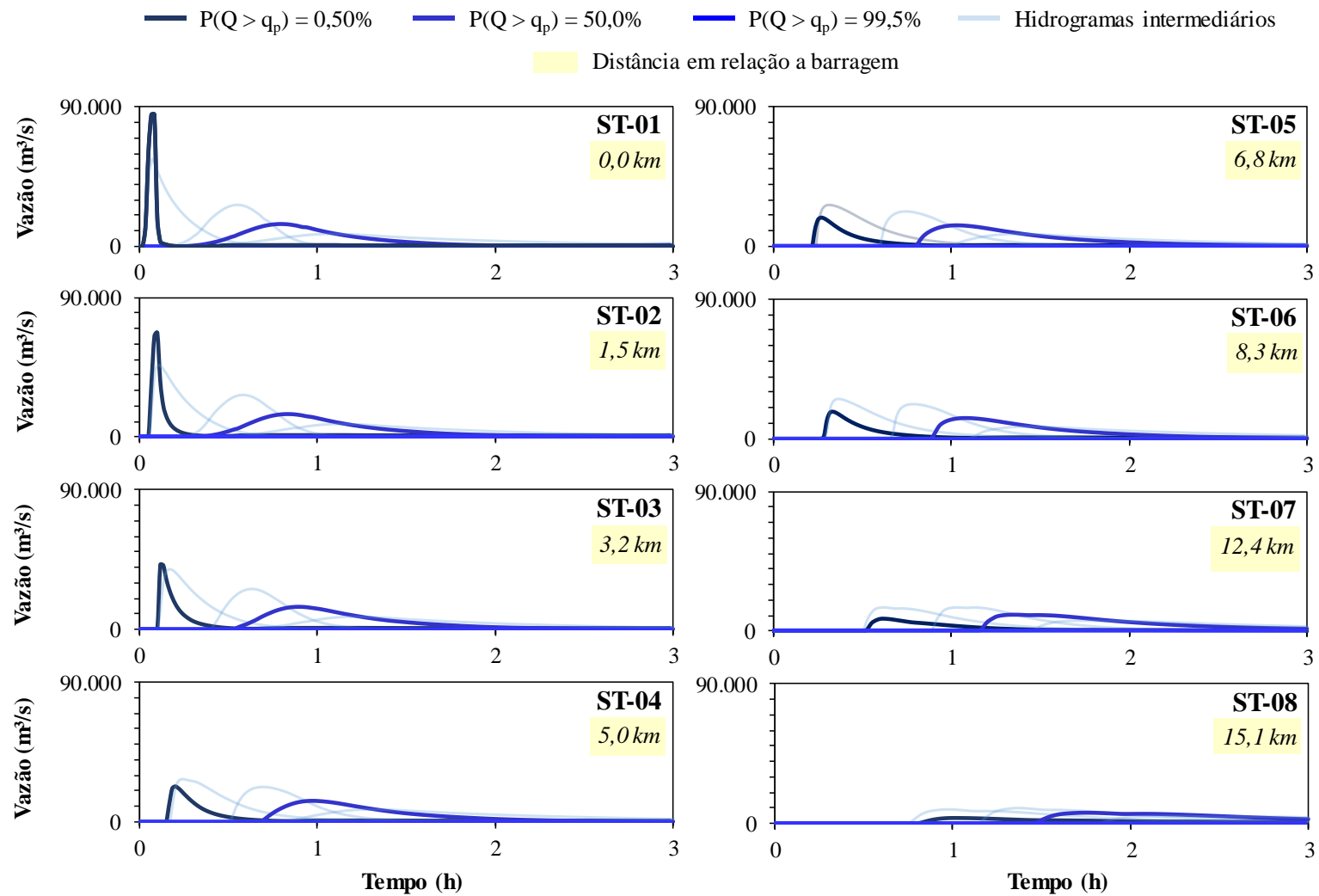
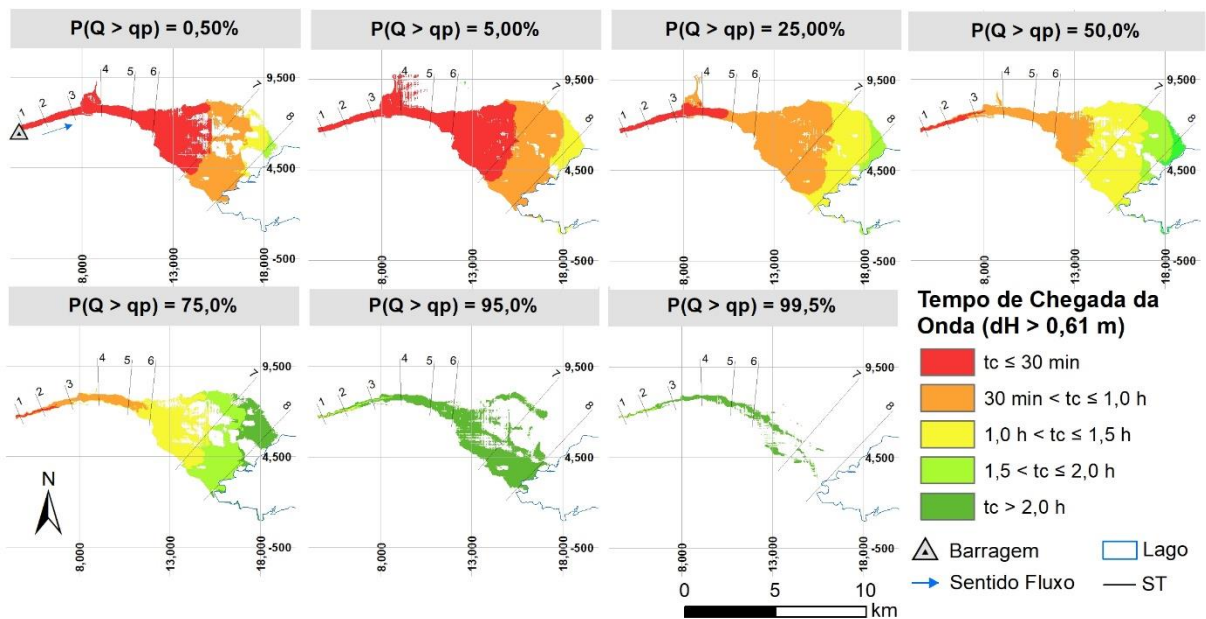


Figura 58 – Propagação dos hidrogramas de ruptura a jusante da barragem



Destaque é feito para a variação observada na área potencialmente inundada a jusante associada ao tempo de chegada menor ou igual a 30 minutos para os diferentes hidrogramas (Figura 59). Essa região é definida, por vezes, como a Zona de Autossalvamento (ZAS), região em que a evacuação da população no local deve ser realizada de forma autônoma, a partir de alertas e rotas indicados pelo gestor da barragem. Como pode ser observado a seguir (Figura 59), a definição da ZAS pode ser consideravelmente diferente a depender do hidrograma considerado, logo essa análise é extremamente importante na gestão de risco de inundações associadas a ruptura de barragens. Ressalta-se que os resultados apresentados se baseiam em uma abordagem probabilística da vazão de pico dos hidrogramas. Caso outro parâmetro do hidrograma de ruptura, como por exemplo o tempo de pico, fosse utilizado como referência para a análise probabilística outros resultados seriam observados o que abre perspectivas para estudos futuros que queiram avaliar os impactos na inundação a jusante em razão da seleção de outros parâmetros dos hidrogramas em uma análise probabilística.

Figura 59 – Tempo de chegada da onda associada a diferentes $P(Q > q_p)$



A Figura 60 apresenta a delimitação da envoltória máxima de inundação resultante da passagem da onda de ruptura associada a diferentes probabilidades de excedência da vazão de pico do hidrograma de ruptura. A Figura 61 apresenta a mesma informação, nível máximo de inundação, porém considerando as seções transversais definidas na análise.

No presente estudo de caso, observa-se que a amplitude nos valores da largura da envoltória máxima de inundação varia ao longo do vale a jusante. Nas primeiras três seções (ST-01 a 03), que são alocadas em uma região de vale mais encaixado, a variação na largura de inundação é relativamente pequena, mesmo que observada uma grande variação de nível de água na mesma seção. Entre as seções ST-04 e 06 verifica-se que, a partir de determinadas vazões a largura de inundação é consideravelmente superior às demais. Nessa região revela-se haver uma vazão limite, a partir da qual ocorre inundação da margem esquerda do talvegue a jusante da barragem, aumentando a sensibilidade dessa área aos parâmetros simulados. Devido às características da planície de inundação nessa região, mesmo um pequeno extravasamento ocasiona um grande alagamento, o que justifica a grande variação nas larguras de inundação simuladas. Já nas seções mais afastadas da barragem, alocadas em uma região de vale mais aberto, observa-se que a variação nas larguras de inundação são relativamente grandes, mesmo dada a pequena variação entre os níveis de água simulados.

Figura 60 – Envoltórias máximas de inundação a jusante associadas a passagem de hidrogramas com diferentes probabilidades de superação da vazão de pico

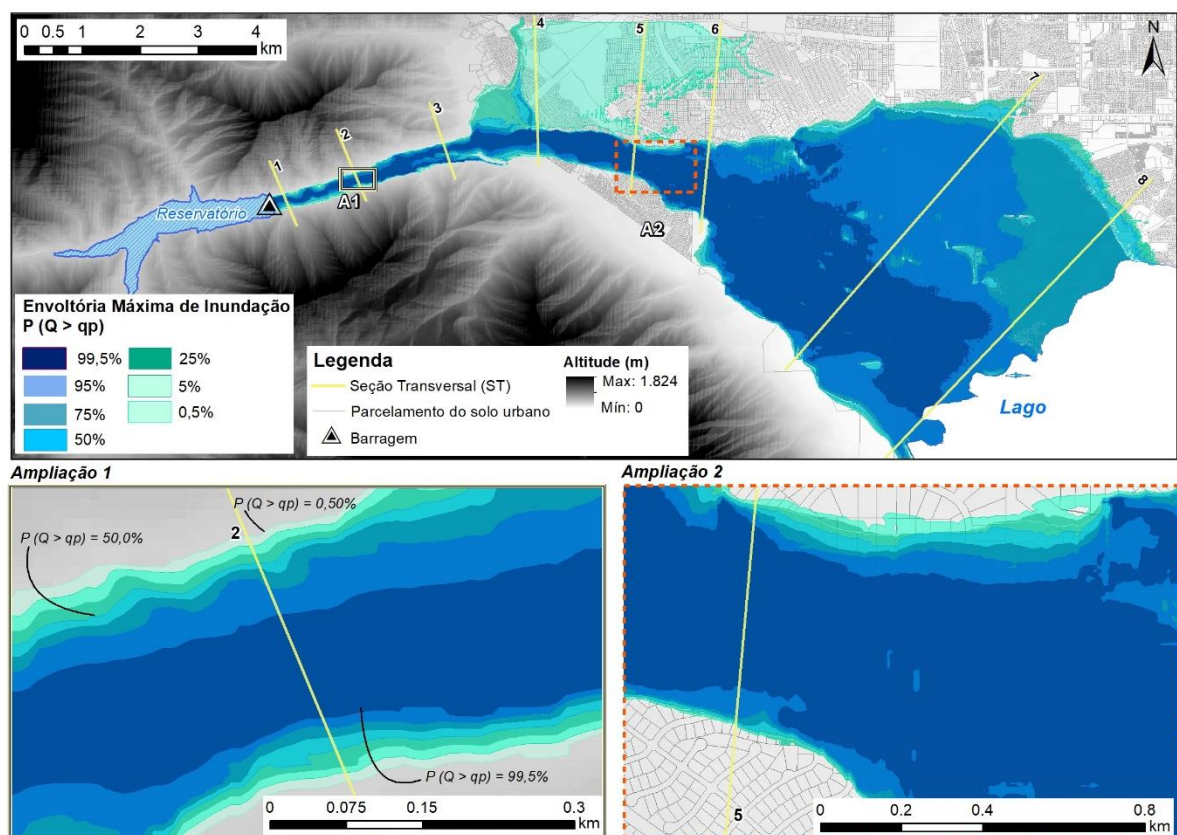
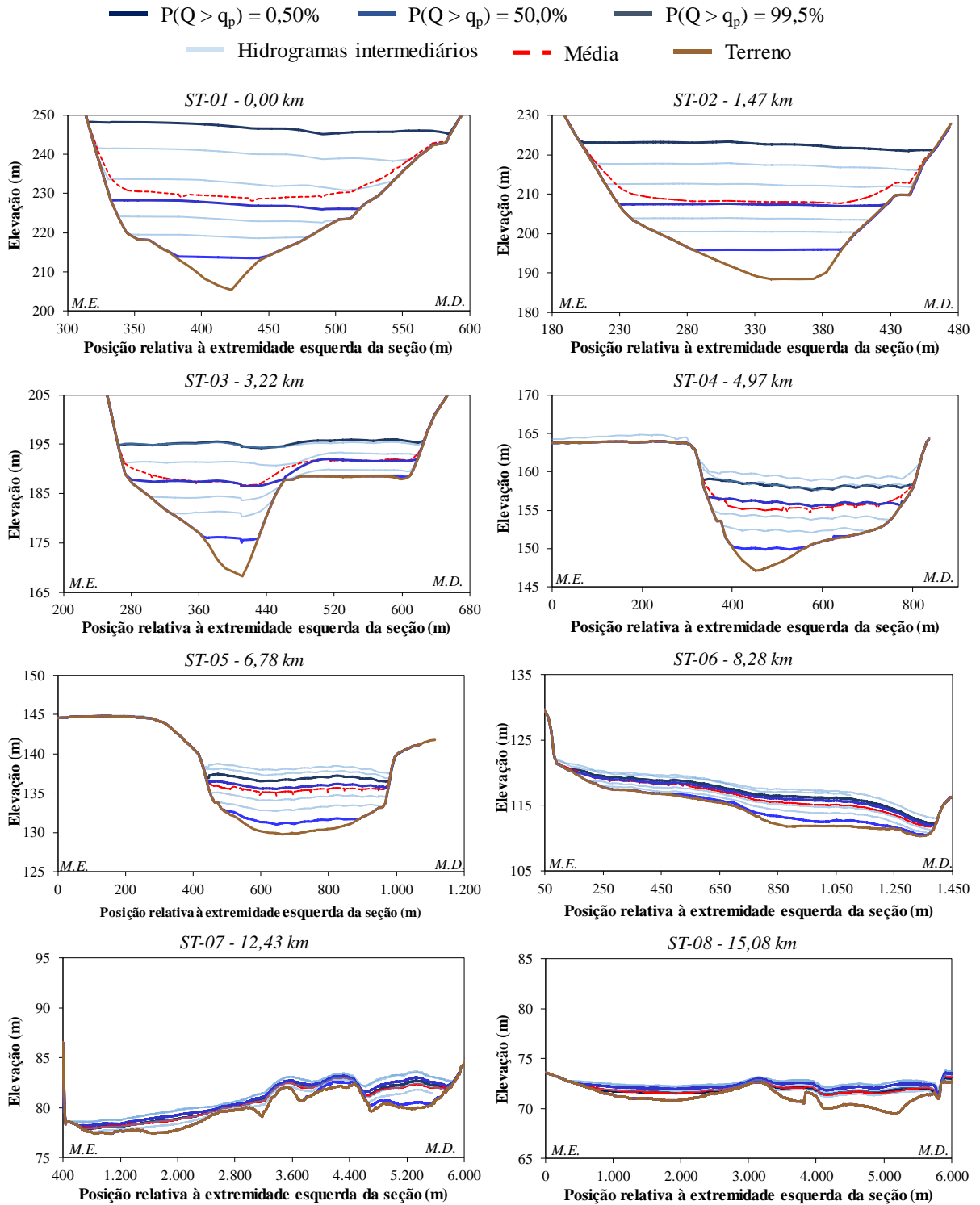


Figura 61 – Níveis de água máximos observados nas seções transversais definidas a jusante resultante da passagem dos hidrogramas de ruptura associados às diferentes probabilidades de superação da vazão de pico do hidrograma



A partir dos resultados, observa-se uma variação considerável entre as vazões de pico dos hidrogramas, os níveis de água máximo e tempos de chegada da onda observados nas seções a jusante da barragem. Associados a isso, é possível considerar que também há diferenças significativas em relação as velocidades máximas do escoamento. Mesmo com uma análise simplificada já foi possível verificar esses aspectos. Uma análise probabilística detalhada poderia fornecer informações ainda mais interessantes a respeito das características das prováveis inundações a jusante, sobretudo com a associação da probabilidade de excedência dos parâmetros hidráulicos da onda que podem auxiliar consideravelmente a gestão dos riscos da barragem. Esse é um dos aspectos que poderiam ser explorados no desenvolvimento de mapas de inundação probabilísticos.

Ressalta-se, novamente, que os resultados da avaliação apenas dão um indicio sobre como as diferenças observadas nos hidrogramas de ruptura podem refletir em diferenças importantes na previsão da inundação a jusante, não sendo possível associar a probabilidade de excedência da vazão de pico dos hidrogramas à probabilidade de superação de outras características da inundação.

5.8 Conclusões do Estudo de Caso

A aplicação do MMC para a estimativa das incertezas relacionadas às vazões de pico dos hidrogramas de ruptura em barragens de terra cumpriu com seu objetivo. Aspectos conhecidos *a priori*, como a influência dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de entrada nos resultados, também foram confirmados pelo estudo de caso. O objetivo da aplicação estava mais relacionado à observação do comportamento dos resultados e consequente discussão. Além desses aspectos, apresentados anteriormente, a aplicação também permitiu obter algumas conclusões, conforme apresenta os tópicos a seguir.

- Ao se comparar os resultados da abordagem probabilística com os resultados de estudos de ruptura que utilizam modelos de previsão de brecha determinísticos observa-se que os modelos determinísticos, em sua maioria, apresentam resultados conservadores, com vazões de pico com probabilidade de excedência abaixo de 25%. Exceção foi o modelo proposto por MACDONALD & LANGRIDGE-

MONOPOLIS (1984) que resultou em uma vazão de pico com probabilidade de excedência acima de 75%.

- Para o estudo de caso em questão, o tempo de formação foi o parâmetro de brecha que apresentou maior grau de correlação com a vazão de pico do hidrograma defluente da ruptura.
- As incertezas estimadas para a vazão de pico não se estendem a outras características do hidrogramas como tempos de ascensão, recessão e base e volume propagado. Vazões de pico iguais ou muito próximas podem apresentar hidrogramas distintos. Assim, não é possível associar a probabilidade de excedência da vazão de pico à probabilidade de excedência do hidrograma resultante como um todo, tampouco à probabilidade de excedência dos parâmetros hidráulicos da inundação a jusante (e.g, profundidade máxima, velocidade máxima, tempo de chegada, tempo de pico, etc.).
- Os modelos de distribuição de probabilidade adotados na representação dos parâmetros de brecha como variáveis aleatórias foram capazes de gerar, em mais de 92,2% dos casos, brechas de ruptura com taxas de erosão linear dentro da faixa de valores observados nos casos históricos de ruptura, o que demonstra que os modelos identificados como melhor ajuste se mostram coerentes.
- As distribuições de probabilidade disponíveis no controlador externo McBreach (Log-Norma, Normal, Triangular e Uniforme) não são capazes de representar completamente as incertezas dos parâmetros de brecha de ruptura observadas nos casos históricos de ruptura. Assim, considera-se que o uso do McBreach na análise probabilística dos hidrogramas de ruptura é limitada sendo recomendado nesses casos a adoção de rotina que permita selecionar os modelos de distribuição de probabilidade considerados como de melhor ajuste (Distribuição Gama para Z , L_{Bf}/L_{crista} e T_f e Assimétrica de Laplace para H_B/H_d).
- A análise probabilística das vazões de pico de hidrogramas de ruptura de barragens permitiu observar que a variação nos parâmetros de brecha afeta consideravelmente os resultados da inundação do vale a jusante.

6 Considerações Finais

A ruptura de uma barragem é um evento complexo e seus efeitos são sensíveis às condições iniciais do sistema (e.g., altura da barragem, volume armazenado, modo de falha, nível de água no reservatório e a jusante, teor de umidade do material da barragem, grau de compactação do aterro, granulometria do material, etc.). A dedução física dos processos envolvidos em uma ruptura de barragem ainda não é totalmente conhecida e, mesmo que houvesse um modelo perfeito para a simulação da ruptura de uma barragem, seria difícil prever exatamente como se comportaria a ruptura em razão do grande número de variáveis envolvidas na descrição das condições iniciais. Muitas variáveis apresentam características de estado, ou seja, variam em função das condições do sistema, o que torna sua definição ainda mais difícil, uma vez que precisaria saber previamente quais seriam as condições exatas no momento da ruptura. Dessa forma, incertezas são inerentes ao processo de modelagem de ruptura de barragens e considerando seu contexto julga-se importante que as incertezas sejam consideradas nesse tipo de estudo.

Considerar que a formação da brecha de ruptura é um evento aleatório é uma hipótese para quantificar a incerteza paramétrica envolvida no processo de modelagem. Para tanto, é necessário definir modelos probabilísticos para a simulação aleatória da formação das brechas. Amostras de casos históricos podem ser considerados como uma fonte para a definição desses modelos, conforme foi observado no presente trabalho. A variabilidade nos valores dos parâmetros de brecha observados no banco de dados apresentado por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020) foi utilizada no ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha e indicou a faixa de incertezas desses parâmetros. A análise dos dados indicou que as características das barragens e do modo de falha podem interferir nos valores dos parâmetros de brecha e, conseqüentemente, nos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros.

O modelo de distribuição de probabilidade Gama foi considerado como o de melhor ajuste para a base de dados observados da declividade da parede lateral – Z , da razão entre a largura de fundo da brecha e comprimento da crista – L_{Bf}/L_{crista} e para o tempo de formação – T_f . Para a razão entre altura da brecha e altura da barragem – H_B/H_d o

modelo de melhor ajuste foi o Assimetria do Laplace. Os parâmetros de cada distribuição considerada como de melhor ajuste estão apresentadas na Tabela 30. Outros estudos como BELLOS *et al.* (2020), GOODELL *et al.* (2018), LARA (2016), ALTINAKAR *et al.* (2013) sugerem a utilização de modelos de distribuição de probabilidade (Log-Normal, Normal, Triangular, Uniforme) ajustados à valores resultantes da aplicação dos modelos empíricos de previsão de brecha ou valores considerados plausíveis, o que não representa de maneira completa as incertezas associadas aos parâmetros de brecha. Outros autores também se basearam em observações de casos históricos para o ajuste dos modelos de distribuição de probabilidade, porém no caso de KALININA *et al.* (2020) amostras referente a tipos específicos de barragens (barragem em arco de concreto) e de tamanho reduzido foram utilizadas (14 observações), já AHMADISHARAF *et al.* (2016) se basearam em amostras maiores (53 observações) porém não realizaram uma análise crítica do ajuste dos modelos a fim de avaliar se o modelo de fato representa a variabilidade amostral. Dessa forma, considera-se que os modelos propostos apresentam alguns diferenciais em relação a outros modelos apresentados na literatura, uma vez que foram identificados com base em uma grande amostra de dados observados (64 a 314 observações) que representa uma variabilidade considerável de tipos de barragens de terra, com diferentes características e diferentes condições de ruptura.

O Método de Monte Carlo, aplicado na presente pesquisa, se mostrou eficiente para representar o padrão de variabilidade dos parâmetros de brecha observados na literatura. A partir da adoção de modelos de distribuição de probabilidade ajustados ao conjunto de dados observados foi possível quantificar a incerteza paramétrica das brechas na estimativa da vazão de pico dos hidrogramas de ruptura. O estudo de caso ressaltou a importância da definição criteriosa dos modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de entrada, haja vista a importância desses para os resultados da análise.

Apesar da importância de uma análise de incertezas em estudos de ruptura hipotética de barragens, entende-se as dificuldades e limitações em se desenvolver esse tipo de análise. A definição dos modelos de distribuição dos parâmetros de brecha, rotinas para automatização do MMC e o tempo necessário para execução da modelagem são alguns aspectos apontados como restrições para esse tipo de avaliação. Assim, o

presente trabalho buscou explorar esses temas na tentativa de fomentar esse tipo de análise na comunidade técnico-científica. Outros estudos citados anteriormente tiveram propósitos similares e contribuíram consideravelmente para essa discussão. O *software* McBreach foi a ferramenta que incentivou o desenvolvimento do presente trabalho, uma vez que se apresentava como um facilitador para a aplicação do MMC em estudos de ruptura hipotética de barragens. Porém, as restrições apresentadas, principalmente em relação aos modelos de distribuição de probabilidade disponíveis (Log-Normal, Normal, Triangular e Uniforme) que não representam de maneira satisfatória as incertezas dos parâmetros de brecha observadas nos casos históricos se mostrou um fator limitante para sua aplicação.

Considera-se que, apesar das limitações apresentadas, é possível adotar os modelos de distribuição de probabilidade identificados no presente trabalho em outros estudos e aplicações práticas, sendo essa considerada como uma possível contribuição da pesquisa. As bibliotecas disponíveis em linguagem Python e a rotina desenvolvida para a automatização do MMC, apresentada por SILVA *et. al.*, 2021, também demonstram ser uma ferramenta que pode ser replicada em outras análises. O tempo gasto para a obtenção dos resultados da modelagem foi considerado razoável e factível. Além disso, com os frequentes avanços tecnológicos, a tendência é de que o tempo necessário para esse tipo de simulação seja cada vez menor, principalmente com a difusão de técnicas de processamento em nuvem ou unidades gráficas (*Graphics Processing Unit* – GPU).

De maneira resumida, as principais observações relativas ao desenvolvimento da pesquisa estão apresentadas a seguir em formato de tópicos.

- As amostras dos parâmetros de brecha relativas a casos históricos de ruptura apresentam comportamento distinto em razão das características da barragem e do modo de falha, notadamente o tipo de falha (galgamento e erosão interna) para declividade da parede lateral e forma da barragem para largura de fundo da brecha.
- Os parâmetros de brecha podem ser considerados como variáveis independentes. Para a representação dos parâmetros de brecha como variáveis aleatórias, a distribuição Gama se mostrou como melhor ajuste para Z , L_{Bf}/L_{crista} e T_f , enquanto para H_B/H_d o melhor ajuste foi da distribuição assimétrica de Laplace (ALD).

- No estudo de caso avaliado, as definições dos hidrogramas de ruptura hipotética de barragens resultantes da aplicação de modelos empíricos determinísticos resultaram, em geral, em resultados conservadores com probabilidade de excedência abaixo de 25%.
- Observou-se que a variação nos parâmetros de brecha afeta consideravelmente os resultados da vazão de pico do hidrograma e conseqüentemente da inundação do vale a jusante. O tempo de formação da brecha se mostrou o parâmetro com maior relação funcional com a vazão de pico, se mostrando consideravelmente sensível à análise.

Por fim, considerando o contexto de aplicação dos resultados do estudo de ruptura hipotética de barragens, entende-se que seria de interesse das políticas públicas indicar a necessidade de avaliação de incertezas em estudos de ruptura hipotética de barragens. As políticas públicas visam a definir aquilo que seria o desejável e direciona a comunidade a se adequar para atingir os objetivos estabelecidos por suas regulações. Dessa forma, esse seria um incentivo importante para que as análises de incertezas integrassem os estudos de ruptura hipotética de barragens.

A iniciativa do desenvolvimento de análises probabilísticas também poderia partir dos empreendedores. Os pontos apresentados a seguir descrevem alguns benefícios que podem ser utilizados como argumentos para a indicação desse tipo de análise.

- Aumento no nível de informações, sobretudo sobre o que não se conhece, a respeito do risco de inundações associado a ruptura da barragem. Isso possibilita uma melhor tomada de decisão no planejamento das ações de emergência.
- Definição de cenários extremos, oriundos de condições desfavoráveis e favoráveis a erosão, associando uma probabilidade de excedência para os mesmos. Normalmente esses cenários não são considerados em análises determinísticas.
- Estimar a probabilidade de superação de um “pior cenário possível” definido de forma determinística, como aquele associado à remoção instantânea de toda a barragem. Esse cenário poderia ser utilizado em uma análise de risco mais conservadora.

- Permite estimar danos e calcular custos de ações preventivas e ou corretivas para áreas com pequena probabilidade de serem impactadas. Essas áreas, se não consideradas como potencialmente atingidas, podem ficar fora do orçamento e não serem contempladas durante as ações de emergência caso realmente sejam atingidas. Assim é possível definir um custo adicional ao que normalmente se atribui a uma inundação para caso haja necessidade de mais recursos.

A partir das conclusões observadas e da discussão realizada no desenvolvimento da presente pesquisa, apresentam-se algumas recomendações para pesquisas futuras baseadas na utilização dos modelos de distribuição de probabilidade identificados.

- Expandir a análise de incertezas obtidas na presente pesquisa para a etapa de propagação hidráulica dos hidrogramas pelo vale a jusante, inserindo a análise de incertezas dos parâmetros hidrodinâmicos e inferência estatística dos parâmetros hidráulicos da onda de inundação nos locais de interesse definido assim mapas de inundação probabilísticos.
- Estimar risco total de inundação associada à ruptura da barragem a partir da probabilidade de inundação obtida pela da propagação das incertezas na modelagem hidráulica e da quantificação dos danos.
- Utilizar os modelos de distribuição de probabilidade dos parâmetros de brecha em estudos de barragens de armazenamento de rejeitos, inserindo a análise de incertezas do volume mobilizado em razão dos parâmetros ligados a reologia do material e aos esforços solicitantes e resistentes.
- Discussão mais aprofundada da equifinalidade nos valores da vazão de pico dos hidrogramas e estudos para definição da probabilidade conjunta com outros parâmetros do hidrograma como por exemplo tempo de pico, tempo de base e volume propagado.
- Uso e/ou desenvolvimento de modelos probabilísticos, algoritmos e rotinas de cálculo que rodam em paralelo, reduzindo o tempo de processamento da simulação, permitindo uma análise probabilística mais ampla, que inclua os efeitos de inundação a jusante e menos dispendiosa de tempo.

Como recomendações gerais dos estudos de ruptura hipotética de barragens, baseado na experiência adquirida durante o desenvolvimento da pesquisa recomenda-se

- Aprofundamento nos estudos relacionados aos aspectos físicos da formação das brechas de ruptura a fim de garantir factibilidade aos valores sorteados ao mesmo tempo que consiga representar as incertezas relativas ao problema. A discussão dos resultados demonstra que os modelos de distribuição conseguiram representar a variabilidade observada nas amostras dos parâmetros de brecha, porém a variabilidade observada para a taxa de erosão linear não foi igualmente representada, sendo esse um parâmetro que poderia ser explorado em outras análises.
- Desenvolvimento de técnicas para comunicação dos resultados da análise probabilística e seus efeitos para a tomada de decisão baseada em estudos probabilísticos. Essas técnicas devem incluir os tomadores de decisão, fiscalizadores, políticos e a população potencialmente atingida.
- Provar os benefícios de uma tomada de decisão na gestão de segurança associada a inundação provocada pela ruptura de uma barragem com base em análises probabilísticas.
- Revisar futuramente a análise comparativa por grupos a partir de amostras com maior número de observações e variabilidade de condições, quando essas estiverem disponíveis. Essa análise aumentaria a probabilidade de acerto das constatações observadas e poderia apresentar novos resultados, distintos daqueles aqui apresentados. Ressalta-se que esse não é um aspecto trivial e demanda um longo período de observação para ampliação das amostras de casos históricos.
- Avaliar pertinência de aplicar um método Bayesiano para o sorteio aleatório dos parâmetros de brecha utilizando informações da taxa de erosão global dos casos históricos de ruptura.
- Desenvolver método empírico de previsão de largura da brecha aplicando a forma do vale como variável explicativa. Essa variável se mostrou promissora para

explicar esse parâmetro, não sendo observado na literatura de referência estudos que explorem esse aspecto.

REFERÊNCIAS

- AHMADISHARAF, E.; KALYANAPU, A. J.; THAMES, B. A.; LILLYWHITE, J. A probabilistic framework for comparison of dam breach parameters and outflow hydrograph generated by different empirical prediction methods. *Environmental Modelling & Software*, v. 86, p. 248–263, dez. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.022>>.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 19, n. 6, p. 716–723, dez. 1974. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1100705/>>.
- AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. *Turkish Journal of Emergency Medicine*, v. 18, n. 3, p. 91–93, set. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452247318302164>>.
- ALTINAKAR, M. S.; MCGRATH, M. Z.; RAMALINGAM, V. P.; SHEN, D.; SANABRIA, Y. S.; MATHEU, E. E. Uncertainty in Two-Dimensional Dam-Break Flood Modeling and Consequence Analysis. 2013, Graz, Austria: Austrian National Committee on Large Dams, 2013. p. 255–270.
- ASCE/EWRI. Earthen Embankment Breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 137, n. 12, p. 1549–1564, dez. 2011. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000498>>.
- BELLOS, V.; TSAKIRIS, V. K.; KOPSIAFTIS, G.; TSAKIRIS, G. Propagating Dam Breach Parametric Uncertainty in a River Reach Using the HEC-RAS Software. *Hydrology*, v. 7, n. 4, p. 72, 3 out. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2306-5338/7/4/72>>.
- BERNARD-GARCIA, M.; MAHDI, T.-F. A Worldwide Historical Dam Failure's Database. Montreal, Canadá. Disponível em: <<https://dataverse.scholarsportal.info/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.5683/SP2/E7Z09B>>. , 2020
- BERTALANFFY, L. VON. *General Systems Theory*. Nova Iorque: Braziller, 1968.
- BEVEN, K. *Environmental Modelling: An uncertain future?* 1. ed. [S.l.]: Routledge, 2009.
- BEVEN, K.; HALL, J. *Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management*. 1. ed. Londres: Imperial College Press, 2014.
- BONFERRONI, C. E. *Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità*. R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze. [S.l.: s.n.], 1936.
- BRUNNER, G. Using HEC-RAS for Dam Break Studies. *Association of State Dam Safety Officials - 2009 Dam Safety*, n. August, 2014. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84876361807&partnerID=40&md5=dfcbf4adad65f78943b9945d7689f84d>>.
- BRUNNER, G. L. *HECRAS—River analysis system user's manual, version 3.1*. [S.l.: s.n.], 2002.
- CEATI. Evaluation of Numerical Models for Simulating Embankment Dam Erosion and Breach Processes. n. August, 2017.
- CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. [S.l.]: McGraw-

Hill, 1988.

CHRISTOPHER GOODELL. *User's Manual McBreach by Kleinschmidt*. . Portland: [s.n.], 2019.

CNRH. RESOLUÇÃO Nº 144. . Brasil: [s.n.], 2012

DELIGNETTE-MULLER, M. L.; DUTANG, C. fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*, v. 64, n. 4, 2015. Disponível em: <<http://www.jstatsoft.org/v64/i04/>>.

DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241–252, ago. 1964. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1964.10490181>>.

FERENTCHAK, J. A.; JAMIESON, S. L. Using Erosion Rate to Refine Earth Dam Breach Parameters. 2008, Lexington, KY: Association of State Dam Safety Officials - ASDO, 2008. p. 14.

FREAD, D. L.; LEWIS, J. M. NWS FLDWAV Model: Theoretical Description and User Documentation. *National Weather Service – NWS – NOAA, Office of Hydrology, Hydrologic Research Laboratory*, p. 335, 1998.

FROEHLICH, D. Empirical model of embankment dam breaching. 24 jun. 2016, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 24 jun. 2016. p. 1821–1826. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9781315644479-285>>.

FROEHLICH, D. C. Embankment-Dam Breach Parameters. 1987, Williamsburg, Virginia: American Society of Civil Engineers, 1987. p. 570–575.

FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1708–1721, dez. 2008. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282008%29134%3A12%281708%29>>.

FROEHLICH, D. C. Peak Outflow from Breached Embankment Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 121, n. 1, p. 90–97, jan. 1995. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281995%29121%3A1%2890%29>>.

FROEHLICH, D. C.; GOODELL, C. R. Breach of Duty (Not): Evaluating the Uncertainty of Dam-Breach Flood Predictions. 17 maio 2012, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 17 maio 2012. p. 1203–1212. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784412312.122>>.

GOODELL, C. *et al.* Probabilistic dam breach modeling using hec-ras and McBreach. 2018, Miami: United States Society on Dams, 2018. p. 11.

JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. Investigation of Flow Failures of Tailings Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n. 2, p. 172–189, dez. 1983. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281983%29109%3A2%28172%29>>.

KALININA, A.; SPADA, M.; VETSCH, D. F.; MARELLI, S.; WHEALTON, C.; BURGHERR, P.; SUDRET, B. Metamodeling for Uncertainty Quantification of a Flood Wave Model for Concrete Dam Breaks. *Energies*, v. 13, n. 14, p. 3685, 17 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/14/3685>>.

- KENNEDY, M. C.; O'HAGAN, A. Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, v. 63, n. 3, p. 425–464, 2001. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1467-9868.00294>>.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583, dez. 1952. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2280779?origin=crossref>>.
- LARA, P. G. DE. *Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens*. 2016. 177 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- LUO, Y. *et al.* Review of dam-break research of earth-rock dam combining with dam safety management. 2012, [S.l: s.n.], 2012. p. 382–388.
- MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE- MONOPOLIS, J. Breaching Characteristics of Dam Failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 110, n. 5, p. 567–586, maio 1984. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281984%29110%3A5%28567%29>>.
- MORRIS, M. W. *Breaching of Earth Embankments and Dams*. 2013. 338 f. 2013.
- MORRIS, M. W.; HASSAN, M.; KORTENHAUS, A.; GEISENHAINER, P.; VISSER, P. J.; ZHU, Y. Modelling breach initiation and growth. *Flood Risk Management: Research and Practice*, p. 581–591, 2009.
- MORRIS, MARK. Breach Initiation & Growth: Physical Processes ANALYSIS OF IMPACT PROJECT BREACH FIELD TESTS. *FLOODsite Project Report , T06-08-11*, p. 1–123, 2009.
- MORRIS, MARK; HANSON, G.; HASSAN, M. Improving the accuracy of breach modelling: why are we not progressing faster? *Journal of Flood Risk Management*, v. 1, n. 3, p. 150–161, 2008.
- NETO, L. V.; BAPTISTA, M. B. Estudo de cenários de rupturas de barragens e impactos nas manchas de inundação utilizando base topográfica srtm e aerolevantamento a laser lidar. 2018, Buenos Aires: IAHR, 2018. p. 2.
- PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K. J. Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, v. 42, n. 5, p. 1–8, maio 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2005WR004820>>.
- PATÉ-CORNELL, M. E. Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 54, n. 2–3, p. 95–111, nov. 1996. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832096000671>>.
- PETER, S. J. Dam Break Analysis under Uncertainty. ETH Zurich. Switzerland. p. 161, 2017.
- PETRASCHECK, A. W.; SYDLER, P. A. Routing of dam break floods. *International Water Power and Dam Construction*, v. 36, p. 29–32, 1984.
- POWLEDGE, G. R.; RALSTON, D. C.; MILLER, P.; CHEN, Y. H.; CLOPPER, P. E.; TEMPLE, D. M. Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II: Hydraulic and Design Considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 115, n. 8, p. 1056–1075, 1989.
- POWLEDGE, G. R.; RALSTON, D. C.; MILLER, P.; CHEN, Y. H. Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. I: Research Activities. *Journal of Hydraulic*

Engineering, v. 115, n. 8, p. 1040–1055, 1989.

RAZAVI, S.; JAKEMAN, A.; SALTELLI, A.; PRIEUR, C.; IOOSS, B.; BORGOVO, E.; PLISCHKE, E.; PIANO, S. L.; IWANAGA, T.; BECKER, W.; TARANTOLA, S.; GUILLAUME, H. A.; JAKEMAN, J.; GUPTA, H.; MELILLO, N.; RABITTI, G.; CHABRIDON, V.; DUAN, Q.; MAIER, H. R. The Future of Sensitivity Analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support. *Environmental Modelling & Software*, v. 137, n. December 2020, p. 104954, mar. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815220310112>>.

RESENDE, A. P. DE; ROCHA, F. F.; PALMIER, L. R. Incerteza De Parâmetros De Formação De Brecha Em Barragens – Estudo De Caso : Barragem Da Pampulha. 2015, Brasília: [s.n.], 2015. p. 8.

RITTER, A. *The propagation of water waves*. 1892. 1892.

ROBERTSON, P. K.; MELO, L.; WILLIAMS, D.; WILSON, G. W. *Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão dam I*. [S.l: s.n.], 2019.

ROSENBLUETH, E. Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 72, n. 10, p. 3812–3814, 1 out. 1975. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.72.10.3812>>.

ROSGEN, D. *Applied River Morphology*. 2. ed. Lakewood: Wildland Hydrology, 1996.

ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. *CATENA*, v. 22, n. 3, p. 169–199, jun. 1994. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0341816294900019>>.

SALTELLI, A.; BAMMER, G.; BRUNO, I.; CHARTERS, E.; FIORI, M. D.; DIDIER, E.; ESPELAND, W. N.; KAY, J.; PIANO, S. L.; MAYO, D.; JUNIOR, R. P.; PORTALURI, T.; PORTER, T. M.; PUY, A.; RAFOLS, I.; RAVETZ, J. R.; REINERT, E.; SAREWITZ, D.; STARK, P. B.; STIRLING, A.; SLUIJS, J. V. D.; VINEIS, P. Five ways to ensure that models serve society: a manifesto. *Nature*, v. 582, n. 7813, p. 482–484, 24 jun. 2020. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32581374/>>.

SCHLICHTING, H. *Boundary Layer Theory*. [S.l: s.n.], 1979. v. 7.

SCHUBERT, J. E.; SANDERS, B. F.; SMITH, M. J.; WRIGHT, N. G. Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding. *Advances in Water Resources*, v. 31, n. 12, p. 1603–1621, dez. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170808001279>>.

SCHWARZ, G. Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, v. 6, n. 2, 1 mar. 1978. Disponível em: <<https://projecteuclid.org/journals/annals-of-statistics/volume-6/issue-2/Estimating-the-Dimension-of-a-Model/10.1214/aos/1176344136.full>>.

SINGH, K. P.; SNORRASON, A. Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models. *Journal of Hydrology*, v. 68, n. 1–4, p. 295–310, fev. 1984. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022169484902178>>.

SINGH, V. P. *Dam Breach Modeling Technology*. 17. ed. Baton Rouge, EUA: [s.n.], 1996. v. 53.

SILVA, A. A. C. L.; BEZERRA, R. P.; ELEUTÉRIO, J. C. (2021). “Automatização do HEC-RAS para geração probabilística de hidrogramas de ruptura de barragens por

galgamento". XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil. 11 p.

THUN, L. VON; GILLETTE, D. R. *Guidance on breach parameters*. . Denver, Colorado: [s.n.], 1990.

TSCHIEDEL, A. DA F.; PAIVA, R. C. D. DE. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. *RBRH*, v. 23, 30 jul. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312018000100229&lng=en&tlng=en>.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre, Brasil: [s.n.], 1998.

USACE. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*. . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <[https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 5.0 Users Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf)>.

USBR. *Design of small dams*. [S.l: s.n.], 1987.

VIANINI NETO, L. *Estudo de ruptura da barragem da pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais*. 304 f. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. 2016.

WAHL, T. L. Dam Breach Modeling – an Overview of Analysis Methods. *2nd Joint Federal Intragency Conference Las Vegas, NV*, p. 1–12, 2010.

WAHL, T. L.; HANSON, G. H.; COURIVAUD, J. R.; MORRIS, M. W.; KAHAWITA, R.; MCCLENATHAN, J. T.; GEE, D. M. Development of next-generation embankment dam breach models. *28th Annual USSD Conference "The Sustainability of Experience - Investing in the Human Factor"*, n. January, p. 767–779, 2008.

WAHL, T. L. *Evaluation of Erodibility-Based Embankment Dam Breach Equations*. . Denver, Colorado: [s.n.], 2014.

WAHL, T. L. *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters A Literature Review and Needs Assessment*. . [S.l: s.n.], 1998. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/TechDev/DSOTechDev/DSO-98-04.pdf>>.

WAHL, T. L. Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 5, p. 389–397, maio 2004. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282004%29130%3A5%28389%29>>.

WAN;, C. F.; FELL, R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 130, n. 4, p. 373–380, 2004.

WANG, X.; CHEN, W.; ZHOU, Z.; ZHU, Y.; WANG, C.; LIU, Z. Three-dimensional flood routing of a dam break based on a high-precision digital model of a dense urban area. *Natural Hazards*, v. 86, n. 3, p. 1147–1174, 2017.

WASHINGTON STATE. *Dam Safety Guidelines Technical Note 1 - Dam Break Inundation Analysis And Downstream Hazard Classification*. [S.l: s.n.], 2007.

WHITE, F. M. *Fluid mechanics*. 3º ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1994.

XU, Y.; ZHANG, L. M. Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 135, n. 12, p. 1957–1970, dez. 2009. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943->

5606.0000162>.

ZENZ, G.; GOLDGRUBER, M. ICOLD Proceeding, 12th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. 2013.

ZHANG, L. *et al. Dam failure mechanisms and risk assessment*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2016.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS ANTERIORES APLICADOS NO CASO EM ANÁLISE

Estão apresentados a seguir a interpretação dos estudos desenvolvidos no contexto do *Benchmark* proposto pelo ICOLD (ZENZ & GOLDGRUBRER, 2013) e o estudo desenvolvido por PETER (2017).

DAVISON et al. (HRW)

A estimativa do hidrograma induzido pela ruptura hipotética da barragem foi realizada por DAVISON *et al.* a partir do modelo EMBREA. Trata-se de um modelo fisicamente baseado e capaz de simular o processo de erosão superficial e o *headcut* a partir dos coeficientes de erodibilidade (K_d) e migração para o *headcut* (C). A partir das características geotécnicas fornecidas, os autores julgaram que o conteúdo de material coesivo no maciço é suficiente para que o *headcut* fosse o processo erosivo predominante em um evento de ruptura por galgamento.

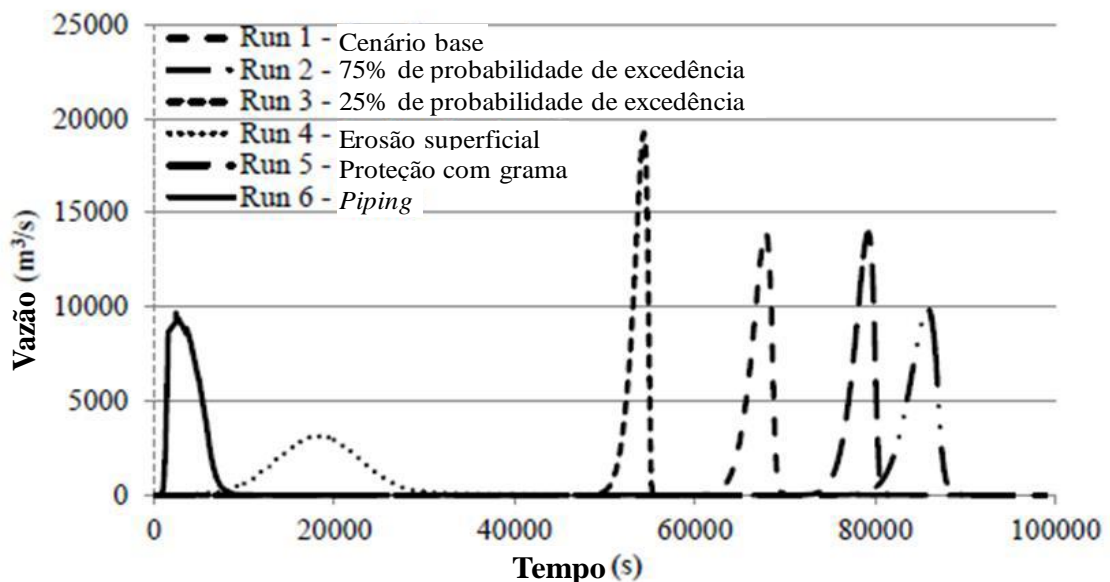
Os autores discutem sobre as incertezas nos valores dos parâmetros do modelo aplicado e, por isso, realizam uma análise de sensibilidade para a simulação. Foram utilizados diferentes conjuntos de valores para os parâmetros do modelo de erosão por *headcut*, alterando o processo erosivo, considerando apenas erosão superficial, adicionando uma proteção de grama no talude e alterando o modo de falha para *piping*. Ao todo foram desenvolvidos seis cenários de simulação, sendo os três primeiros referentes ao processo de *headcut* com parâmetros extraídos de distribuição de probabilidade triangular e do manual do modelo.

O cenário base, escolhido para as demais avaliações do estudo, foi aquele resultante da simulação do processo de *headcut* com os valores médios dos parâmetros. O hidrograma de ruptura desse cenário apresenta uma vazão de pico da ordem de 13.700 m³/s, com um tempo para alcance do pico de aproximadamente 19 horas. Desse tempo, por volta de 17h são necessárias para que o processo de erosão se

desenvolva e dê início a um processo irreversível de ruptura, com a formação da brecha.

A Figura A.1 apresenta os hidrogramas resultantes da análise de sensibilidade desenvolvida. As simulações de 1 a 3 são referentes a modelagem do processo de *headcut* com diferentes parâmetros. A simulação 4 corresponde a um cenário que considera apenas a erosão superficial com os parâmetros médios da amostragem. Já o cenário 5 se refere a um cenário em que se considera uma proteção de grama nos taludes, enquanto o cenário 6 testa a ruptura por *piping*.

Figura A.1 – Hidrogramas resultantes da análise de DAVISON *et al.* (2013)



Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

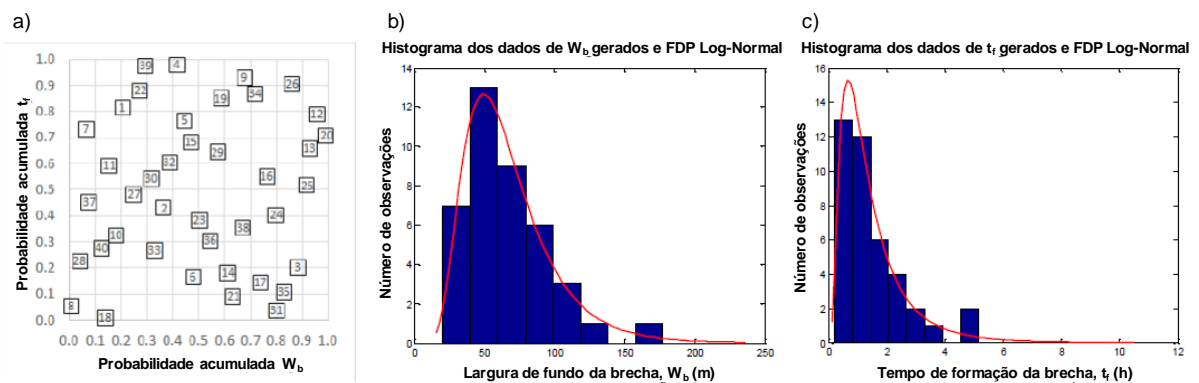
ALTINAKAR *et al.* (MUST)

ALTINAKAR *et al.* desenvolveram uma análise probabilística para a estimativa do hidrograma defluente da ruptura hipotética do estudo de caso de referência. Os autores aplicaram o *Latin Hypercube Sampling* (LHS) para realizar o processo de amostragem da largura de fundo (W_b) e tempo de formação (T_f) das brechas, parâmetros considerados como variáveis aleatórias. Foram desenvolvidas 40 iterações com diferentes conjuntos de parâmetros de brecha.

O modelo de distribuição de probabilidade Log-Normal (com base 10) foi adotado no processo de amostragem dos parâmetros considerados como variáveis aleatórias. Os parâmetros desse modelo foram definidos a partir dos valores estimados pelo modelo empírico de previsão de brecha proposto por FROELICH (1995) considerando os intervalos de confiança de 95% estabelecido por (WAHL, 2004).

O LHS foi configurado para realizar o sorteio dos parâmetros de modo a obter a maior distância entre os pares de valores, reduzindo o número de amostras dos parâmetros necessárias para a simulação. Essa técnica foi aplicada para garantir que, mesmo com um número relativamente baixo de repetições, fosse possível realizar o sorteio de grande parte das combinações de parâmetros. A Figura A.2 apresenta a dispersão dos valores dos parâmetros associadas as respectivas probabilidades de superação, bem como os histogramas dos parâmetros sorteados em conjunto com os modelos de distribuição de probabilidade adotados.

Figura A.2 – Processo de amostragem dos parâmetros considerados como variáveis aleatórias por ALTINAKAR et al (2013)



a) LHS projetado para obter a maior distância entre os pares; **b)** Histograma dos valores da largura de fundo da brecha aleatoriamente selecionados e distribuição Log-Normal selecionada; **c)** Histograma dos valores do tempo de formação da brecha aleatoriamente selecionados e distribuição Log-Normal selecionada

Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

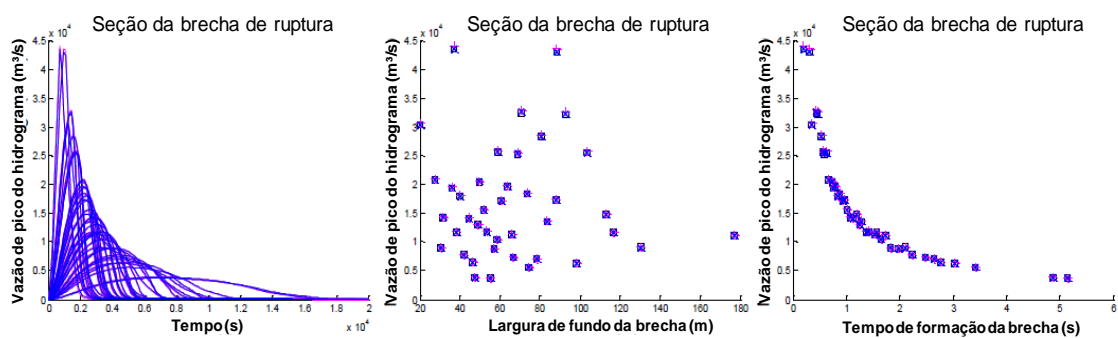
Os hidrogramas de ruptura resultantes da análise probabilística realizada por ALTINAKAR *et al.* estão apresentados na Figura A.3. Os autores selecionaram o hidrograma com vazão de pico mediana para dar continuidade as análises de consequências. O hidrograma apresenta vazão de pico de aproximadamente 12.000

m^3/s . O tempo de pico foi da ordem de 0,5 hora. Para a síntese dos hidrogramas os autores utilizaram o modelo paramétrico de simulação da brecha do modelo computacional DSS-WISE, desenvolvido pelo Centro Nacional de Hidrociência Computacional e Engenharia (*National Center for Computational Hydroscience and Engineering – NCCHE*) da Universidade do Mississippi, Estados Unidos.

Os autores também realizaram uma análise de sensibilidade em relação ao parâmetro hidráulico do modelo (coeficiente de Manning) e concluíram que esse parâmetro possui pouca influência na definição dos hidrogramas de ruptura. Essa avaliação também pode ser vista na Figura A.3. Os diferentes cenários de Manning foram representados nos gráficos a partir de cores e formas dos marcadores (quadrados pretos para valores do DSS-WISE, cruz rosa para valores da FEMA HAZUS e xis azul para valores da NOAA C-CAP).

Os autores ainda fizeram uma análise de correlação entre a vazão de pico dos hidrogramas e os parâmetros de brecha considerados como variáveis aleatórias. Observou-se uma correlação logarítmica bastante acentuada entre os valores de vazão de pico e de tempo de formação da brecha. Já a largura de fundo da brecha não apresentou uma correlação bem definida, conforme também pode ser observado na Figura A.3.

Figura A.3 – Hidrogramas de ruptura obtidos por ALTINAKAR et. al (2013)



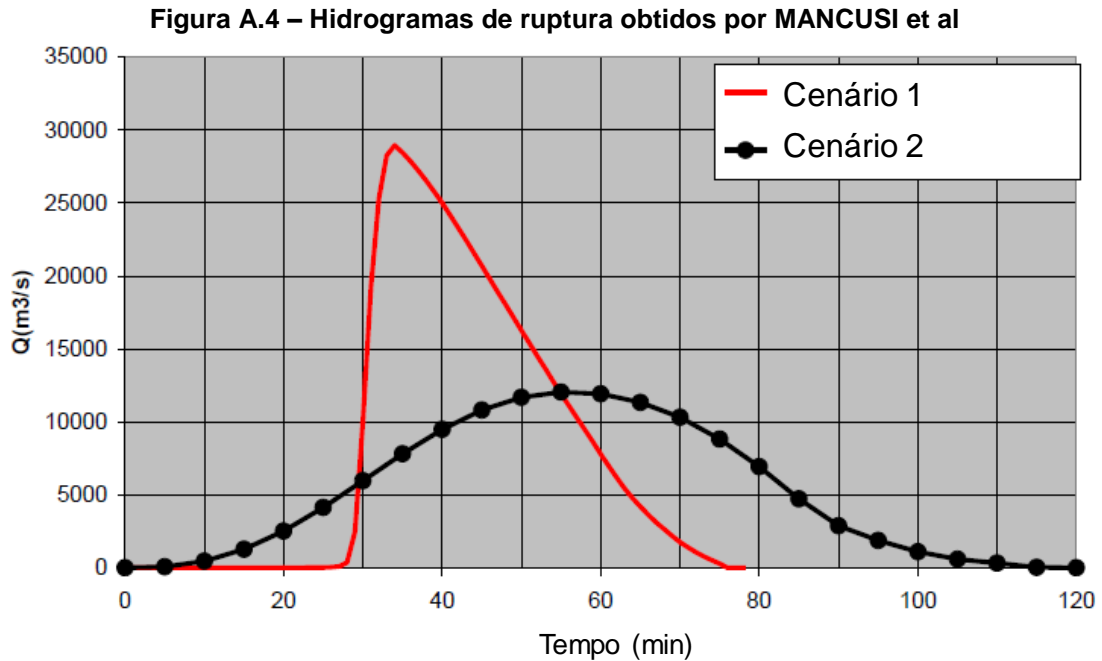
Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

MANCUSI et al. (MANC)

O hidrograma resultante da análise de ruptura hipotética desenvolvida por MANCUSI *et al.* foi desenvolvido a partir da aplicação do modelo fisicamente baseado proposto por MOLINARO (1986). A taxa de erosão da brecha é avaliada a partir da relação de transporte de sedimentos proposta por ENGELUND & HANSEN (1972), cujo parâmetro principal é o diâmetro característico do material de preenchimento do maciço. Os autores consideram que esse é um cenário de simulação associado a uma barragem facilmente erodível.

Um cenário alternativo (cenário 2), associado a uma barragem resistente a erosão também foi desenvolvido como uma análise de sensibilidade. O modelo empírico de previsão de brecha proposto por MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984) foi adotado. Como critério para escolha do modelo, foi feita a seleção da daquele que, dentre os modelos empíricos testados, resultou no maior tempo de formação da brecha de ruptura. Para simulação da abertura da brecha nesse caso foi aplicado o modelo paramétrico HEC-RAS.

Os dois hidrogramas de ruptura resultantes estão apresentados na Figura A.4. O hidrograma utilizado como referência para o desenvolvimento das demais análises foi aquele estimado a partir do modelo fisicamente baseado (cenário 1). Esse apresentou vazão de pico da ordem de 29.000 m³/s, com tempo de pico próximo a 35 minutos, sendo necessários quase 30 minutos para o início do processo irreversível de formação da brecha.



Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

Saberi et al. (SAB)

O modelo BREACH GUI foi utilizado por SABERI *et al.* para a simulação da formação de brecha na barragem, estimando o hidrograma defluente, vazão máxima de saída, o tempo de início da abertura da brecha e o tempo de pico de vazão de saída. O modelo utilizado foi inicialmente desenvolvido por FREAD (1988) com apoio do Serviço Nacional do Clima (*National Weather Service – NWS*) dos Estados Unidos. Trata-se de um modelo fisicamente baseado que utiliza os princípios da hidráulica, transporte de sedimentos e mecânica dos solos para simulação do processo erosivo de formação de brecha. Informações geométricas da barragem, as características dos materiais de preenchimento e do reservatório são usadas como dados de entrada do modelo.

Os principais parâmetros de entrada do modelo são o diâmetro médio (D_{50}), o índice de plasticidade média, o coeficiente de tensão cisalhante crítica e a porosidade do material de preenchimento da barragem. Características geométricas como as cotas de crista e fundação da barragem e a declividade dos taludes de montante e jusante

também necessários. Em relação as características do reservatório é preciso definir a relação cota-área.

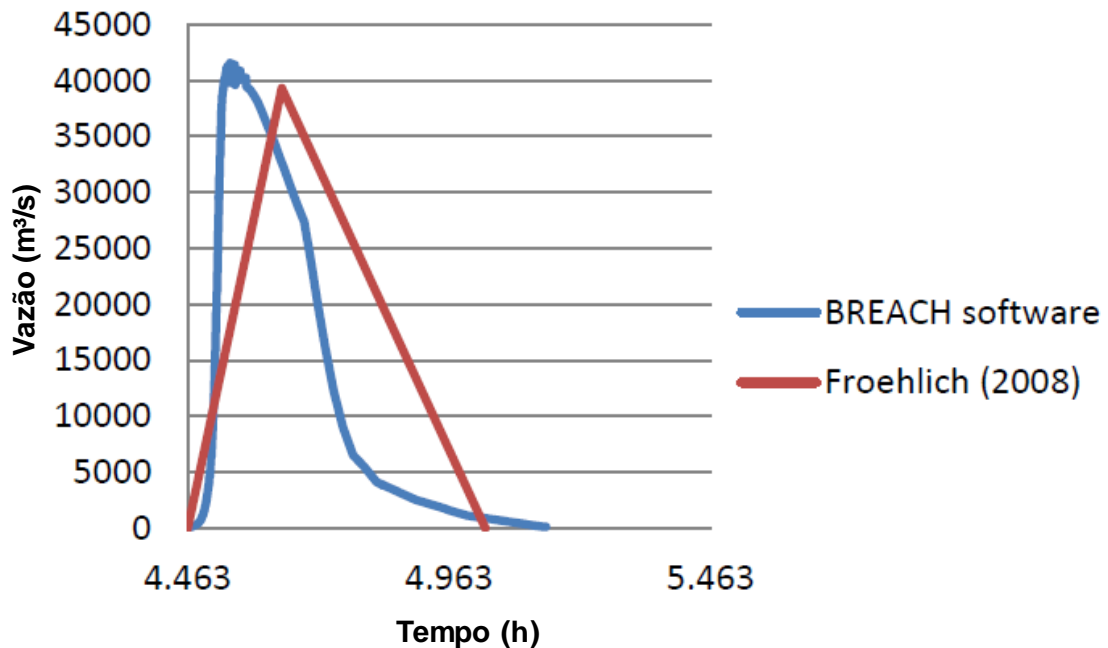
Um resumo dos resultados da estimativa do hidrograma defluente da ruptura hipotética da barragem a partir da aplicação do BREACH está apresentado na Tabela A.1. Uma análise de sensibilidade também foi desenvolvida pelos autores, comparando o hidrograma resultante da modelagem fisicamente baseada com o hidrograma estimado a partir do modelo empírico de previsão da vazão de pico proposto por FROEHLICH (2008). Assumiu-se o formato triangular para o hidrograma empírico, com tempo de pico igual ao tempo de formação da brecha estimado também pelo modelo de previsão proposto por FROEHLICH (2008). A Figura A.5 apresenta os dois hidrogramas resultantes.

Tabela A.1 – Síntese de resultados da modelagem de ruptura desenvolvida por SABERI *et al.* a partir da aplicação do BREACH

Vazão de pico do hidrograma (m³/s)	41.600
Tempo para pico de vazão (h)	4,62
Tempo para início da ruptura (h)	4,44
Altura final da brecha (m)	61
Largura de topo da brecha (m)	250
Tempo para alcance da cota de fundo da brecha (h)	4,97
Largura de fundo da brecha (m)	15

Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

Figura A.5 – Hidrogramas de ruptura obtidos por SABERI *et al* (2013)



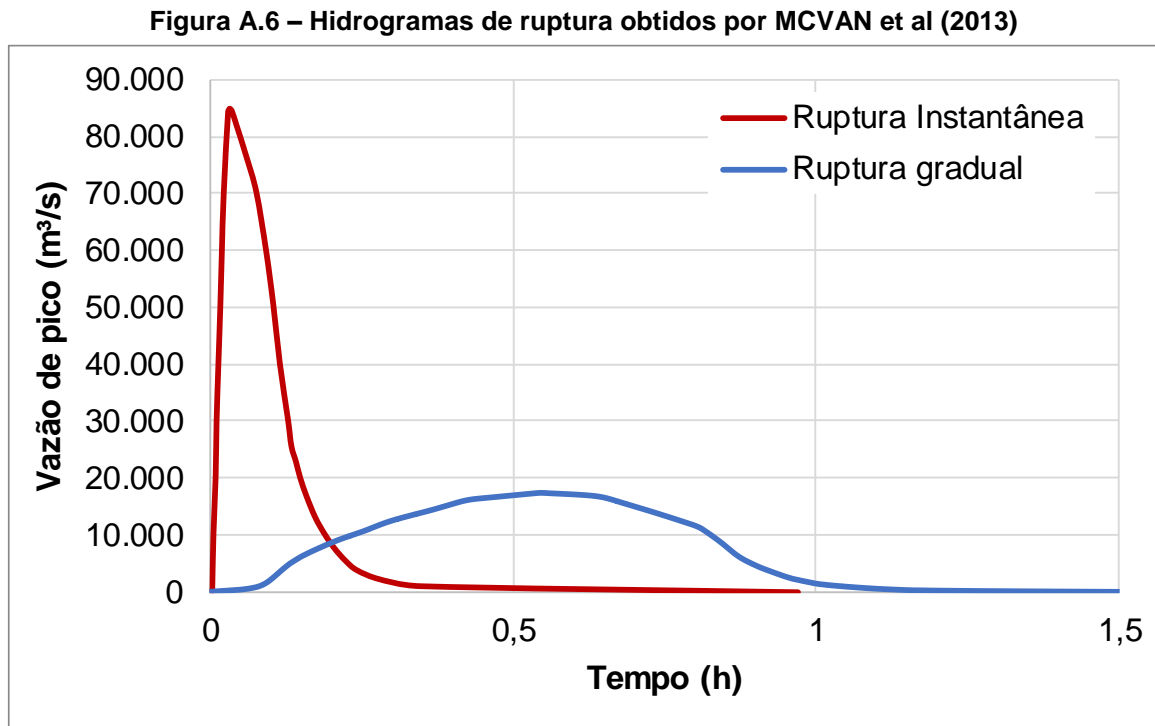
Fonte: ZENZ AND GOLDGRUBER (2013)

MCVAN *et al.* (MCV)

A estimativa do hidrograma de ruptura defluente da análise realizada por MCVAN *et al.* foi realizada por meio do modelo paramétrico de simulação da abertura de brecha. Foi utilizado o modelo computacional ADH, desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento e Pesquisa do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Engineer Research and Development Center - ERDC). Os parâmetros da brecha de ruptura foram estimados a partir do modelo empírico de previsão proposto por FROEHLICH (1995).

Um cenário adicional, considerado como catastrófico, foi desenvolvido para promover uma análise de sensibilidade da avaliação. Nesse cenário foi considerada a ruptura instantânea de toda a barragem, o que pode ser definido como o pior cenário possível. A vazão de pico do hidrograma resultante da ruptura gradual foi de 17.357 m³/s, sendo observado após 33 minutos do início da ruptura. Já a vazão máxima defluente da

ruptura instantânea foi de 83.828 m³/s, sendo observada 1 segundo após a ruptura. A Figura A.6 apresenta os hidrogramas resultantes da análise.



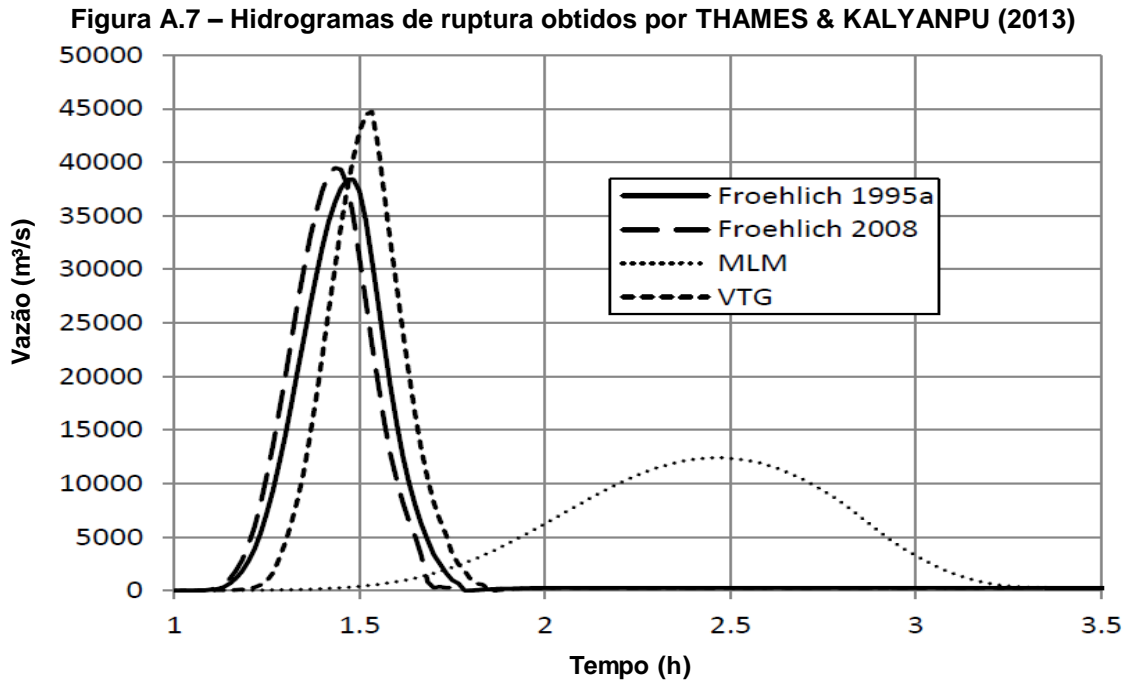
Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

THAMES & KALYANPU (TK)

A partir do uso do modelo paramétrico de simulação de brecha do HEC-RAS, THAMES & KALYANPU defiram o hidrograma defluente da ruptura hipotética da barragem em análise. Os parâmetros de brecha foram estimados a partir de uma análise de sensibilidade dos resultados provenientes da aplicação de diferentes modelos empíricos de previsão. O modelo proposto por FROEHLICH (1995) foi selecionado como o melhor desempenho. Portanto, o hidrograma resultante da aplicação desse modelo foi escolhido para a sequência da avaliação.

Ao todo foram testados quatro modelos empíricos de previsão de brecha, sendo eles: i) FROEHLICH (1995), ii) FROEHLICH (2008), iii) MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS – MLM (1984) e iv) VON THUN & GILLETTE – VTG (1990). O hidrograma associado a formação da brecha de ruptura estimada a partir do modelo

de FROEHLICH (1995), selecionado como o modelo de previsão de brecha de melhor desempenho, apresenta vazão máxima da ordem de 38.000 m³/s e tempo para alcance do pico próximo a 1,5 horas. A Figura A.7 apresenta os hidrogramas resultantes da análise de sensibilidade desenvolvida por THAMES & KALYANPU.



Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

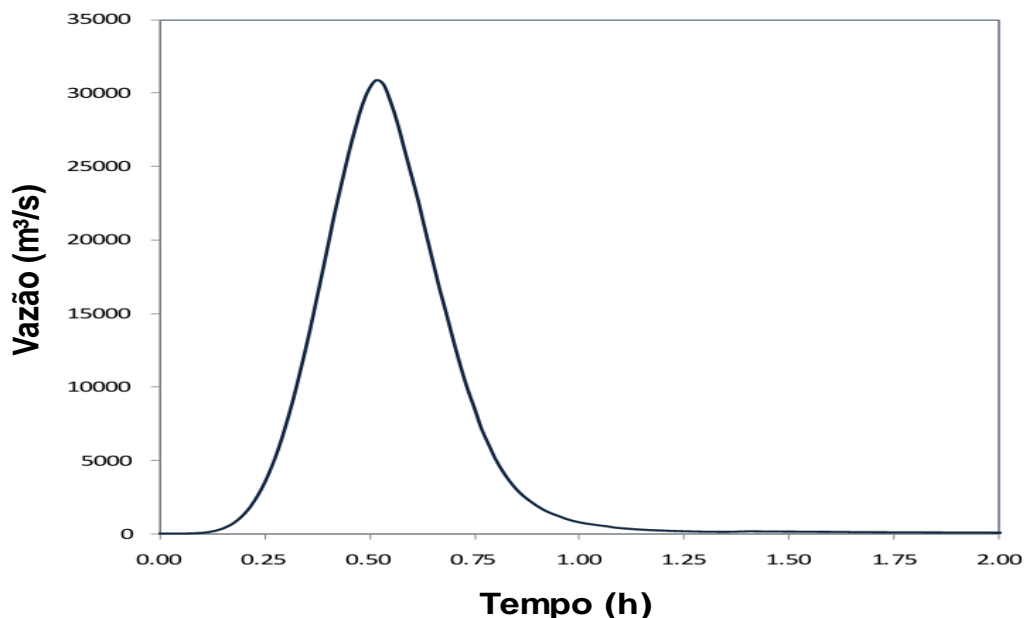
WILLIAMS & BUCHANAN (MMC)

O hidrograma de ruptura estimado por WILLIAMS & BUCHANAN foi proveniente da aplicação do modelo paramétrico do HEC-RAS a partir dos parâmetros de brechas estimados pelo modelo empírico de previsão proposto por FROEHLICH (1955). A escolha pelo modelo de previsão foi realizada a partir de uma análise crítica de diversos modelos empíricos de previsão, sendo o modelo selecionado considerado como aquele de melhor desempenho.

O hidrograma resultante apresenta uma vazão de pico da ordem de 31.000 m³/s. O tempo para observar a vazão máxima do hidrograma é da ordem de 35 minutos. A

Figura A.8 apresenta o hidrograma obtido por WILLIAMS & BUCHANAN durante sua análise de ruptura hipotética do estudo de caso de referência.

Figura A.8 – Hidrograma de ruptura obtido por WILLIAMS & BUCHANAN (2013)



Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER (2013)

PETER (2017)

A estimativa do hidrograma resultante da ruptura hipotética do estudo de caso em análise foi desenvolvido por PETER (2017) a partir de um modelo fisicamente baseado. O modelo BASEbreach, desenvolvido no contexto de sua pesquisa, é classificado pelo autor como um modelo paramétrico que incorpora conceitos físicos chave do fenômeno de ruptura de barragens. Como exemplo, o autor cita o alargamento da brecha de ruptura em função da erosão do material da barragem. No contexto da presente pesquisa, esse modelo seria classificado como fisicamente baseado, uma vez que os parâmetros de brecha de ruptura são resultantes da análise e não dados de entrada do modelo.

O modelo representa a formação de uma brecha de ruptura em decorrência do galgamento a partir de quatro conjuntos de equações que descrevem os seguintes aspectos da simulação

- i. Erosão gradual do material;
- ii. Consequente alargamento da brecha;
- iii. Aumento da vazão defluente;
- iv. Deplecionamento do reservatório.

A estimativa das vazões de saída e consequente deplecionamento do reservatório é realizada a partir da solução de um sistema de duas equações ordinárias diferenciais que representam as equações da continuidade. O processo de alargamento da brecha é simulado em duas estágios no tempo, sendo o primeiro dominado pela erosão vertical e o segundo pela erosão lateral, iniciada quando a brecha sua cota de fundo. A taxa de transporte de sedimentos, que representa a erosão gradual do material, é calculada por uma adaptação da equação empírica de transporte de sedimentos, conforme apresentado a seguir.

$$q_s = \gamma \cdot u^v \cdot r_h^\eta$$

onde: q_s = taxa de sedimentos; γ = coeficiente de escala global; u = velocidade do escoamento; r_h = raio hidráulico da brecha; v e η = expoentes que combinam as formulações de transporte e as leis de atrito

Para a definição dos expoentes da equação de transporte de sedimentos, o autor aplicou um método probabilístico utilizando técnicas da estatística Bayesiana. Inicialmente o autor selecionou 15 casos de ruptura relatados na literatura para o ajuste dos parâmetros e promoveu o acréscimo de informação de mais 12 casos de ruptura para atualização do modelo com base na metodologia Bayesiana. Após o processo de ajustes dos parâmetros, o modelo ficou da seguinte maneira.

$$q_s = \gamma \cdot u^{4,4} \cdot r_h^{-0,77}$$

Com o modelo ajustado, o autor desenvolveu um processo de simulação da abertura da brecha de ruptura baseado em uma abordagem probabilística. Foram geradas 5.000 iterações a partir do Método de Monte Carlo variando três parâmetros de

modelagem, sendo eles o fator de forma do reservatório ($\alpha \sim U(2,5; 3,2)$), o ângulo lateral da brecha ($\beta \sim U(50^\circ; 85^\circ)$) e o coeficiente de escala do transporte de sedimentos ($\gamma \sim LN(-8,8; 0,75)$). Os intervalos dos modelos distributivos Uniformes foram definidos a partir do julgamento do autor, considerando os valores adotados como fisicamente factíveis. Já os valores do modelo Log-Normal foram ajustados pelo processo Bayesiano. A altura da brecha foi considerada igual a, no máximo, 50 m. Os demais parâmetros de entrada seguiram as informações geométricas da barragem e do reservatório

**APENDICE B – BASE DE DADOS HISTÓRICOS DE RUPTURA DE BARRAGENS
UTILIZADOS NA PESQUISA EXTRAÍDOS DO BANCO DE DADOS DE
REFERÊNCIA CONSTRUÍDO POR BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020)**

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
1	33	ALGODÕES DAM	BR	0,00	0,23		0,06	21,30	840,00	EI	TNU	SIM	ND	M	M	M	INT
2	70	APISHAPA	US	0,16	0,91	0,75	0,46	34,14	178,60	EI	TNU	SIM	EA	G	G	M	EST
3	75	ARCADIA WOODS DAM	US	13,22	0,11			6,40		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
4	91	ASHERVILLE	US		0,30			15,20		PC	ND	ND	ND	ND	M	ND	ND
5	133	BAIMIKU	CN	0,00	1,00			8,00		GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	ND
6	148	BAKER POND	US		1,29			4,27		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
7	151	BALDWIN HILLS RESERVOIR DAM	US	0,66	0,30	1,00	0,00	71,00	198,00	EI	HOM	NÃO	EA	MG	MG	P	EST
8	157	BALSAM'S	US	2,50	1,00		0,00	18,30	91,40	GG	HOM	NÃO	ND	ND	M	ND	EST
9	163	BANQIAO RESERVOIR DAM	CN	2,67	1,24	5,50	0,10	24,50	2020,00	GG	ZON	NÃO	EA	MG	M	MG	LRG
10	165	BARBOURS POND DAM	US		1,00			6,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
11	171	BARR LAKE DAM	US	0,43	1,23		0,10	4,27	190,50	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
12	179	BASS HAVEN LAKE DAM	US	0,03	1,01		0,23	9,10	100,00	DT	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
13	193	BAYI	CN	0,33	1,00		0,56	30,00	710,00	EI	ZON	NÃO	EM	M	G	M	INT
14	202	BEARWALLOW/BEAR WALLOW LAKE DAM	US	1,43	0,64	0,50	0,02	10,00	152,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
15	207	BEAVER DAM/WILDEWOOD POND #2/BOYD POND TWO (CONTROLLED RELEASE)	US	1,54	0,30		0,00	7,32	221,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
16	222	BELCI	RO	2,48	0,97	1,25	0,09	15,50	428,00	GG	ZON	NÃO	ND	M	M	M	INT
17	237	BENNETT LAKE DAM NO.2 II	US	1,10	1,00			9,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
18	248	BIG BAY LAKE DAM	US	0,93	0,90	0,92	0,12	15,60	576,07	EI	COM	NÃO	EM	M	M	M	INT
19	261	BIG FALLS	US	0,38	0,08			15,20		EI	ND	NÃO	ND	ND	M	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
20	272	BIG LAKE/BIG WOODS SPRING LAKE DAM	US	2,38	1,17		0,25	5,49	150,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
21	273	BILA DESNA DAM	CZ		0,81	0,20		18,00	244,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	M	P	INT
22	274	BILBERRY DAM	GB	1,09	1,15	0,17	0,08	20,00	145,00	GG	ZON	NÃO	ND	M	M	P	EST
23	346	BOSTWICK POND I	US		1,00			4,00		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
24	347	BOSTWICK POND II	US		1,00			7,20		GG	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
25	365	BOYDSTOWN I	US		1,00			7,40	93,00	GG	COM	NÃO	ND	P	P	P	INT
26	369	BRADFIELD DAM (DALE DIKE)	GB	2,62	1,00	0,75	0,00	29,00	382,00	EI	ZON	NÃO	ND	M	M	P	INT
27	374	BREAK NECK RUN II	US	4,50	1,00		0,00	7,00	30,50	GG	ND	ND	ND	P	P	P	EST
28	406	BROWNES LAKE	US		1,00			3,70		GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	ND
29	422	BUCKHAVEN NO.2	US		1,00			6,10	70,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
30	428	BUFFALO CREEK DAM No.1	US	2,00	0,44	0,50	0,91	32,00	107,00	GG	HOM	NÃO	ND	G	G	P	EST
31	430	BUFFALO CREEK DAM No.3 (TAILINGS)	US		0,68	1,00		13,40	152,00	EI	ND	ND	ND	P	P	P	EST
32	437	BULLOCK DREW/DRAW DIKE	US	0,22	1,00		0,02	5,80	540,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
33	453	BUTLER VALLEY	US	0,85	1,00		0,07	7,16	850,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
34	462	CALDRON FALLS	US		0,00			11,90		PC	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
35	475	CAMP LA JUNTA	US		1,00			3,70		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
36	479	CAMP WEONA	US	0,00	1,00			3,40		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
37	488	CANEY COON CREEK (SCS SITE 2)	US		0,30			15,30		GG	ND	ND	ND	ND	M	ND	ND
38	494	CANYON LAKE DAM/ BLACK HILLS FLOOD	US	12,49	1,00	0,75	0,00	6,10	152,40	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
39	509	CARY'S LAKE DAM	US	1,44	1,17		0,20	6,10	106,70	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
40	524	CAULK LAKE DAM	US	0,12	0,61		0,25	20,10	134,00	EI	ND	ND	ND	M	M	P	EST
41	539	CHA'AN	CN	3,57	1,00		0,00	10,50	75,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
42	555	CHAQ-CHAQ DAM	IQ	0,57	1,00	1,50	0,17	14,50	170,00	GG	ZON	NÃO	ND	P	P	P	EST
43	561	CHEAHA CREEK WATERSHED 6	US	1,98	0,13	2,00	0,00	7,00	305,00	GG	COM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
44	569	CHENYING	CN		1,00	0,83		12,00		GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	ND
45	571	CHEROKEE SANDY CREEK (SCS SITE 8A)	US		0,63			8,20		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
46	593	CHOPPER'S LAKE DAM	US		0,30			8,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
47	617	CLAY BROOK WATER SUPPLY	US		1,00			1,83		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
48	625	CLEARWATER LAKE	US	1,03	0,95		0,08	4,00	230,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
49	640	COEDTY RESERVOIR DAM	GB	2,22	1,00	0,25	0,07	11,00	262,00	GG	TNU	SIM	EA	P	P	P	INT
50	673	COOKS POND	US		1,00			3,05		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
51	716	CRUMP	US	0,00	0,80			4,60		PC	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
52	725	CUBA RESERVOIR DAM	US		0,10			15,70		GG	ND	ND	ND	M	M	P	ND
53	734	CUT-AWAY DIKE	CA	4,00	5,33	1,62	0,00	3,00	162,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	P	M	LRG
54	736	D.M.A.D. / DMAD	US		1,38	0,20		10,40	823,00	PC	HOM	NÃO	ND	M	P	M	LRG
55	746	DAFENGKOU	CN	3,23	1,00		0,00	24,00	253,00	GG	ZON	NÃO	ND	M	M	M	EST
56	751	DAKRONG 3 DAM	VN	0,00						GG	TNU	SIM	ND	ND	ND	ND	ND
57	754	DALIZHUANG DAM	CN	0,00	1,00		0,38	12,00	104,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
58	759	DAM FARM MIDDLE	US		1,00			2,44		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
59	766	DANGHE	CN	1,52	0,54			46,00		EI	TNU	SIM	EB	G	G	M	ND
60	777	DAVIS RESERVOIR	US	0,25	1,00		0,05	11,90	292,60	EI	FC	NÃO	EA	M	P	M	INT
61	794	DELHI LAKE DAM / HARTWICK DAM	US	0,48	1,00	1,75	0,40	11,00	151,00	GG	TNU	SIM	EB	M	P	M	INT

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
		(TURTLE CREEK RECREATION PARK)															
62	795	DELIJI	CN	2,63	1,00			24,00		EI	ZON	NÃO	ND	M	M	M	ND
63	796	DELLS	US	3,08	1,00	0,66	0,00	18,30	292,60	GG	TNU	SIM	EA	M	M	M	INT
64	828	DIXON DAM	US		1,00			2,70		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
65	835	DONGCHUANKOU	CN		1,00			31,00		GG	HOM	NÃO	EA	G	G	M	ND
66	838	DONGKOU MIAO	CN	1,98	1,00			21,50		GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	ND
67	858	DUBOSE LAKE DAM	US		0,30			6,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
68	872	DUSHAN	CN	0,00	1,00			17,70		GG	HOM	NÃO	EM	M	M	P	ND
69	885	EAST FORK POND RIVER FRS NO.4.1	US	0,44	0,85		0,05	13,40	250,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
70	889	EAST LAKE	US		1,00			5,50	320,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
71	891	EAST LEMMON LAKE	US	3,61	0,84			9,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
72	896	EAST PITTSFORD	US		1,14			10,67	33,50	PC	ND	ND	ND	P	P	P	EST
73	902	EAUZE	FR		0,04			5,00		GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	ND
74	927	ELK CITY	US	0,97	1,00	0,83	0,05	9,10	564,00	GG	TNU	SIM	EM	P	P	P	LRG
75	933	ELLIS CREEK NO.4 I	CA		1,00			10,00	560,00	EI	TNU	SIM	ND	P	P	P	LRG
76	937	EMERY/EMERYM DAM	US	0,35	0,51		0,06	16,00	130,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
77	945	ERINDALE NO.2	CA	4,29	0,44	0,50	0,00	10,50	213,40	GG	TNU	SIM	ND	ND	P	ND	INT
78	946	ERLANG MIAO DAM	CN	1,22	0,74		0,19	12,10	95,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
79	952	EUCLIDES DA CUNHA	BR	1,24	0,88		0,00	60,00	312,00	GG	HOM	NÃO	ND	G	MG	M	EST
80	960	FAIRFIELD SWAMP	US		1,08			4,27		EI	TNU	SIM	ND	ND	P	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
81	982	FENGZHUANG	CN	0,63	0,67		0,60	12,00	50,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
82	1010	FOGELMAN	US		0,84			15,00	65,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
83	1017	FOREST LAKE DAM	US	17,82	0,11			7,00		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
84	1029	FORT PECK	US		0,39			76,00		GG	HOM	NÃO	ND	MG	MG	MG	ND
85	1031	FORT PITT II	US		1,00			3,00	53,30	GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	INT
86	1032	FORT RITCHIE I	US		1,00			5,80		ND	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
87	1048	FRANKFURT	DE	0,24	1,00		0,04	9,75	120,00	EI	HOM	NÃO	EB	P	P	P	INT
88	1059	FRED BURR	US	1,48	0,65		0,00	16,00	99,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
89	1061	FREDDIES LAKE DAM	US		1,00	0,67		9,40		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
90	1065	FRENCH LANDING	US	0,96	1,16	0,58	0,04	12,20	350,00	EI	HOM	NÃO	EM	P	P	P	INT
91	1067	FRENCHMAN CREEK DAM	US	1,19	1,00		0,04	12,50	884,00	EI	HOM	NÃO	EM	M	P	M	LRG
92	1074	FUGOU	CN	0,56	1,00		0,00	16,00	35,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
93	1075	FUJINUMA DAM	JP	2,60	0,54	0,08	0,03	18,50	133,00	DT	TNU	SIM	ND	M	M	P	EST
94	1095	GARARDA DAM	IN		1,00	0,50		31,76	4271,00	PC	ZON	NÃO	ND	G	G	M	LRG
95	1099	GATES POND	US		1,00			1,52		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
96	1112	GIBSON'S POND DAM	US	0,49	0,74		0,19	4,57	91,40	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
97	1122	GLASHÜTTE	DE	0,92		0,20	0,08		65,00	GG	HOM	NÃO	ND	ND	ND	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
98	113 1	GOLF COURSE POND	US		1,00			3,05		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
99	113 4	GONGQINGTUAN	CN	4,52	1,00		0,00	23,0 0	208,00	GG	ZON	NÃO	ND	M	M	M	EST
10 0	113 6	GOODRICH CREEK/RESERVOIR I	US		0,77			19,8 0		GG	HOM	NÃO	ND	ND	M	ND	ND
10 1	114 0	GOOSE CREEK	US	1,00	1,00	0,5 0	0,03	4,10	701,00	GG	HOM	NÃO	EM	M	P	M	LRG
10 2	115 1	GOUHOU DAM	CN	0,80	0,68	2,3 3		71,0 0		EI	FC	NÃO	EB	MG	MG	P	ND
10 3	115 2	GOULDTOWN - MILL CHANNEL	US		1,00			4,60		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
10 4	116 0	GRAND RAPIDS	US	0,21	0,99	0,5 0	0,02	7,60	441,00	GG	ZON	NÃO	EM	P	P	P	LRG
10 5	118 0	GROPP'S LAKE DAM I	US		0,80			7,60		PC	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
10 6	121 5	HAAS/HASS POND DAM	US	0,39	0,99	1,0 0	0,08	4,00	120,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
10 7	121 8	HAEKER DAM	US		0,29			7,00		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
10 8	122 0	HAILUO	CN	0,49	1,00			17,3 0		EI	HOM	NÃO	ND	M	M	P	ND
10 9	122 7	HALL LAKE DAM	US	0,42	0,49			3,70		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
11 0	125 5	HART LAKE	US	3,01	1,15		0,14	9,40	300,00	EI	HOM	NÃO	EA	M	P	M	INT
11 1	125 8	HÄSTBERGA	SE	0,10	1,00	1,2 5	0,10	7,00	300,00	GG	TNU	SIM	ND	M	P	M	LRG
11 2	126 0	HATCHTOWN	US	1,09	0,97	1,0 0	0,47	18,9 0	237,70	GG	ZON	NÃO	EA	M	M	M	INT
11 3	126 1	HATFIELD I	US	12,56	0,24	2,0 0	0,00	28,0 0	1524,00	GG	TNU	SIM	EA	M	M	M	LRG
11 4	128 2	HEBRON I	US	1,00	0,89		0,03	17,1 0	1127,80	EI	HOM	NÃO	ND	ND	M	ND	LRG

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
115	1291	HEMATITE LAKE DAM	US	0,23	0,84			4,00		EI	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
116	1292	HEMET DAM	US	0,00	1,00	1,00	1,00	6,10	83,20	GG	TNU	SIM	ND	M	P	M	INT
117	1300	HERRIN RESERVOIR 2 DAM	US		1,30			8,20	180,00	PC	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
118	1304	HESTER LAKE DAM I	US		0,02			35,00		PC	ND	ND	ND	ND	G	ND	ND
119	1376	HOMESTAKE	US	0,82	1,00			27,70		PC	ND	ND	ND	ND	M	ND	ND
120	1396	HORSE CREEK DAM No.1 I	US	0,24	1,05		0,01	12,20	5150,00	EI	FC	NÃO	EA	M	P	M	LRG
121	1398	HORSE CREEK DAM No.1 II ?	US	0,24	1,83		0,05	7,00	1320,00	EI	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	LRG
122	1410	HOUGOU DAM	CN		1,00			8,00	300,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	INT
123	1432	HUAISHUZHANG	CN		1,00			15,00	76,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
124	1436	HUANGDILING	CN	0,35	1,00		0,00	17,80	112,00	EI	ZON	NÃO	ND	M	M	P	EST
125	1445	HUANGWANG DAM	CN	2,73	1,00		0,08	20,50	532,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	M	INT
126	1468	HUOSHISHAN DAM	CN	0,90	1,28		0,11	13,00	140,00	GG	HOM	NÃO	EA	P	P	P	EST
127	1470	HUQITANG	CN	0,50	0,91			9,90		EI	HOM	NÃO	EB	P	P	P	ND
128	1473	HUTCHINSON LAKE DAM	US	1,15	1,00		0,18	3,75	160,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
129	1474	HUTTOS LAKE DAM	US		1,00			3,70		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
130	1511	IOWA BEEF PROCESSORS WASTE POND NO.1	US	0,34	0,97		0,05	4,57	305,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
131	1513	IRELAND RESERVOIR No.5 II	US	0,39	1,00	0,50	0,03	5,20	370,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
132	1529	IVEX OF OHIO UPPER LAKE DAM II	US	0,51	1,00	0,13	0,07	7,50	185,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
133	1534	J.B. DUNNELL	US		1,00			8,80		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
134	1535	JACKSON BLUFF	US		0,50			18,30		GG	HOM	NÃO	ND	ND	M	ND	ND
135	1537	JACKSON CREEK WATERSHED (KINKAID LAKE DAM)	US	0,16	2,14		0,00	13,10	298,70	EI	ND	ND	ND	ND	P	ND	INT
136	1543	JACOBS CREEK	US		1,00			21,30	160,00	EI	ZON	NÃO	ND	M	M	P	EST
137	1547	JAN LAND COMPANY LAKE NO.1 DAM	US	0,31	0,84			5,80		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
138	1563	JIAHEZI	CN	0,00	1,00			18,00		EI	HOM	NÃO	EA	G	M	G	ND
139	1600	JOHNSON LAKE I	US	1,30	1,00			7,60		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
140	1601	JOHNSON LAKE II	US		0,61			7,60		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
141	1605	JOHNSTON CITY LAKE DAM	US	1,00	1,21		0,04	4,27	75,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
142	1606	JOHNSTOWN 1 SOUTH FORK 1	US	1,37	0,64	0,75	0,21	38,10	284,00	GG	ZON	NÃO	EM	G	G	M	EST
143	1625	KADDAM	IN	3,53	0,49	1,00		30,78		GG	HOM	NÃO	ND	MG	G	MG	ND
144	1651	KELLY BARNES DAM (FOR THE TOCCOA FALLS INSTITUTE)	US	0,66	1,10	0,50	0,15	11,60	122,00	EI	HOM	NÃO	EA	P	P	P	EST
145	1654	KENDALL LAKE DAM	US		0,82			6,70	128,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
146	1667	KETNER DAM	US	2,50	0,85	0,25	0,67	13,70	182,00	GG	TNU	SIM	ND	ND	P	ND	INT
147	1688	KNIFE LAKE DAM	US	1,00	1,00		0,00	6,10	61,00	EI	ND	ND	ND	M	P	M	EST

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
148	1693	KODAGANAR	IN	7,83	1,00		0,01	11,45	2425,00	GG	HOM	NÃO	EM	M	P	M	LRG
149	1704	KRAFTSMEN'S LAKE DAM	US	1,47	1,00		0,10	3,20	100,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
150	1713	LA FRAYÈRE PARK DIKE I	CA		0,50			2,00	3000,00	PC	ZON	NÃO	ND	ND	P	ND	LRG
151	1714	LA FRAYÈRE PARK DIKE II	CA		1,00			1,00	3000,00	EI	ZON	NÃO	ND	ND	P	ND	LRG
152	1715	LA FRUTA	US	0,30	1,12		0,06	12,50	900,00	EI	HOM	NÃO	EM	G	P	G	LRG
153	1734	LAKE ALICE	US		1,00			6,10	40,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
154	1741	LAKE BARCROFT / LAKE BARCOFT	US	1,05	0,52	1,00	0,00	21,03	62,50	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
155	1758	LAKE COMO DAM	US		0,33			4,60	12,19	GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	EST
156	1763	LAKE DELTON	US		1,32	0,50		9,10	300,00	GG	TNU	SIM	ND	P	P	P	INT
157	1768	LAKE ELIZABETH	US	0,56	1,41		0,14	3,20	170,70	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
158	1780	LAKE FRANCIS I / LAKE FRANCES	US	0,57	1,13	1,00	0,03	15,20	302,40	EI	HOM	NÃO	EA	M	M	P	INT
159	1782	LAKE GALAHAD DAM	US		1,00			5,50	210,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
160	1784	LAKE GENEVIEVE	US	1,54	1,04		0,02	7,60	200,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
161	1811	LAKE KATHERINE DAM	US	12,30	0,29			4,30		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
162	1815	LAKE LANAHAN	US		1,00			7,92		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
163	1820	LAKE LATONKA	US	1,19	0,67	3,00	0,04	13,00	701,00	EI	HOM	NÃO	EM	P	P	P	LRG
164	1869	LAKE PHILEMA	US	0,33	1,00		0,11	8,53	420,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
165	1870	LAKE POWELL DAM	US		0,95			5,79		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
166	1881	LAKE SENECA DAM	US		0,47			9,80		PC	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
167	1904	LAKE TOXAWAY	US		1,00			18,90	150,00	PC	HOM	NÃO	ND	M	M	M	EST
168	1924	LAKESIDE	US		1,00			15,20		GG	ND	ND	ND	ND	M	ND	ND
169	1929	LAMBERT LAKE	US	0,21	0,87		0,02	16,50	200,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	M	P	INT
170	1943	LAOZHUANG DAM	CN		1,00			10,00	150,00	GG	ZON	NÃO	ND	P	P	P	INT
171	1946	LAUREL RUN/LAKE	US	2,40	1,07		0,01	12,80	189,90	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
172	1949	LAWN LAKE I	US	0,40	0,96	0,25	0,13	7,90	115,50	EI	HOM	NÃO	EA	P	P	P	INT
173	1990	LIJIAJU = LIJIAZUI DAM ?	CN		1,00			25,00		GG	HOM	NÃO	EM	M	M	P	ND
174	1994	LILY LAKE	US	0,14	1,00		0,17	3,66	60,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
175	2015	LITTLE DEER CREEK	US	0,75	1,03	0,25	0,04	26,20	255,00	EI	HOM	NÃO	EA	M	M	P	EST
176	2025	LITTLE MUSKEGO	US		0,17			5,90		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
177	2037	LIUJIATAI DAM	CN		1,00	0,50		35,90		GG	TNU	SIM	EM	G	G	M	ND
178	2061	LONG BRANCH CANYON	US		1,00			3,66	50,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
179	2070	LONGTUN	CN	0,05	1,00			9,50		GG	TNU	SIM	EA	M	P	M	ND
180	2077	LOOKOVER LAKE DAM	US		0,03			3,70		PC	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
181	2081	LOS FRAILES DAM (DOÑANA/GUADIAMAR DISASTER)	ES		1,00			30,00		PO	ND	ND	ND	ND	G	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
182	2103	LOWER LATHAM	US	6,31	1,00	1,50	0,29	7,00	120,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	P	M	INT
183	2105	LOWER MELZINGAH DAM	US		1,14			9,10	120,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
184	2108	LOWER NORTH EDEN RESERVOIR	US		0,71			4,30		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
185	2116	LOWER ROCKY FORD DAM /ROCKY FORD LAKE	US	0,54	0,75		0,19	6,10	79,20	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
186	2122	LOWER STICHCOMB	US		0,22			4,20		EI	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
187	2126	LOWER TWO MEDICINE	US	1,50	1,00	1,00	0,14	11,30	350,00	GG	HOM	NÃO	EM	M	P	M	INT
188	2136	LULAOZHUANG DAM	CN		1,00			15,00	250,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	INT
189	2145	LUZIGOU	CN	0,38	1,00			17,00		GG	ZON	NÃO	ND	M	M	P	ND
190	2146	LYMAN / LAYMAN	US	0,51	1,00		0,34	19,80	256,00	EI	COM	NÃO	EM	M	M	M	INT
191	2147	LYNDE BROOK RESERVOIR DAM	US	1,22	1,00		0,08	12,50	200,00	EI	TNU	SIM	EM	P	P	P	INT
192	2162	MACHHU 2 (IRRIGATION SCHEME)	IN	3,65	1,00	2,00	0,00	22,56	3742,00	GG	TNU	SIM	EM	G	M	G	LRG
193	2172	MAHE	CN		1,00			19,50		GG	HOM	NÃO	EA	M	M	M	ND
194	2185	MAMMOTH DAM	US	2,93	1,00	1,50	0,07	21,30	134,11	GG	TNU	SIM	EA	M	M	M	EST
195	2210	MARIMAC / MERIMAC (UPPER) LAKE DAM	US	0,43	0,89		0,12	3,44	110,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
196	2216	MARSCHKE LAKE DAM	US		0,50			5,50		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
197	2221	MARTIN PLANT COOLING WATER RESERVOIR/POND (OR	US	7,27	1,23	0,67	0,00	10,40	3800,00	EI	FC	NÃO	EA	G	P	G	LRG

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
		FP&L COOLING-MARTIN PLANT) DIKE															
198	2224	MAZHUANG	CN		1,00			10,20	660,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
199	2256	MEADOW'S POND DAM / BERGERON POND DAM	US		1,00	0,17		11,00	142,00	EI	ND	ND	ND	P	P	P	INT
200	2262	MEIYUAN	CN	1,07	1,00			14,00		GG	ZON	NÃO	ND	M	P	M	ND
201	2265	MELVILLE	US	0,74	0,89		0,11	10,97	243,80	EI	COM	NÃO	EM	M	P	M	INT
202	2269	MENDHAM/MORRISTOWN RESERVOIR DAM	US		0,05			30,48		EI	ND	ND	ND	ND	G	ND	ND
203	2271	MENNO	US		1,00			16,20		GG	ND	ND	ND	ND	M	ND	ND
204	2274	MERCED FALLS	US		1,12			10,40		GG	TNU	SIM	ND	ND	P	ND	ND
205	2360	MONASHKA CREEK DAM	US		0,50			12,19		PC	TNU	SIM	ND	P	P	P	ND
206	2382	MOSS MILL LAKE DAM	US		0,50			2,10		GG	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
207	2383	MOSSY LAKE DAM	US	1,25	1,23		0,14	2,80	274,30	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
208	2400	MUD CREEK DAM	US		1,00			3,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
209	2425	MURTHA POND	US		0,71			2,10		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
210	2436	NAGELS MILL POND	US		1,00			4,88		EI	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
211	2437	NAHZILLE	US	0,00	0,92		0,05	5,49	130,00	GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	INT
212	2441	NANAKSAGAR DAM	IN	3,26	0,97	2,50	0,00	16,45	19300,00	GG	HOM	NÃO	ND	MG	M	MG	LRG
213	2473	NEW SHOAL CREEK	US	1,78	0,78			13,70		GG	COM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
214	2481	NIEDOW DAM	PL	0,00	1,00	0,50	0,10	16,70	269,90	GG	TNU	SIM	ND	M	M	P	INT
215	2496	NIUJIAOYU	CN	0,97	0,72	3,00		10,00		EI	TNU	SIM	EB	P	P	P	ND
216	2503	NOPPIKOSKI DAM	SE	0,24	1,00	0,38	0,22	16,46	175,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	EST
217	2530	NORTON BROOK	US		1,00			10,36		EI	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
218	2536	OAKFORD PARK	US	1,19	1,00	0,50	0,08	6,10	106,70	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
219	2556	OLD CITY LAKE	US		1,00			4,30	180,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
220	2557	OLD FORGE POND DAM	US		0,81			4,57		PC	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
221	2558	OLD MILL POND DAM	US	0,46	1,16		0,17	6,10	144,80	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
222	2565	OPUHA DAM	NZ		1,00			20,00	300,00	GG	ZON	NÃO	ND	M	M	M	INT
223	2583	OTTER LAKE	US	1,28	1,00		0,01	6,10	140,00	EI	HOM	NÃO	EM	P	P	P	INT
224	2597	OWL CREEK (SCS SITE 07)	US		0,76			6,40		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
225	2612	PANSHET (PANCHET POONA) DAM	IN	0,33	0,18	2,50	0,00	51,00	740,00	PC	TNU	SIM	ND	G	G	P	INT
226	2640	PERU	US		2,06			1,80		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
227	2644	PETERS RESERVOIR NO. 1 (UPPER) II	US		1,00			4,10	60,96	EI	ND	ND	ND	ND	P	ND	INT
228	2652	PICKWICK II	US		0,28			11,00		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
229	2653	PIERCE RESERVOIR	US	0,77	1,00	1,00	0,06	8,69	380,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG
230	2705	PORTER HILL	US		1,00			5,80	120,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
231	2714	POTATO HILL LAKE	US	1,25	1,06		0,09	7,30	80,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
232	2728	PROSPECT RESERVOIR/VALLEY DAM	US	0,68	0,32	0,50	0,05	13,70	1842,50	EI	HOM	NÃO	EA	M	P	M	LRG
233	2738	PUDDINGSTONE	US	0,94	0,90	0,25	0,26	15,20	255,70	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	P	INT
234	2739	PUDDLE POND	US		1,00			5,20		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
235	2750	QIELINGGOU	CN		1,00	0,17		18,00		GG	HOM	NÃO	EA	M	M	P	ND
236	2759	QUAIL CREEK DIKE	US	0,45	1,08	1,00	0,11	24,00	610,00	EI	ZON	NÃO	EM	M	M	M	INT
237	2768	RAIL ROAD LAKE DAM	US		1,09	2,00		5,60		PC	ND	ND	ND	P	P	P	ND
238	2771	RAINBOW LAKE	US	2,52	0,68		0,05	14,00	300,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	P	M	INT
239	2778	RANDALL'S POND (LOWER)	US		0,83			5,50		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
240	2800	RENEGADE RESORT LAKE	US	0,63	1,00		0,00	3,66	75,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
241	2816	RICHARDET DAM	US		0,45			12,20		PC	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
242	2823	RILEY MILL POND	US		1,00			4,30		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
243	2836	RITO MANZANARES	US	0,78	1,00		0,10	7,32	73,15	EI	HOM	NÃO	EA	P	P	P	EST
244	2844	ROBERTS TANK	US		1,00			6,10		PC	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
245	2902	SALLES OLIVEIRA	BR		1,00			35,05	167,00	GG	HOM	NÃO	ND	G	G	M	EST
246	2920	SANDAOHE	CN	1,67	1,00			18,00		GG	ZON	NÃO	ND	M	M	M	ND
247	2952	SCHAEFFER RESERVOIR	US	2,39	1,00	0,50	0,19	30,50	335,00	GG	HOM	NÃO	EA	G	G	P	EST

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
248	2953	SCHENECTADY (VEEDERS POND)	US	1,34	1,00		0,00	9,10	45,70	GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	EST
249	2964	SCOTT DAM	US		1,73			4,00		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
250	2966	SCOTT FARM DAM NO. 2	CA	0,00	1,19		0,38	10,00	39,30	EI	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	EST
251	2982	SEMINARY HILL RESERVOIR NO.3	US		1,00			6,10		EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	ND
252	2983	SEMMES LAKE DAM	US	0,86	0,82		0,10	8,23	295,70	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
253	2987	SENECA LAKE DAM	US		1,00			3,40		GG	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
254	2989	SEQ No.2 - FARM DAM	AU		1,00			4,00	110,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
255	2990	SEQ No.5 - FARM DAM	AU		1,00			3,60	50,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
256	3012	SHANGLIUZHUANG DAM	CN		1,00			14,00	110,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
257	3016	SHANGSHUZHUANG DAM	CN		1,00			11,00	65,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
258	3017	SHANHU	CN	1,31	1,13			11,50		EI	HOM	NÃO	EA	P	P	P	ND
259	3030	SHEEP CREEK DAM	US	0,50	1,00		0,04	17,10	330,00	EI	HOM	NÃO	EM	M	M	P	INT
260	3034	SHERBURNE NO.2	US	2,21	1,00	2,00	0,00	10,40	91,40	GG	TNU	SIM	ND	P	P	P	EST
261	3037	SHEYANG	CN	3,29	1,00			7,00		GG	TNU	SIM	ND	M	P	M	ND
262	3043	SHILONGSHAN	CN	1,79	1,00			14,00		GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	ND
263	3044	SHIMANTAN (OR SHAMANTAN)	CN	3,06	1,03	3,00	0,32	25,00	900,00	GG	HOM	NÃO	EA	G	M	G	INT
264	3082	SIMPLOT WASTEWATER LAGOON No.1	US		1,00			5,00	270,00	EI	HOM	NÃO	ND	P	P	P	LRG

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
265	3085	SINKER CREEK	US	1,00	1,07	2,00	0,15	20,00	335,00	PC	HOM	NÃO	ND	M	M	P	INT
266	3110	SOUTH EDEN RESERVOIR	US		0,65			3,70		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
267	3115	SOUTH FORK DAM	US	1,84	1,11	0,75	0,13	21,90	284,00	GG	COM	NÃO	ND	M	M	M	INT
268	3136	SPAULDING POND / MOHEGAN PARK DAM	US		0,90	0,62		6,10	70,00	EI	COM	NÃO	ND	P	P	P	EST
269	3146	SPRING LAKE	US	1,00	1,00		0,04	5,50	251,50	EI	HOM	NÃO	EM	P	P	P	LRG
270	3147	SPRING LAKE	US	3,39	0,57			5,50		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
271	3153	SPRUCE LAKE	US		1,20			6,10		EI	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
272	3178	STATHAM LAKE DAM (AMERICUS)	US	0,55	0,93		0,12	5,50	150,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	INT
273	3181	STEVENS LAKE DAM (SCS, 1986)	US	0,45	1,00			11,00		GG	ND	ND	ND	P	P	P	ND
274	3210	SUNDIAN DAM	CN		1,00			8,00	55,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
275	3223	SUTTON LAKE	US		1,00			4,00	140,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
276	3237	SWIFT IRRIGATION DAM NO. 2	US	0,00	1,20	0,25	1,00	47,85	225,60	GG	FC	NÃO	EM	G	G	M	EST
277	3276	TAUM SAUK (UPPER) RESERVOIR HYDROELECTRIC POWER STATION	US	1,53	1,00	0,33	0,06	28,96	2100,00	GG	ZON	NÃO	ND	M	M	M	LRG
278	3296	TESTALINDEN / TESTALINDA	CA	0,88	1,00	0,37	0,04	2,10	80,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
279	3297	TETON DAM	US	1,00	0,93	1,25	0,07	93,00	945,00	EI	ZON	NÃO	EM	MG	MG	MG	EST
280	3306	THOMAS POND	US		0,68			8,50		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
281	3320	TIANGANG DAM	CN		1,00			16,50	330,00	GG	HOM	NÃO	ND	M	M	M	INT
282	3329	TIEMUSI DAM	CN		1,00			12,00	80,00	GG	HOM	NÃO	EA	P	P	P	EST
283	3335	TIMBERLAKE/TIMBER LAKE DAM	US	0,75	1,00		0,26	7,30	200,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
284	3350	TOMAHAWK LAKE DAM	US		0,50			4,30		GG	ND	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
285	3353	TOMKINS LAKE III	US	0,00	1,00		0,23	24,38	91,44	GG	ND	ND	ND	ND	M	ND	EST
286	3357	TONGSHUYUANG DAM	CN		0,77			13,00	90,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
287	3386	TRIAL LAKE	US	0,81	0,55		0,07	9,40	230,00	EI	HOM	NÃO	EM	P	P	P	INT
288	3392	TROUT LAKE	US	1,79	1,12		0,15	7,60	75,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
289	3404	TUCKAHOE STATE PARK DAM	US	6,10	0,12			4,30		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
290	3416	TUTENS MILL POND	US	3,11	1,00			4,90		GG	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND
291	3422	ULMERS / ULMER POND DAM	US	0,22	1,25		0,29	5,18	128,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
292	3459	UPPER MOORE POND	US		0,95			6,10		EI	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
293	3460	UPPER NORTH EDEN RESERVOIR	US		1,00			12,19		PC	ND	ND	ND	P	P	P	ND
294	3461	UPPER POND (CT 433)	US	1,72	1,00		0,22	5,18	35,00	GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	EST
295	3467	UPPER ROCKY CREEK/ NORTH LAKE/ OVERCREEK RD.	US	0,43	0,87		0,09	6,10	213,40	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
296	3476	UTICA RESERVOIR DAM NO.3	US	0,89	1,00			21,30		PC	ND	ND	ND	M	M	P	ND
297	3490	VANCE LAKE DAM	US	0,52	1,00			7,30		EI	ND	ND	ND	ND	P	ND	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
298	3542	WALTER BOULDIN DIKE (OR WALTER BOULDIN)	US	9,67	0,65	4,25	0,05	51,80	2268,00	GG	HOM	NÃO	ND	MG	G	MG	LRG
299	3545	WANSHANGANG	CN	0,83	0,92			13,00		GG	HOM	NÃO	EM	P	P	P	ND
300	3552	WASHINGTON LAKE AND RESERVOIR	US		0,82			3,70		GG	ND	ND	ND	P	P	P	ND
301	3588	WEST LAKE DAM	US		1,00			5,50	200,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	INT
302	3600	WHEATLAND / WHEATLAND RESERVOIR No.1 (SCS, 1986)	US	0,47	1,01	1,50	0,18	13,50	230,00	EI	HOM	NÃO	ND	M	P	M	INT
303	3615	WHITEWATER BROOK UPPER	US	0,52	0,32		0,00	19,00	137,00	GG	ND	ND	ND	M	M	P	EST
304	3624	WILKINSON LAKE DAM	US	1,75	1,16		0,18	3,20	125,00	EI	TNU	SIM	EA	P	P	P	INT
305	3647	WINSTON LAKE DAM No.2	US	0,25	0,83	2,67	0,20	7,31	91,40	GG	TNU	SIM	EM	P	P	P	INT
306	3653	WOLCOTT POND/RESERVOIR	US		0,67			6,40		GG	HOM	NÃO	ND	ND	P	ND	ND
307	3701	XIEZIGOU	CN	4,69	1,00		0,00	12,80	120,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
308	3737	YANGWANY DAM	CN		1,00			7,00	50,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
309	3746	YAODIANPU	CN	3,68	1,00			6,80		GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	ND
310	3766	YUANMEN	CN		1,00	0,50		19,20		GG	HOM	NÃO	EA	M	M	M	ND
311	3768	YUE'ERWANG DAM	CN		1,00			13,50	100,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
312	3781	ZEYZOUN DAM	SY		1,25	1,00		32,00	1740,00	EI	ZON	NÃO	ND	G	G	M	LRG
313	3796	ZHONGHUAJU	CN		1,00	0,40		16,00		GG	HOM	NÃO	EA	M	M	P	ND

#	ID	Nome	País	Z (m/m)	H _B /H _d (m/m)	T _f (h)	L _B /L _{crista} (m/m)	H _d (m)	L _{crista} (m)	Modo de falha	Tipo Específico	Presença de Núcleo ou Revestimento	Erodibilidade	Magnitude	Altura Class.	Volum e Class.	Forma seção da barragem
314	3804	ZHOZHUANG	CN	4,85	1,00		0,00	6,50	63,00	GG	HOM	NÃO	ND	P	P	P	EST
315	3806	ZHUGOU (OR ZHUGUO)	CN	1,02	1,00	1,00	0,44	23,50	308,00	GG	ZON	NÃO	EA	M	M	M	INT
316	3812	ZUOCUN	CN		1,00	1,00		35,00		GG	TNU	SIM	EA	G	G	M	ND
Valores ausentes (missing values)				131	2	232	172	2	123	1	79	71	237	99	2	99	124

APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE RUPTURA REGISTRADOS NOS BANCOS DE DADOS DE REFERÊNCIA

As características das barragens afetam o modo como suas rupturas se desenvolvem. Nesse sentido, buscou-se caracterizar as informações apresentadas nos bancos de dados em relação aos aspectos que possuem maior relevância no modo de desenvolvimento das rupturas. Foram observados os tipos de barragem, material de preenchimento e magnitude, bem como características gerais sobre os eventos de ruptura como modo de falha, década de ocorrência, local e idade da barragem no momento da falha

A caracterização dos casos de ruptura registrados nos bancos de dados apresentados por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020) está apresentada a seguir. Ressalta-se que nem todos os casos de ruptura registrados nos bancos de dados apresentam informações referentes aos aspectos considerados na caracterização. Sendo assim, as características são apresentadas apenas nos casos em que a informação foi registrada, sendo definido como desconhecido quando não há indicação dessas propriedades.

De modo geral, no banco de dados de rupturas de barragens apresentado por BERNARD-GARCIA & MAHDI (2020) são observados, em sua maioria, casos de ruptura de barragens de terra construídas com algum tipo de controle. A maior parte das barragens podem ser classificadas como de pequeno a médio porte, baseado na classificação proposta por CNRH (2012). Grande parte dos registros foram realizados na década de 1990, principalmente com barragens com menos de 5 anos de operação e localizadas nos Estados Unidos.

O impacto da inundação a jusante, em termos de perdas de vida, associado aos casos de ruptura apresentados nos bancos de dados é de centenas de milhares de pessoas. Destaque é feito aos eventos de ruptura das barragens Banquio e Shimantan, associados a passagem do tufão Nina na China em 1975, onde, apenas nesses casos, foram registradas 171.000 perdas de vida.

As barragens construídas representam 71,72% (2.769 observações) dos casos de ruptura registrados no banco de dados de referência. Registros de rupturas de barragens formadas por escorregamentos de terra das encostas dos cursos de água também são observados (1.049 observações), bem como barragens de rejeito (19 casos), modelos reduzidos de laboratórios (18 casos) e ensecadeiras (6 casos).

Considerando os 2.769 casos de ruptura em barragens construídas, é possível observar que as barragens em aterro são a categoria preponderante na base de dados, correspondendo a 70,57% das observações (1.954 casos). Rupturas em barragens de concreto (175 casos), alvenaria (105 casos), rocha (105 casos), madeira (50 casos), metal (2 casos) e outros materiais (12 casos) também estão registradas no banco de dados. Ressalta-se que uma parcela considerável da amostra (366 observações – 13,22%) não apresenta a definição do tipo da barragem a qual a ruptura foi observada.

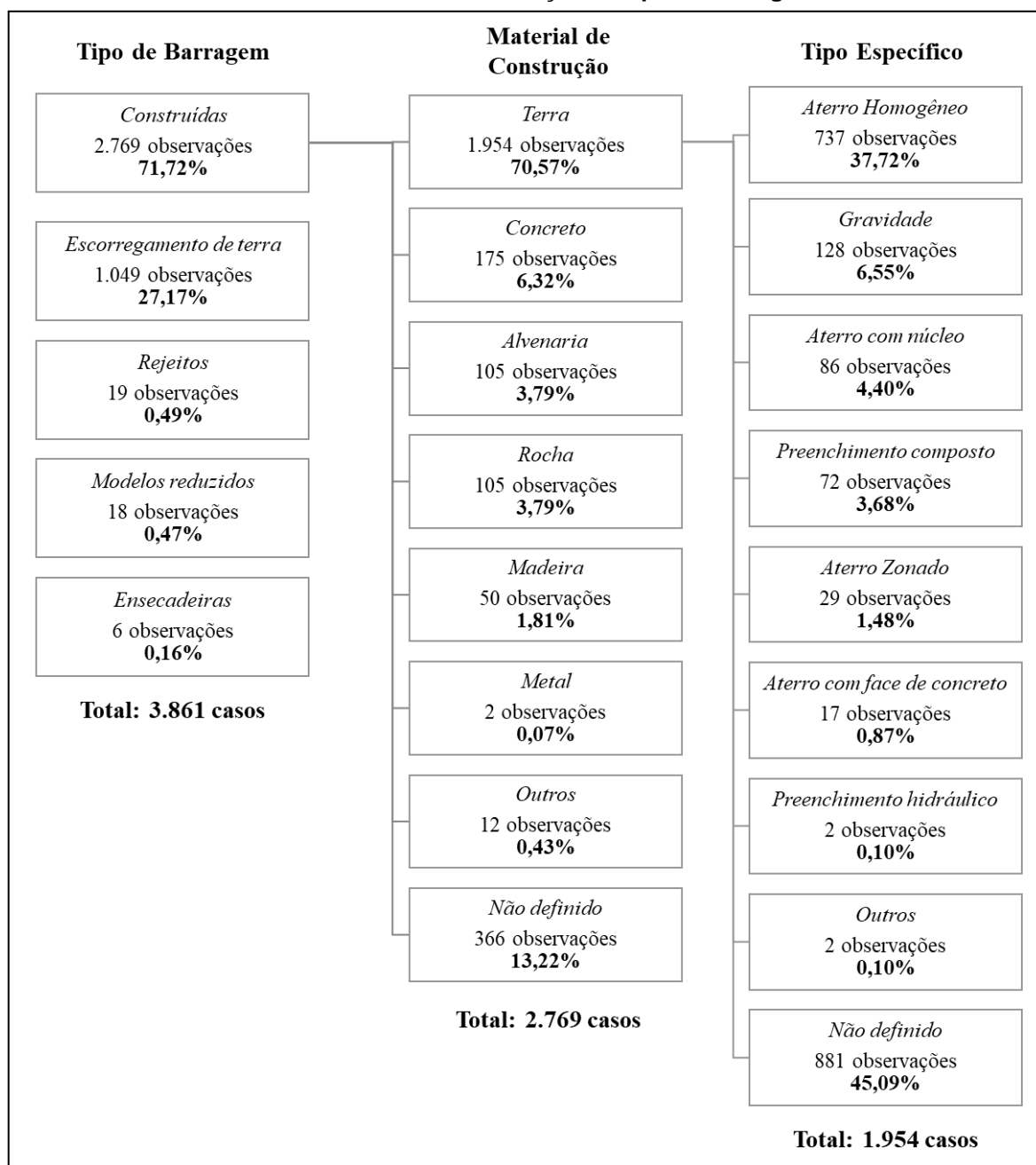
As barragens de terra, foco da presente pesquisa, apresentam, por sua vez, categorias específicas. Essas classes podem estar associadas aspectos construtivos como a presença de núcleos, zonas, revestimentos e o tipo de composição do material de preenchimento (homogêneo ou heterogêneo). Na base de dados de referência são apresentados casos de ruptura associados a oito diferentes classes de barragens em aterro.

Considerando as 1.954 observações de ruptura em barragens de terra, observa-se que os aterros em solo homogêneo são predominantes na amostra, representando 37,72% dos casos registrados (737 observações). Na mesma amostra também é possível observar que 881 casos não apresentam a definição do tipo específico dessas barragens, sendo a categoria com maior percentual de registros dentro das rupturas de barragens de terra (45,09%). Esse aspecto exemplifica a limitação no registro de informações a respeito dos eventos de ruptura de barragens.

De maneira esquemática, apresenta-se na Figura C.1 um diagrama descritivo dos números de casos observados em função dos diferentes tipos de barragens

apresentadas no banco de dados de referência. Apresenta-se também os números de casos observados dentre as barragens construídas em função do tipo de material de construção. Os números de registros dentre as barragens de terra em função do seu tipo construtivo específico também são apresentados, sendo esse grupo objeto de estudo da presente pesquisa.

Figura C.1 – Diagrama esquemático dos números de casos de ruptura registrados no banco de dados de referência em função do tipo de barragem

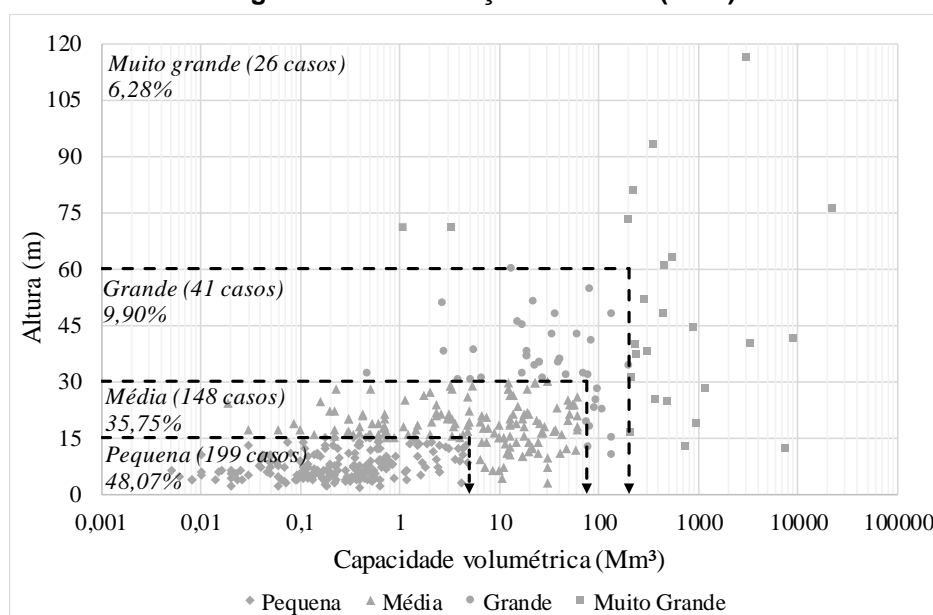


Dentre os registros de ruptura em barragens de terra (1.954 observações), foi possível classificar a magnitude de 414 barragens. Em grande parte dos casos (1.540 observações), não foi possível classificar as barragens quanto a magnitude em função da indisponibilidade das informações concomitantes de altura e capacidade

volumétrica das estruturas. Esse é mais um indicativo das limitações referentes ao registro de informações em rupturas de barragens.

Considerando as barragens classificadas (414 casos), verifica-se que as barragens com altura e capacidade volumétrica menor ou igual a, respectivamente, 15,00 m e 5 Mm³, classificadas como pequeno porte (CNRH, 2012), representam o maior número de observações (199 casos – 48,07%). Esse valor é próximo ao número de observações de ruptura de barragens de médio porte (148 casos – 35,75%), que segundo CNRH (2012), apresentam altura entre 15,00 m e 30,00 m e capacidade volumétrica entre 5 Mm³ e 75 Mm³. As barragens de grande e muito grande porte representam, respectivamente, 9,90% e 6,28% das observações. Na Figura C.2 estão apresentadas as informações de altura e capacidade volumétrica das barragens apresentadas no banco de dados de referência e que puderam ser classificadas em função de sua magnitude (414 casos) segundo a classificação da CNRH (2012).

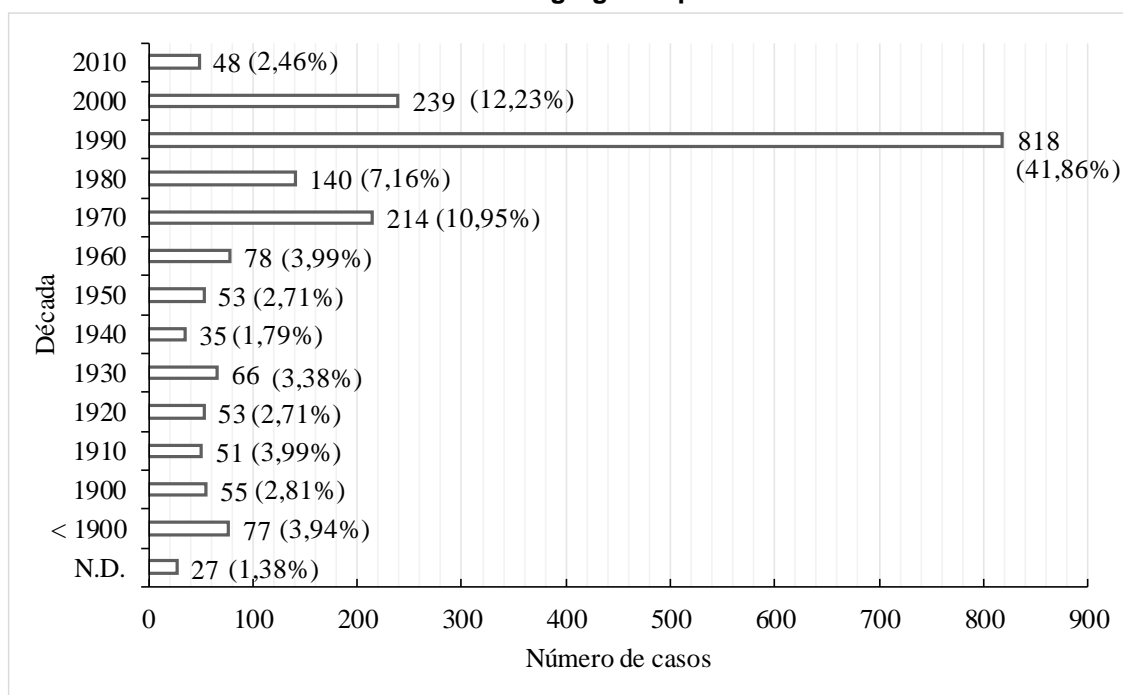
Figura C.2 – Magnitude das barragens rompidas e registradas no banco de dados de referência segundo a classificação do CNRH (2012)



Dentre os registros de ruptura de barragens de terra (1.954 observações), 41,86% correspondem a rupturas que ocorreram na década de 1990. Na Figura C.3 é possível observar o número de casos registrados a cada década. É notável o número de

observações registradas entre o período de 1970 e 2010, que totaliza 1.459 observações e corresponde a 74,67% dos casos observados.

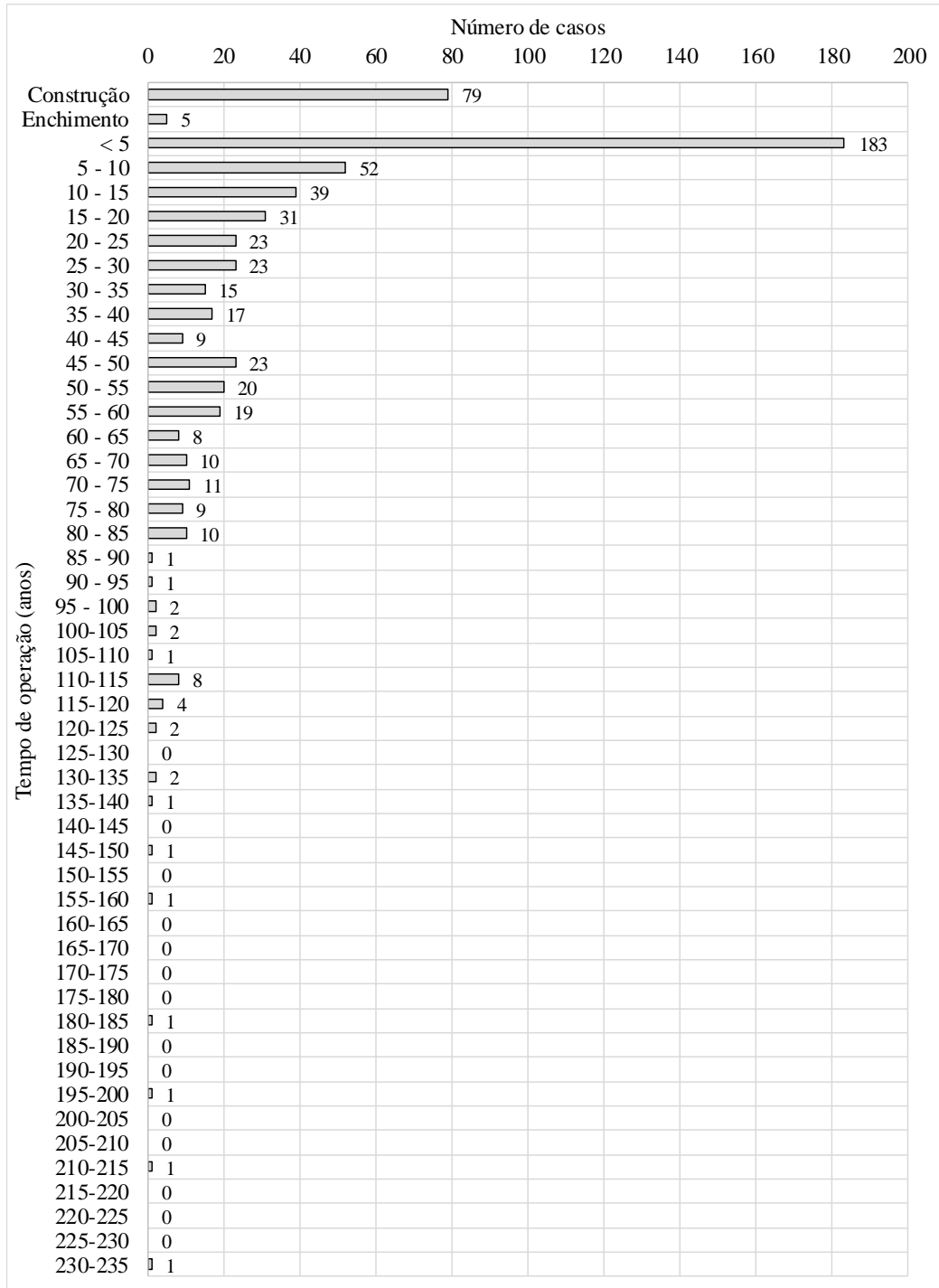
Figura C.3 – Número de casos de ruptura de barragens de terra registrados no banco de dados de referência e segregados por década



Em relação ao intervalo de tempo entre o início da operação da barragem e sua ruptura, observa-se que, dentre as barragens de terra (1.954 observações), a maior parte das rupturas é observada nos primeiros 5 anos (183 casos). Observa-se uma tendência de decréscimo no número de casos observados com o aumento do tempo de operação até a faixa de operação entre 45 a 60 anos. Essa faixa apresenta um ligeiro aumento no número de casos que, posteriormente, volta a apresentar uma tendência de queda. Uma parcela considerável das rupturas registradas no banco de dados de referência foi observada durante sua construção (79 casos).

Ressalta-se que a maior parte dos registros não apresenta essas informações (1.337 casos). Na Figura C.4 está apresentada o histograma de distribuição dos números de casos em relação ao tempo de operação das barragens considerando um intervalo de classe igual a 5 anos.

Figura C.4 – Histograma do tempo para a ruptura das barragens de terra registrados no banco de dados de referência



Quanto a distribuição geográfica das rupturas de barragens de terra registradas no banco de dados de referência, observa-se que a grande maioria dos casos descritos se referem a rupturas que ocorram nos Estados Unidos (1.790 casos – 91,70%). O

segundo país com maior número de registros é a China, com 60 casos (3,07%). Das rupturas de barragens de terra que já ocorreram no Brasil, apenas 7 estão apresentadas no banco de dados de referência, sendo elas: Algodões, Armando de S. Oliveira, Boa Esperança, EMA, Euclides da Cunha, Orós, Pampulha e Salles Oliveira. Ao todo, no banco de dados, constam rupturas de barragens de terra em 39 países, sendo que em 22 deles apenas uma ruptura foi inserida no banco de dados de referência. A Tabela C.1 apresenta os números referentes a distribuição geográfica dos casos de ruptura de barragens de terra registradas no banco de dados de referência.

Tabela C.1 – Distribuição geográfica dos casos de ruptura das barragens de barragens de terra registrados no banco de dados de referência

País	Número de casos	País	Número de casos	País	Número de casos
Estados Unidos	1.790	Japão	7	Alemanha	2
China	60	África do Sul	7	Argélia	2
Inglaterra	18	Austrália	4	Líbia	2
Canadá	12	Chile	4	México	2
Grã-Bretanha	8	República Checa	3	Suécia	2
Brasil	7	Colômbia	2	Outros*	22

*Bolívia, França, Croácia, Indonésia, Iraque, Quênia, Coreia, Sri Lanka, Lesoto, Holanda, Nova Zelândia, Paquistão, Polônia, Romênia, URSS, Síria, Uruguai, Vietnã, Iêmen, Iugoslávia, Cazaquistão, Nepal

APÊNDICE D – Resultados complementares da análise comparativa por grupos

A seguir apresentam-se os valores dos testes de Kruskal-Wallis aplicados aos conjuntos de dados dos parâmetros de brecha. Aqueles grupos que tiveram a hipótese nula rejeitada também foram avaliados pelo teste post-hoc de Dunn, sendo os resultados desse teste também apresentado a seguir.

Tabela D.1 – Teste de Kruskal-Wallis para análise comparativa por grupos de Z

Variável Explicativa	Estatística do Teste	Graus de liberdade	p-valor	H ₀
Modo de Falha	16,145	3	0,0011	Rejeitada a um nível de significância de 5%
Tipo Específico	50,273	5	0,4126	Não há evidências suficientes para rejeitar
Presença de Núcleo	23,451	2	0,3096	Não há evidências suficientes para rejeitar
Erodibilidade	26,237	3	0,4533	Não há evidências suficientes para rejeitar
Magnitude	38,484	4	0,4269	Não há evidências suficientes para rejeitar
Altura	16,361	4	0,8023	Não há evidências suficientes para rejeitar
Volume	99,194	4	0,0418	Rejeitada a um nível de significância de 5%
Forma do Vale	10,369	3	0,7923	Não há evidências suficientes para rejeitar

Tabela D.2 – Teste de Dunn para análise comparativa de grupos de Z

Modo de Falha							
Grupo 1	Grupo 2	N#1	N#2	Estatística do Teste	p-valor	p-valor ajustado	H ₀
DT	EI	2	62	-0,257	0,797	1,000	Não rejeitada
DT	GG	2	116	0,579	0,563	1,000	Não rejeitada
DT	PC	2	5	-0,451	0,652	1,000	Não rejeitada
EI	GG	62	116	3,800	9 x 10⁻⁴	0,001	Rejeitada (significância de 5%)
EI	PC	62	5	-0,414	0,679	1,000	Não rejeitada
GG	PC	116	5	-1,730	0,084	0,502	Não rejeitada
Volume							
G	M	5	43	-0,236	0,814	1,000	Não rejeitada
G	MG	5	5	1,270	0,205	1,000	Não rejeitada
G	ND	5	30	-0,677	0,498	1,000	Não rejeitada
G	P	5	102	-0,949	0,343	1,000	Não rejeitada
M	MG	43	5	1,930	0,053	0,534	Não rejeitada
M	ND	43	30	-0,908	0,364	1,000	Não rejeitada
M	P	43	102	-1,780	0,075	0,752	Não rejeitada
MG	ND	5	30	-2,340	0,019	0,195	Não rejeitada
MG	P	5	102	-2,700	0,007	0,070	Não rejeitada
ND	P	30	102	-0,518	0,604	1,000	Não rejeitada

Tabela D.3 – Teste de Kruskal-Wallis para análise comparativa por grupos de H_B/H_d

Variável Explicativa	Estatística do Teste	Graus de liberdade	p-valor	H ₀
Modo de Falha	2,941	5	0,709	Não há evidências suficientes para rejeitar
Tipo Específico	22,741	5	4 x 10⁻⁴	Rejeitada a um nível de significância de 5%
Presença de Núcleo	10,851	2	0,004	Não há evidências suficientes para rejeitar
Erodibilidade	11,249	3	0,010	Não há evidências suficientes para rejeitar
Magnitude	29,801	4	5 x 10⁻⁶	Rejeitada a um nível de significância de 5%
Altura	9,495	3	0,023	Não há evidências suficientes para rejeitar
Volume	29,270	4	7 x 10⁻⁶	Rejeitada a um nível de significância de 5%
Forma do Vale	20,877	3	1 x 10⁻⁴	Rejeitada a um nível de significância de 5%

Tabela D.4 – Teste de Dunn para análise comparativa de grupos de H_B/H_d

Modo de Falha							
Grupo 1	Grupo 2	N#1	N#2	Estatística do Teste	p-valor	p-valor ajustado	H ₀
COM	FC	8	5	1,950	0,051	0,765	Não rejeitada
COM	HOM	8	163	1,340	0,181	1,000	Não rejeitada
COM	ND	8	77	-0,204	0,838	1,000	Não rejeitada
COM	TNU	8	31	0,764	0,445	1,000	Não rejeitada
COM	ZON	8	27	1,530	0,126	1,000	Não rejeitada
FC	HOM	5	163	-1,380	0,167	1,000	Não rejeitada
FC	ND	5	77	-2,580	0,010	0,150	Não rejeitada
FC	TNU	5	31	-1,680	0,093	1,000	Não rejeitada
FC	ZON	5	27	-1,02	0,308	1,000	Não rejeitada
HOM	ND	163	77	-4,05	5 x 10⁻⁵	0,001	Rejeitada (significância de 5%)
HOM	TNU	163	31	-0,926	0,354	1,000	Não rejeitada
HOM	ZON	163	27	0,633	0,527	1,000	Não rejeitada
ND	TNU	77	31	1,780	0,075	1,000	Não rejeitada
ND	ZON	77	27	3,090	0,002	0,030	Rejeitada (significância de 5%)
TNU	ZON	31	27	1,190	0,234	1,000	Não rejeitada
Magnitude							
G	M	19	75	0,113	0,910	1,000	Não rejeitada
G	MG	19	8	-2,200	0,028	0,280	Não rejeitada
G	ND	19	95	-2,160	0,031	0,311	Não rejeitada
G	P	19	114	0,435	0,663	1,000	Não rejeitada
M	MG	75	8	-2,570	0,010	0,102	Não rejeitada
M	ND	75	95	-3,700	2 x 10⁻⁴	0,002	Rejeitada (significância de 5%)
M	P	75	114	0,530	0,596	1,000	Não rejeitada
MG	ND	8	95	1,04	0,297	1,000	Não rejeitada

Tabela D.4 – Teste de Dunn para análise comparativa de grupos de H_B/H_d (Continuação)

Grupo 1	Grupo 2	N#1	N#2	Estatística do Teste	Magnitude		H ₀
					p-valor	p-valor ajustado	
MG	P	8	114	2.830	0.005	0.047	Rejeitada (significância de 5%)
ND	P	95	114	4.680	3×10^{-6}	3×10^{-5}	Rejeitada (significância de 5%)
Volume							
G	M	5	54	-1,700	0,088	0,885	Não rejeitada
G	MG	5	6	-2,690	0,007	0,072	Não rejeitada
G	ND	5	95	-3,120	0,002	0,018	Não rejeitada
G	P	5	151	-1,920	0,054	0,543	Não rejeitada
M	MG	54	6	-1,930	0,053	0,532	Não rejeitada
M	ND	54	95	-3,720	2×10^{-4}	0,002	Rejeitada (significância de 5%)
M	P	54	151	-0,494	0,621	1,000	Não rejeitada
MG	ND	6	95	0,470	0,638	1,000	Não rejeitada
MG	P	6	151	1,810	0,070	0,703	Não rejeitada
ND	P	95	151	4,240	2×10^{-5}	2×10^{-4}	Rejeitada (significância de 5%)
Forma do Vale							
EST	INT	61	87	1,010	0,313	1,000	Não rejeitada
EST	LRG	61	42	1,010	0,313	1,000	Não rejeitada
EST	ND	61	121	-2,500	0,013	0,075	Não rejeitada
INT	LRG	87	42	0,182	0,856	1,000	Não rejeitada
INT	ND	87	121	-3,990	6×10^{-5}	4×10^{-4}	Rejeitada (significância de 5%)
LRG	ND	42	121	-3,320	0,001	0,005	Rejeitada (significância de 5%)

Tabela D.5 – Teste de Kruskal-Wallis para análise comparativa por grupos de T_f

Variável Explicativa	Estatística do Teste	Graus de liberdade	p-valor	H ₀
Modo de Falha	3,570	3	0,312	Não há evidências suficientes para rejeitar
Tipo Específico	3,071	5	0,689	Não há evidências suficientes para rejeitar
Presença de Núcleo	1,261	2	0,532	Não há evidências suficientes para rejeitar
Erodibilidade	6,638	3	0,084	Não há evidências suficientes para rejeitar
Magnitude	4,252	4	0,373	Não há evidências suficientes para rejeitar
Altura	2,389	4	0,665	Não há evidências suficientes para rejeitar
Volume	4,929	4	0,295	Não há evidências suficientes para rejeitar
Forma do Vale	2,056	3	0,561	Não há evidências suficientes para rejeitar

Tabela D.6 – Teste de Kruskal-Wallis para análise comparativa por grupos de *L_{Bf}/L_{crista}*

Variável Explicativa	Estatística do Teste	Graus de liberdade	p-valor	H ₀
Modo de Falha	1,956	3	0,582	Não há evidências suficientes para rejeitar
Tipo Específico	3,706	5	0,593	Não há evidências suficientes para rejeitar
Presença de Núcleo	2,929	2	0,231	Não há evidências suficientes para rejeitar
Erodibilidade	4,363	3	0,225	Não há evidências suficientes para rejeitar
Magnitude	3,310	4	0,507	Não há evidências suficientes para rejeitar
Altura	10,220	4	0,037	Rejeitada a um nível de significância de 5%
Volume	2,674	4	0,614	Não há evidências suficientes para rejeitar
Forma do Vale	9,094	3	0,028	Rejeitada a um nível de significância de 5%

Tabela D.7 – Teste de Dunn para análise comparativa de grupos de *L_{Bf}/L_{crista}*

Grupo 1	Grupo 2	N#1	N#2	Estatística do Teste	Altura		H ₀
					p-valor	p-valor ajustado	
G	M	8	40	-2,750	0,006	0,059	Não rejeitada
G	MG	8	3	-2,650	0,008	0,080	Não rejeitada
G	ND	8	1	-0,705	0,481	1,000	Não rejeitada
G	P	8	92	-2,300	0,022	0,216	Não rejeitada
M	MG	40	3	-1,220	0,223	1,000	Não rejeitada
M	ND	40	1	0,315	0,753	1,000	Não rejeitada
M	P	40	92	1,160	0,246	1,000	Não rejeitada
MG	ND	3	1	0,908	0,364	1,000	Não rejeitada
MG	P	3	92	1,620	0,106	1,000	Não rejeitada
ND	P	1	92	-0,099	0,921	1,000	Não rejeitada
Forma do Vale							
EST	INT	43	67	1,410	0,158	0,948	Não rejeitada
EST	LRG	43	33	-1,560	0,120	0,718	Não rejeitada
EST	ND	43	1	0,178	0,859	1,000	Não rejeitada
INT	LRG	67	33	-2,990	0,003	0,017	Rejeitada (significância de 5%)
INT	ND	67	1	-0,096	0,924	1,000	Não rejeitada
LRG	ND	33	1	0,532	0,595	1,000	Não rejeitada

APÊNDICE E – AJUSTE GRÁFICO DOS MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

Figura E.1 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach para Z (galgamento)

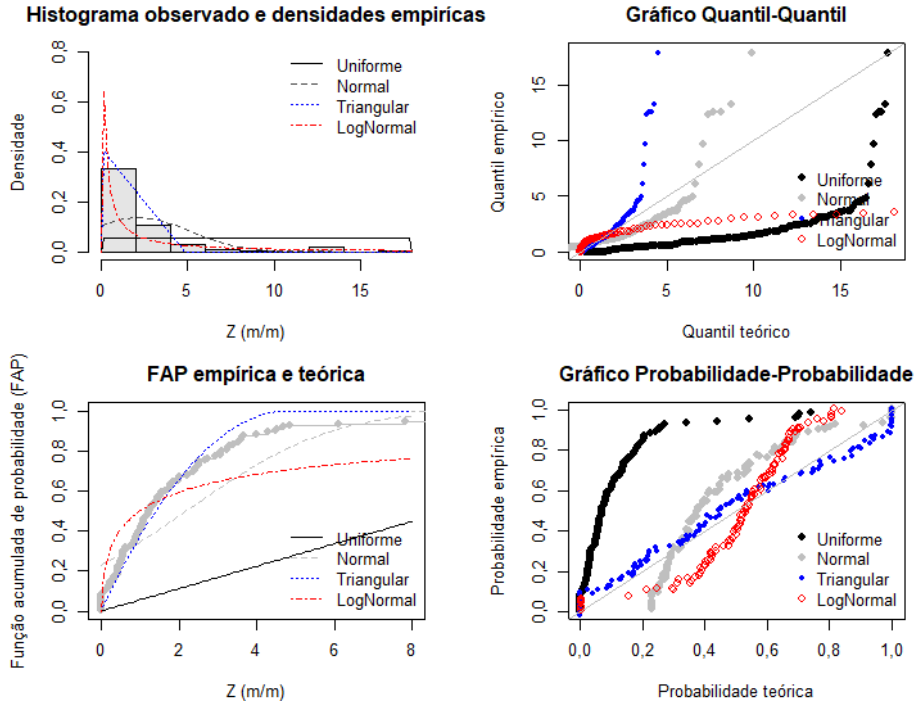


Figura E.2 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais para Z (galgamento)

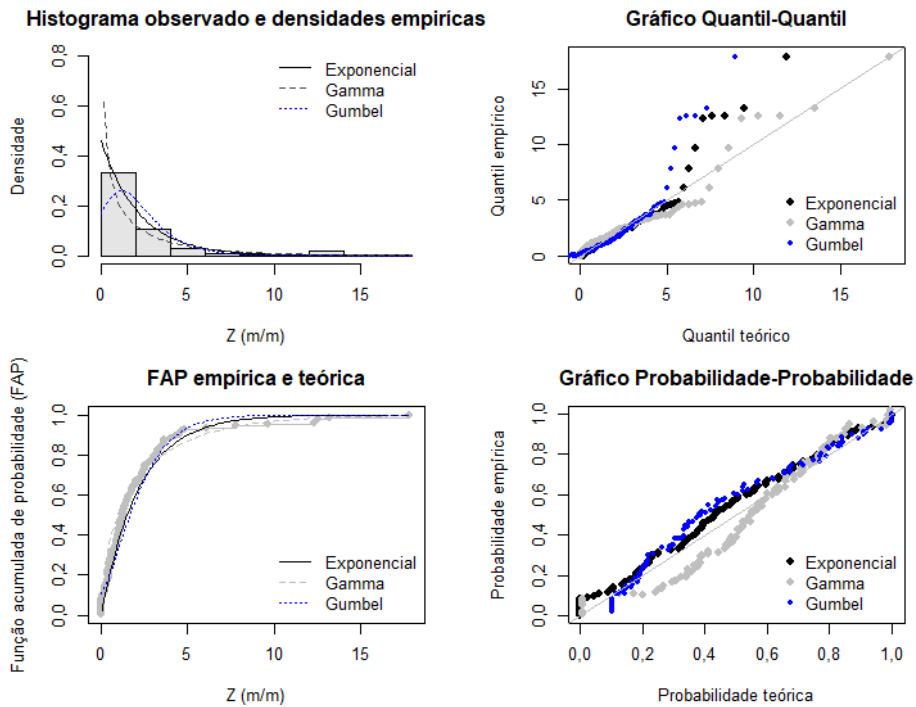


Figura E.3 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach para Z (erosão interna)

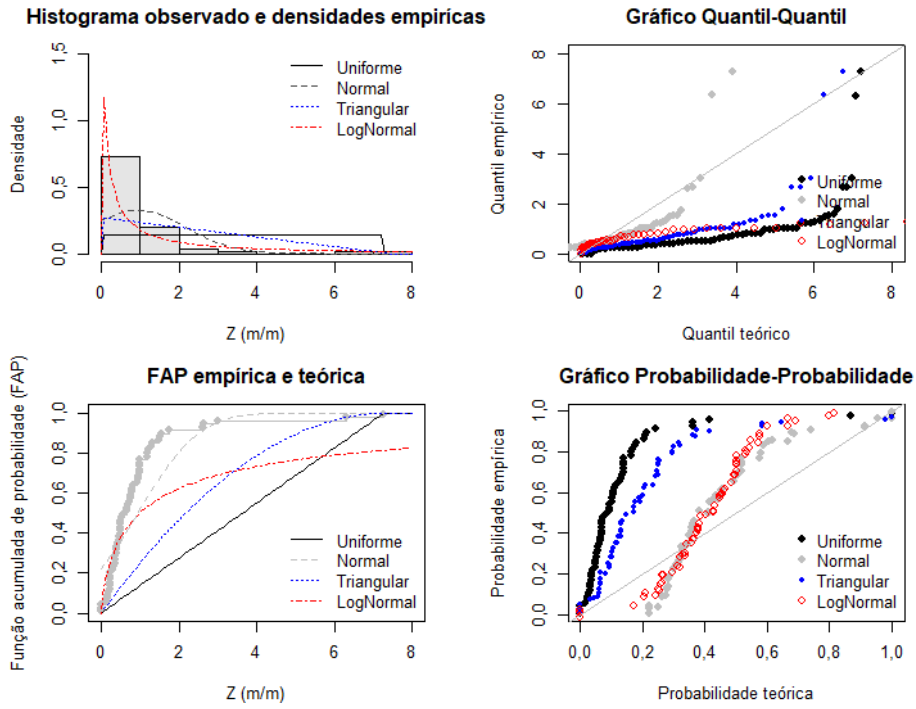


Figura E.4 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais para Z (erosão interna)

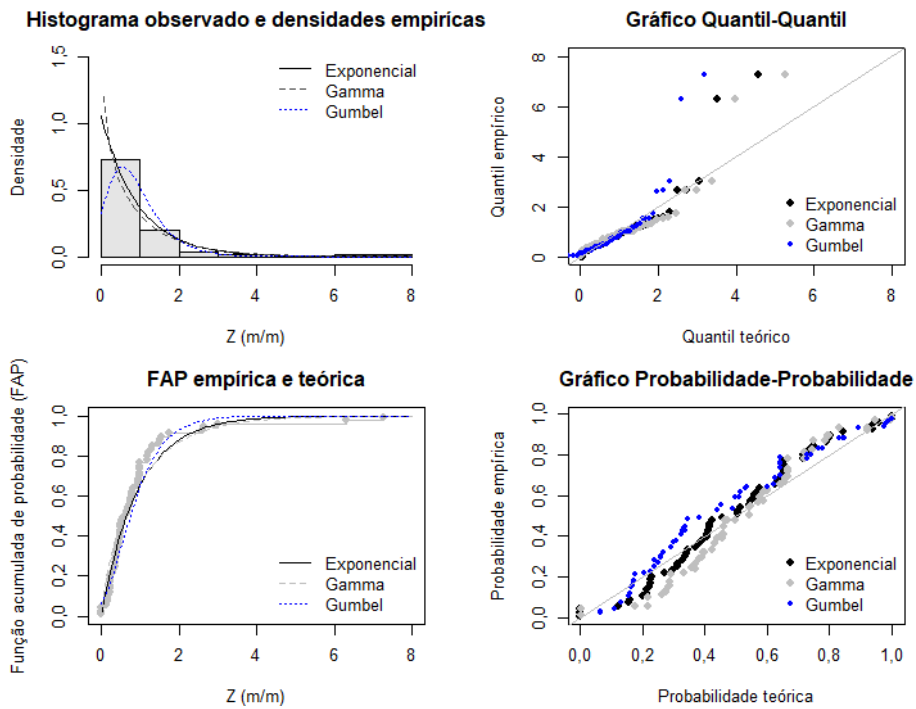


Figura E.5 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach para H_B/H_d

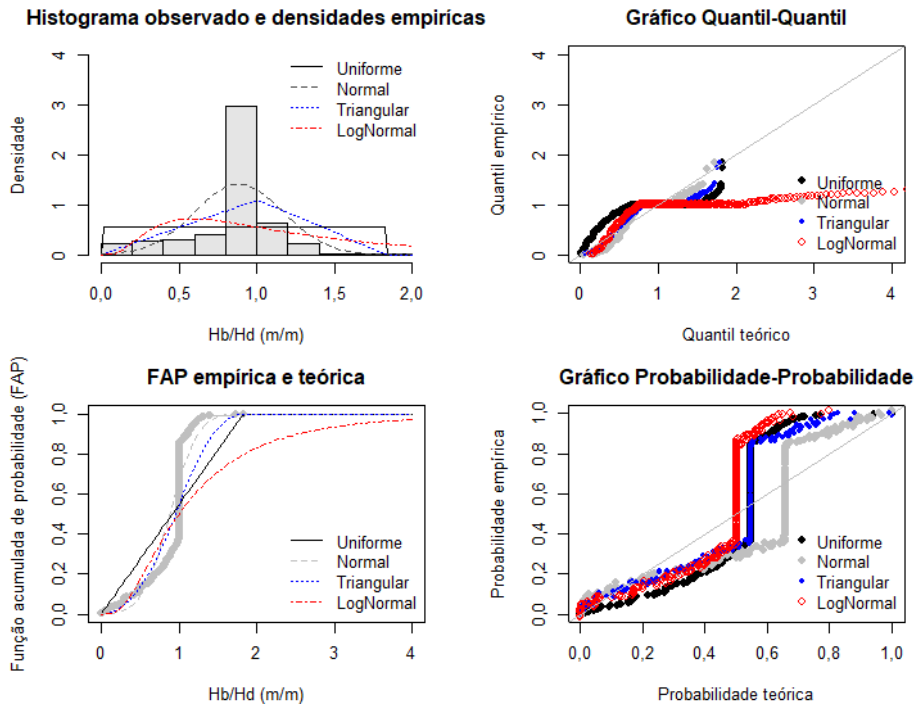


Figura E.6 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais para H_B/H_d

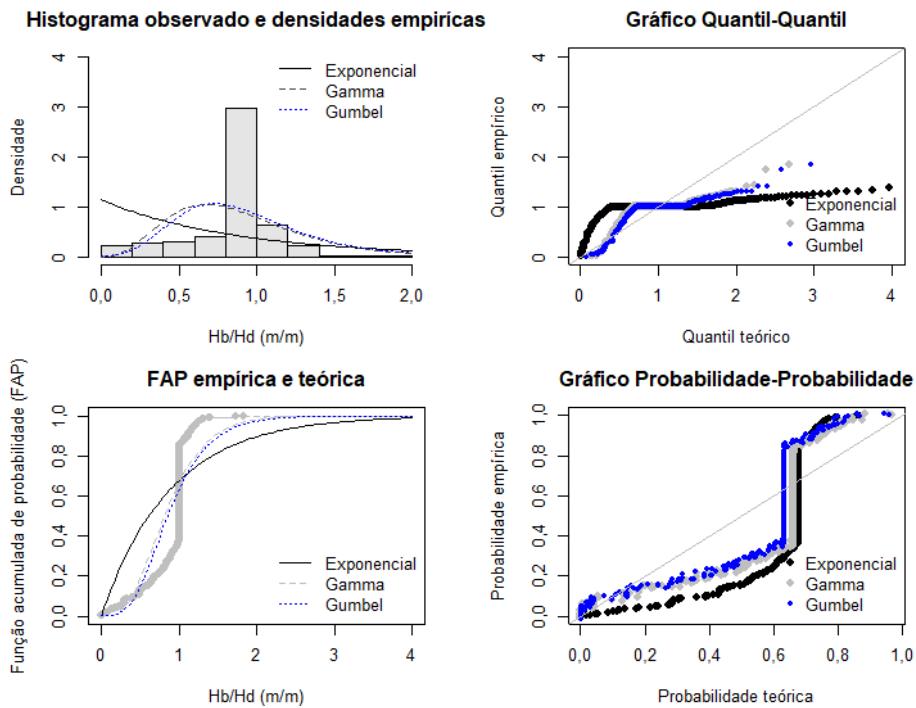


Figura E.7 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach para T_f

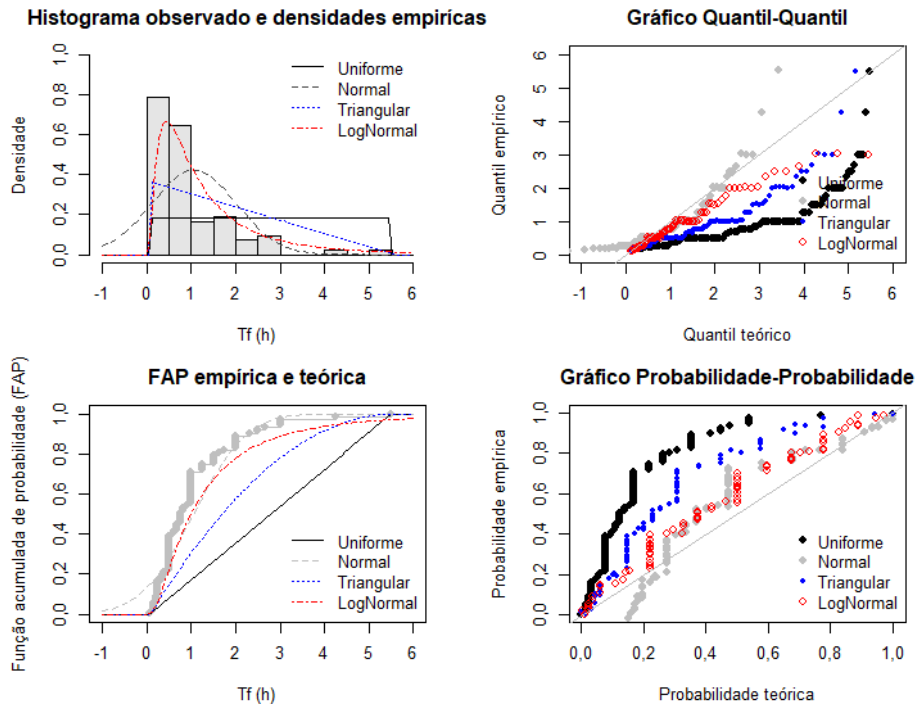


Figura E.8 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais para T_f

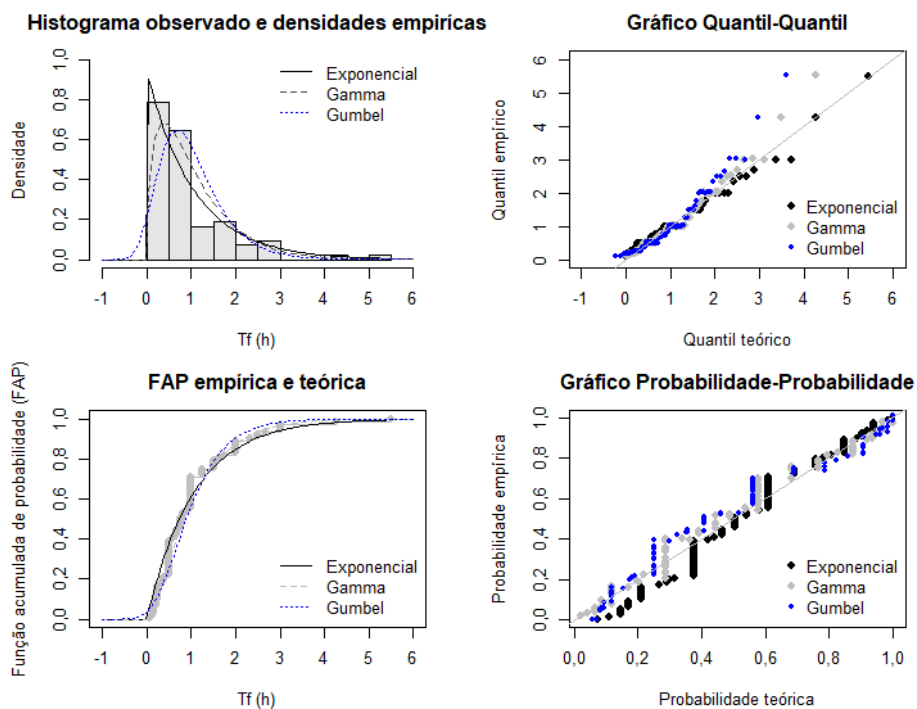


Figura E.9 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach L_{Bf}/L_{crista} (bar. est. total)

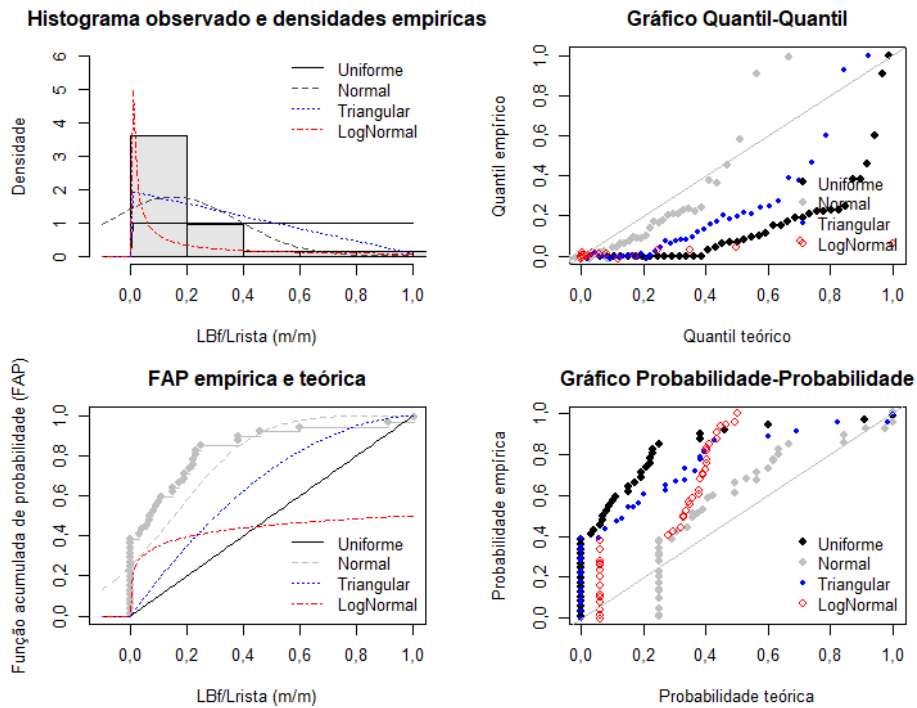


Figura E.10 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais L_{Bf}/L_{crista} (barragens estreitas total)

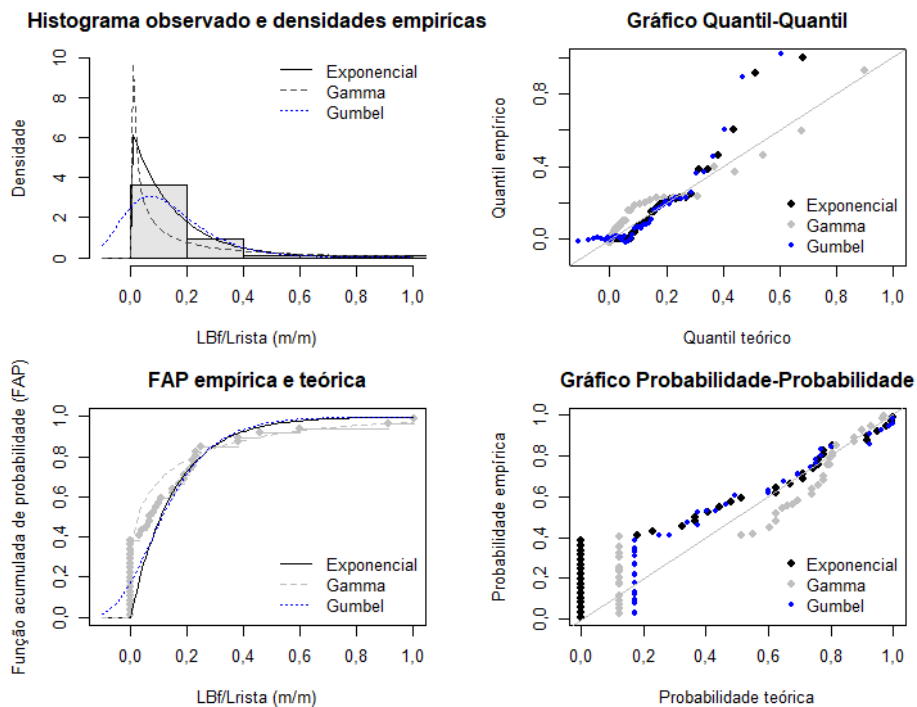


Figura E.11 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach L_{Bf}/L_{crista} (b. est. pad.)

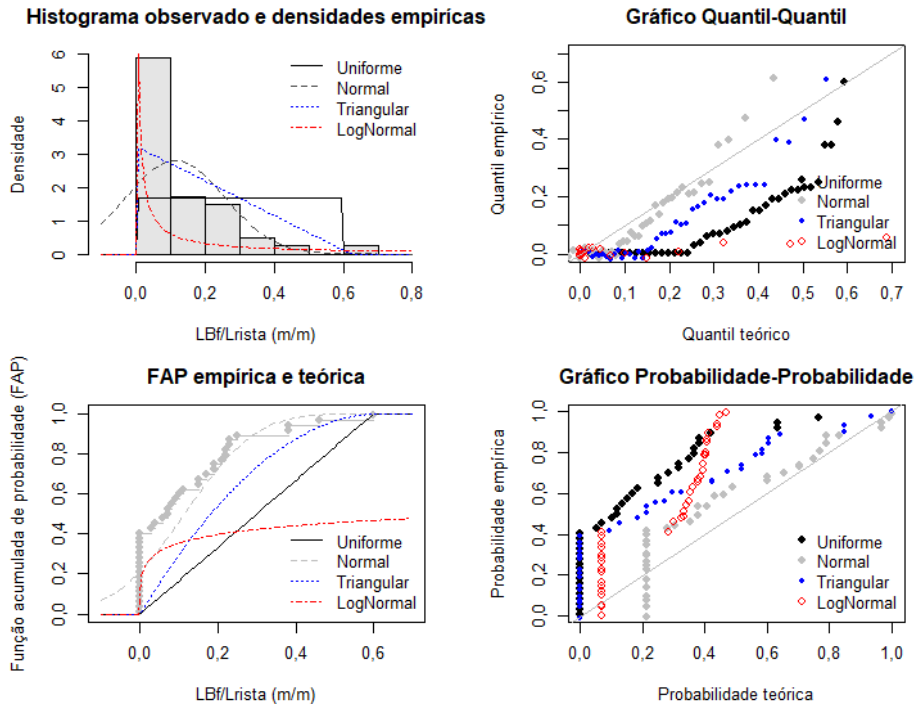


Figura E.12 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais L_{Bf}/L_{crista} (barragens estreitas padrão)

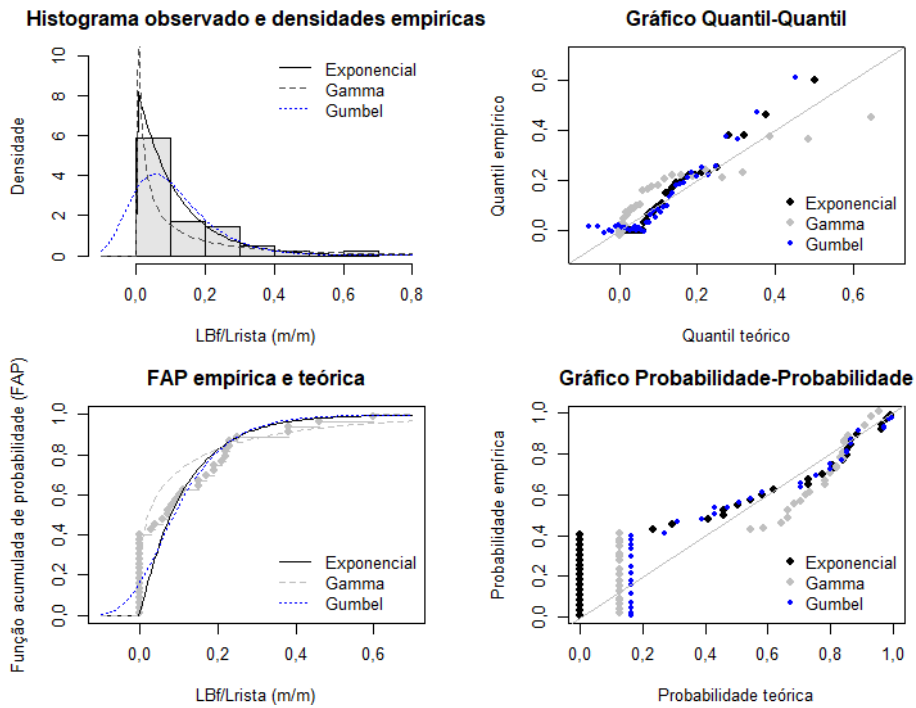


Figura E.13 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach L_{Bf}/L_{crista} (bar. int. total)

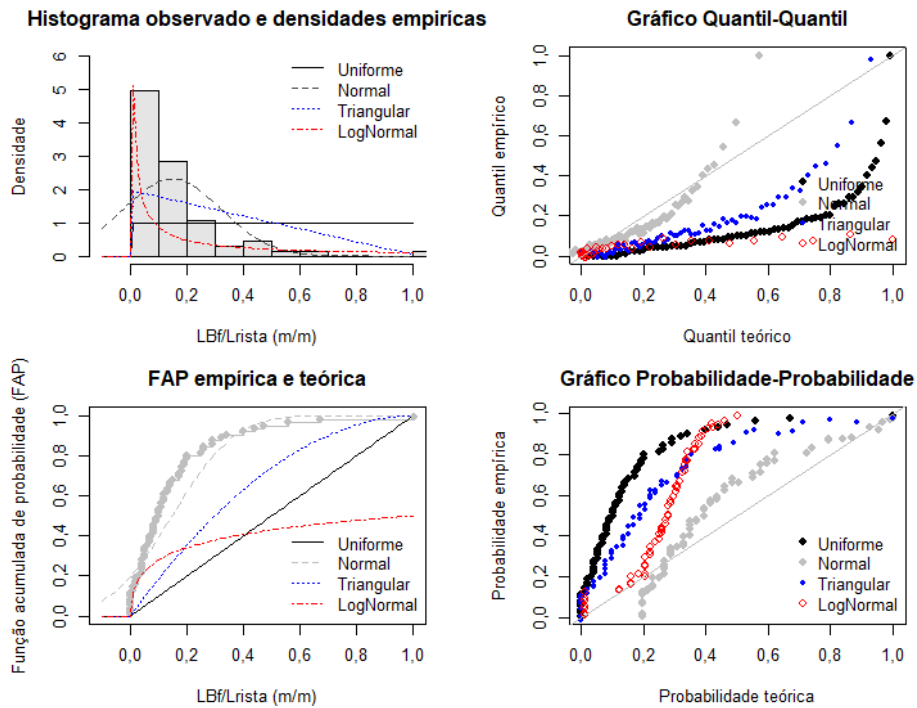


Figura E.14 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais L_{Bf}/L_{crista} (barragens int. total)

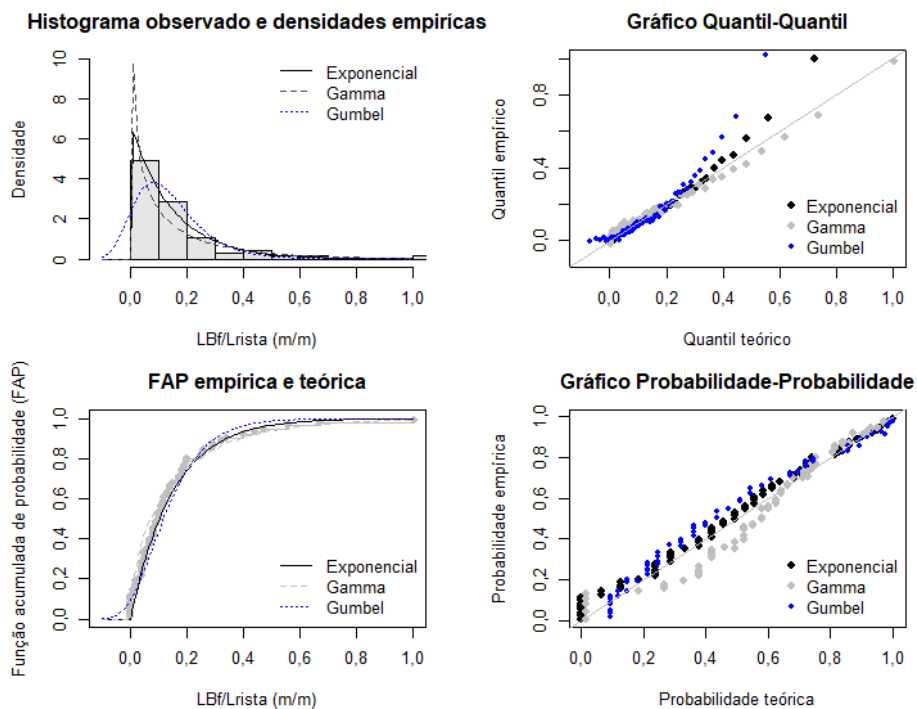


Figura E.15 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach L_{BF}/L_{crista} (bar. int. pad.)

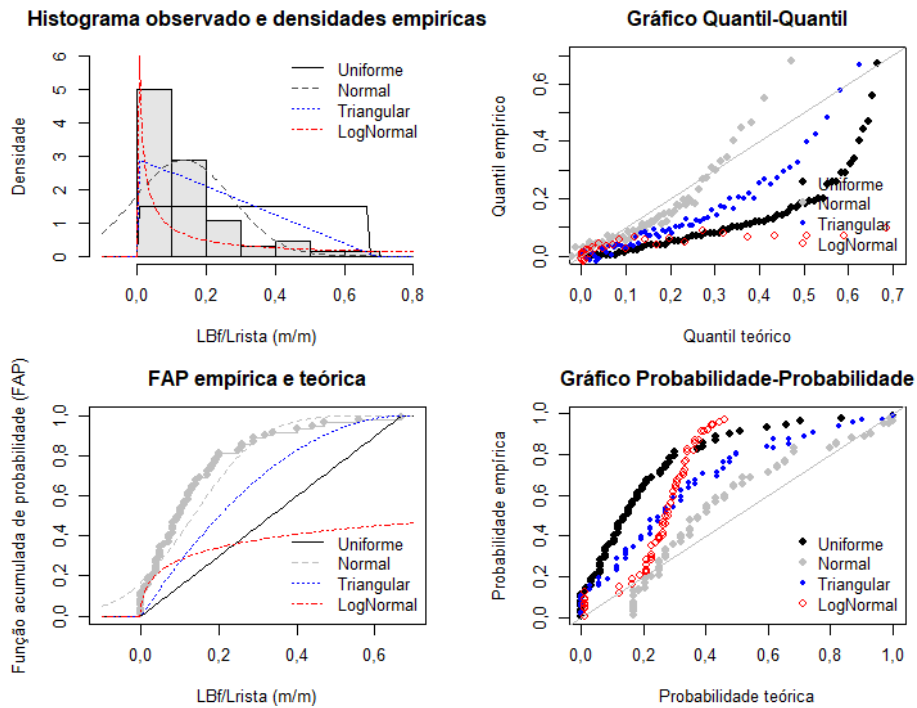


Figura E.16 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais L_{BF}/L_{crista} (barragens int. padrão)

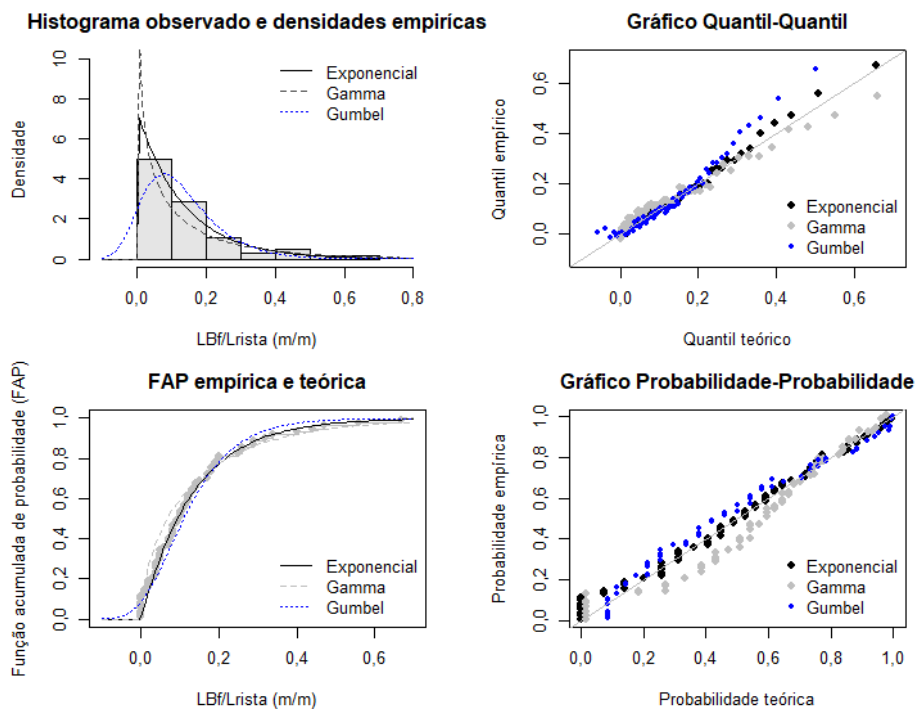


Figura E.17 – Ajuste gráfico dos modelos disponíveis no McBreach L_{Bf}/L_{crista} (bar. largas)

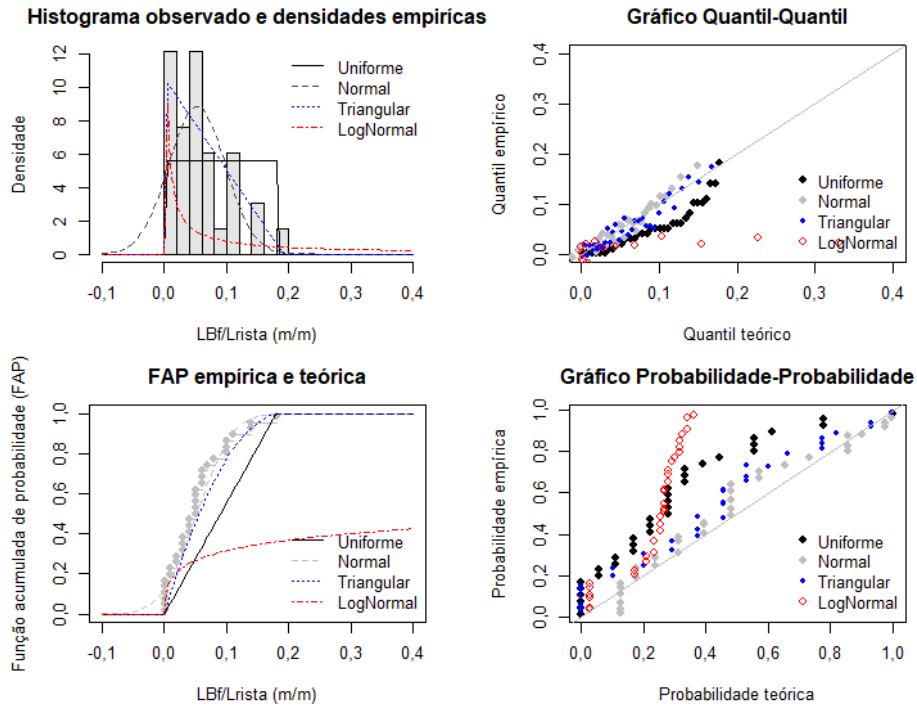
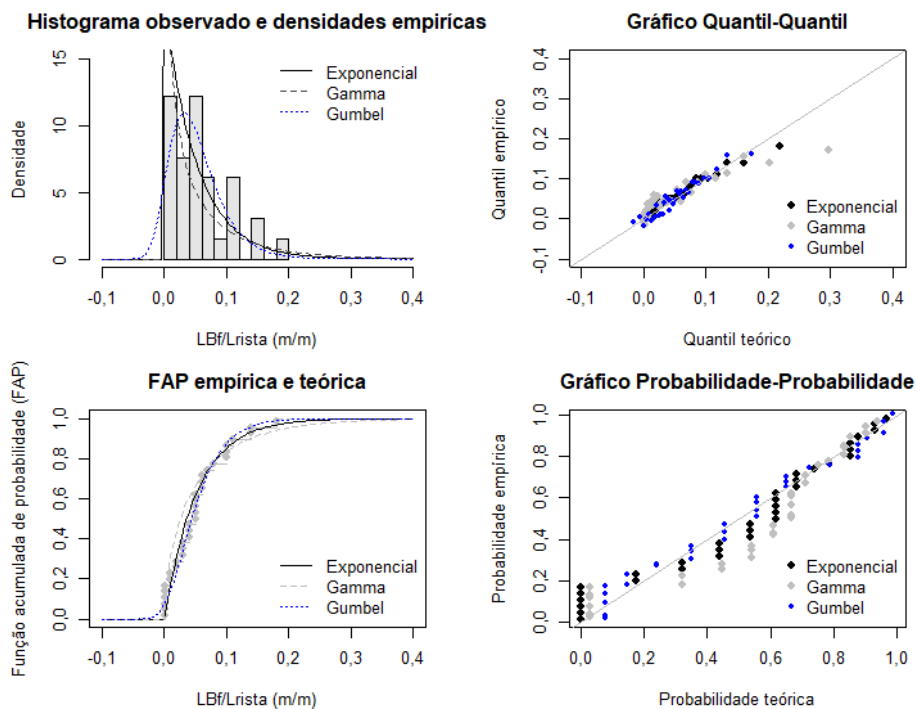


Figura E.18 – Ajuste gráfico dos modelos adicionais para L_{Bf}/L_{crista} (barragens largas)



APÊNDICE F – LÓGICA CONDICIONAL UTILIZADA PARA A AMOSTRAGEM DOS PARAMETROS DE BRECHA

n = número de repetições
 HB = altura barragem
 El_crista = cota de crista
 El_rocha = cota rocha sã
 EL_FUN = cota de fundo da brecha
 Lcrista = comprimento da crista
 ZE = declividade da parede lateral esquerda
 ZD = declividade da parede lateral direita
 LF = largura fundo da brecha
 L_topo = largura de topo da brecha
 laplace_asyymmetric.rvs = função para geração aleatória de números segundo uma distribuição de probabilidade Laplace Assimétrica (biblioteca scipy.stats)
 np.random.gamma = função para geração aleatória de números segundo uma distribuição de probabilidade Gama (biblioteca numpy)

for i in range(n):

```

X = El_crista - laplace_asyymmetric.rvs(loc, scale, kappa)*HB
while X < El_rocha:
    X = El_crista - laplace_asyymmetric.rvs(loc, scale, kappa)*HB
else:
    EL_FUN = X
  
```

```

Y = np.random.gamma(shape,scale)*Lcrista
while Y > Lcrista:
    Y = np.random.gamma(shape,scale)*Lcrista
else:
    LF = Y
  
```

```

ZE=np.random.gamma(shape,scale)
ZD=np.random.gamma(shape,scale)
L_topo = LF+ZE*(El_crista-EL_FUN)+ZD*(El_crista-EL_FUN)
  
```

```

while L_topo > 1.1*Lcrista:
    ZE=np.random.gamma(shape,scale)
    ZD=np.random.gamma(shape,scale)
    L_topo = LF+ZE*(El_crista-EL_FUN)+ZD*(El_crista-EL_FUN)
else:
    Z_esq = ZE
    Z_dir = ZD
  
```

```

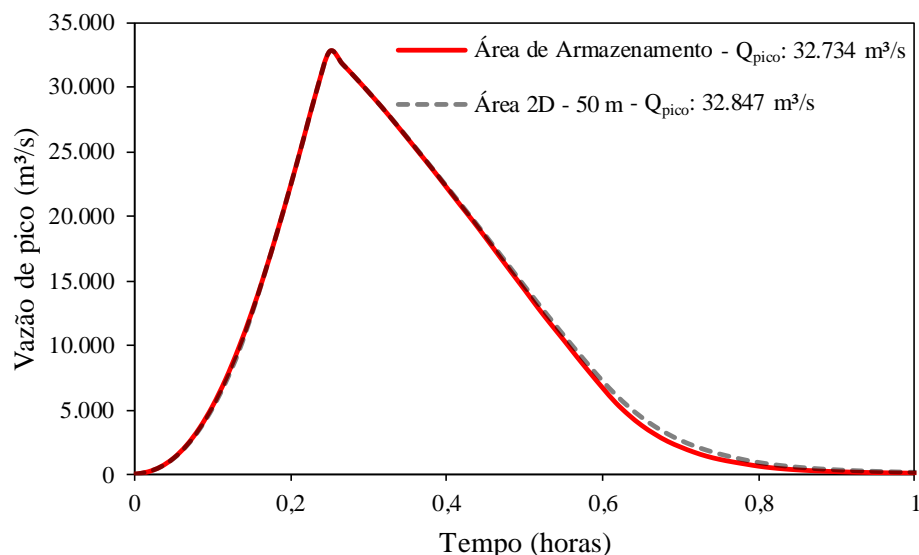
TF=np.random.gamma(shape,scale)
  
```

APENDICE G – ANÁLISES E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES RELATIVAS AO MODELO HIDRÁULICO

O modelo hidráulico definido para a estimativa do hidrograma defluente da ruptura da barragem em análise, considerou o reservatório da barragem como uma área de armazenamento ao invés de uma malha computacional representativa do terreno. Conforme discutido no Item 5.1, esse aspecto pode ocasionar diferenças nos resultados da análise, a depender da configuração da barragem e o do vale a jusante. Dessa forma, foi realizado uma análise de sensibilidade para verificar se haveria alteração nos resultados do hidrograma de ruptura defluente para os dois métodos disponíveis.

A Figura G.1 apresenta os hidrogramas resultantes de duas simulações em que se varia apenas o método de representação do reservatório da barragem. Observa-se que a variação nos resultados da análise é mínima. Isso indica que, para o presente caso em análise, não haveria grandes alterações nos resultados caso fosse adotado uma malha 2D para representação do reservatório. Dessa forma, entende-se que a área de armazenamento, escolhida na construção do modelo hidráulica, foi capaz de representar o reservatório de maneira satisfatória. A escolha se justifica pela maior estabilidade do modelo considerando essa configuração.

Figura G.1 – Hidrogramas de ruptura resultantes das análises de sensibilidade relativa ao método de representação do reservatório a montante da barragem



Outro aspecto que precisou ser definido para a construção do modelo hidráulico foi a dimensão das células que formam a malha computacional. No modelo computacional

escolhido para a análise, as células são, primordialmente, retangulares. Adotou-se na presente pesquisa células quadráticas de lado igual a 50 m. Conforme descrito no manual do modelo, a dimensão das células da malha pode afetar os resultados da modelagem. Dessa forma, para a escolha da dimensão a ser adotada foi realizado uma análise de sensibilidade. Os critérios para a escolha foram: não alterar de maneira significativa os resultados e reduzir o tempo computacional necessário para o processamento do modelo.

Nesse sentido, adotou-se como referência uma malha formada por células quadráticas com lado igual a 9,50 m, que corresponde a resolução do MDT utilizado para a representação do terreno. Essa seria a melhor resolução possível para a malha computacional, uma vez que células menores não seriam capazes de representar o terreno com uma precisão maior do que a própria base topográfica. Foram testados aumentos progressivos no lado das células, em busca de observar uma resolução que não alterasse de maneira significativa os resultados, ao mesmo tempo que permitisse um menor tempo para o processamento do modelo. Nos testes realizados observou-se que células com lado igual a 50 m melhor atendiam aos critérios estabelecidos, tendo sido a dimensão escolhida para construção do modelo.

A Figura G.2 apresenta os hidrogramas defluentes das análises de sensibilidade em que se alterou apenas a resolução das células da malha computacional a jusante da barragem. Na Tabela G.1, estão indicados a síntese de resultados da análise. Observa-se, no caso em análise, que o hidrograma de ruptura resultante da simulação com célula igual a 50 m foi muito similar ao hidrograma resultante da simulação com malha formada por células igual a 9,5 m. Ao passo que o tempo de processamento foi 99% menor. Esse aspecto foi uma grande vantagem, uma vez que, se considerarmos as 8.000 iterações realizadas, a diferença no tempo computacional seria de 137 dias, prazo inexecutável para a presente pesquisa. A partir de células com lado igual a 60 m já foram observadas algumas diferenças nos hidrogramas, com uma tendência de redução dos picos, o que justificou a adoção de células com lado igual a 50 m, haja visto que além disso o tempo de processamento não teve redução.

Figura G.2 – Hidrogramas de ruptura resultantes das análises de sensibilidade relativa ao método de representação do reservatório a montante da barragem

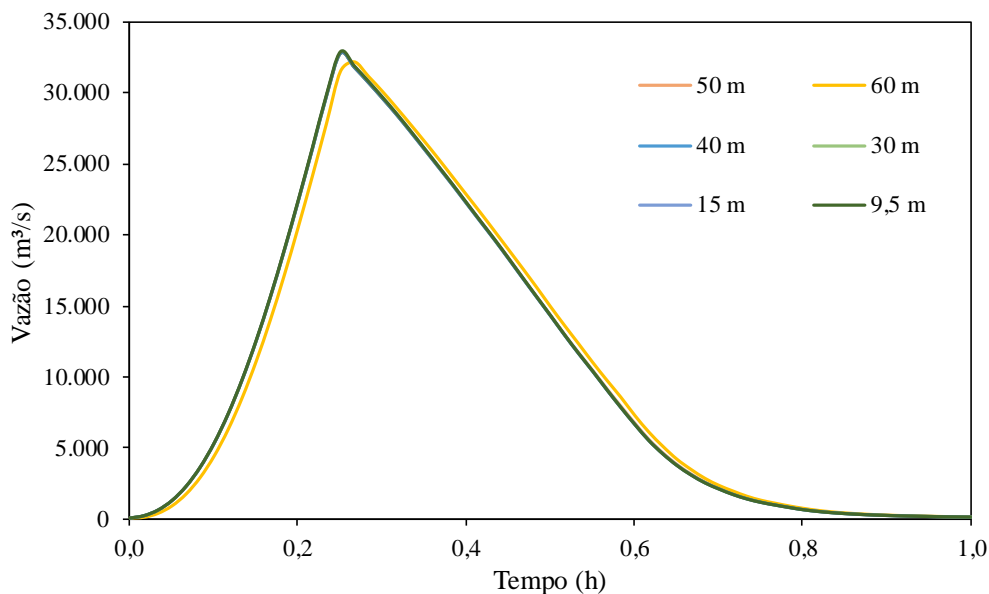


Tabela G.1 – Análise sensibilidade para definição do tamanho da célula computacional

Dimensão da célula computacional	9,5 m	15 m	30 m	40 m	50 m	60 m
Vazão de pico (m³/s)	32.851	32.838	32.809	32.745	32.734	32.213
Variação na vazão de pico	0,00%	0,04%	0,13%	0,32%	0,35%	1,94%
Número de células	56.593	22.619	5.602	3.139	1.998	1.373
Tempo de processamento (s)	1.493	351	72	58	14	14
Variação no Tempo de processamento	0%	- 76%	- 95%	- 96%	- 99%	- 99%
Tempo de processamento 8.000 iterações (dias)	138,2	32,5	6,7	5,4	1,3	1,3

A malha computacional do modelo truncado foi definida por 33 vértices, que estão apresentados na Tabela G.2. Na Tabela G.3 estão apresentados os coeficientes de Manning que foram utilizados como base para o cálculo do valor médio adotado nas análises.

Tabela G.3 – Vértices da malha computacional adotada no modelo truncado

X	Y	X	Y	X	Y
4.403	7.068	7.318	7.924	6.545	6.929
4.490	7.113	7.715	8.027	6.238	6.782
4.602	7.143	7.728	8.644	5.981	6.657
4.773	7.184	8.083	8.894	5.276	6.480
5.010	7.238	8.488	9.062	4.939	6.467
5.238	7.258	9.031	9.080	4.765	6.418
5.493	7.301	9.196	8.074	4.671	6.447
5.748	7.385	9.145	7.301	4.596	6.356
6.156	7.511	8.666	7.239	4.519	6.652
6.568	7.657	8.172	7.130	4.518	6.655
6.854	7.777	6.726	6.908	4.403	7.068

Tabela G.4 – Coeficiente de Manning de referência

Classificação do NLCD*	HRW	LANL	MANC	MCV	Média
11	0,010	0,020	0,020	0,025	0,019
21	0,029	0,032	0,050	0,030	0,035
22	0,030	0,079	0,120	0,030	0,065
23	0,031	0,096	0,120	0,050	0,074
24	0,032	0,104	0,121	0,025	0,070
31	0,022	0,044	0,040	0,120	0,056
41	0,073	0,120	0,160	0,200	0,138
42	0,251	0,130	0,180	0,070	0,158
43	0,142	0,130	0,170	0,050	0,123
52	0,073	0,057	0,070	0,030	0,057
71	0,046	0,036	0,035	0,035	0,038
81	0,046	0,039	0,033	0,160	0,070
82	0,054	0,069	0,040	0,110	0,068
90	-	0,150	-	0,160	0,155

APENDICE H - ANALISES COMPLEMENTARES MMC

Avaliação da Amostragem dos Parâmetros

A avaliação da amostragem dos parâmetros de brecha teve como objetivo verificar a aderência dos valores sorteados aos modelos distributivos adotados e a aleatoriedade do amostrador. A análise de aderência se deu pela observação do ajuste gráfico dos resultados obtidos com os modelos propostos e a análise da aleatoriedade também foi feita a partir de uma análise gráfica onde buscou-se observar a presença de algum viés amostral.

Nas Figuras H.1 e H.2 estão apresentados os valores resultantes da etapa de amostragem dos parâmetros de brecha. Nas figuras estão indicados, à esquerda, a dispersão dos valores sorteados de maneira aleatória. As Figuras também indicam, à direita, o histograma dos valores sorteados, em conjunto com a densidade teórica dos modelos de distribuição de probabilidade adotados. Essas informações permitem observar as frequências relativas às diferentes classes de valores sorteados e como elas se aderem ao modelo de distribuição proposto.

Figura H.1 – Amostragem aleatória dos parâmetros de brecha

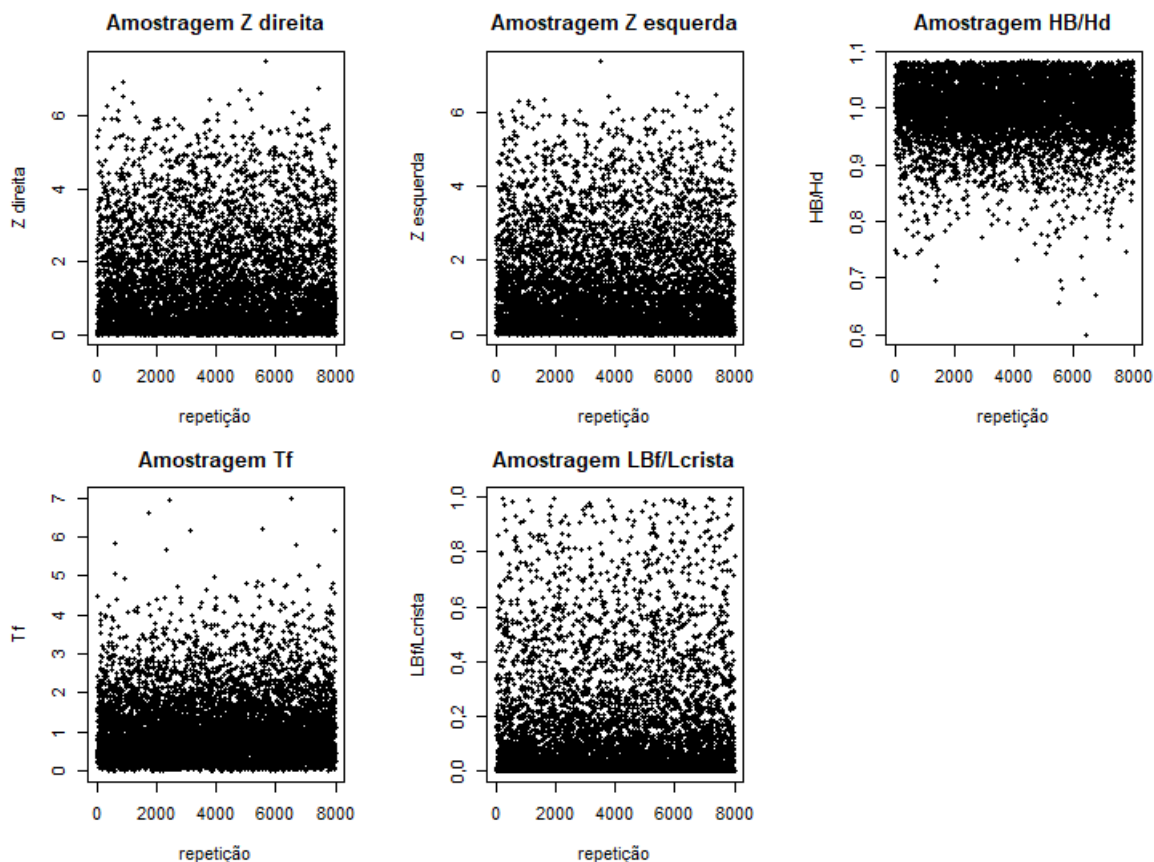
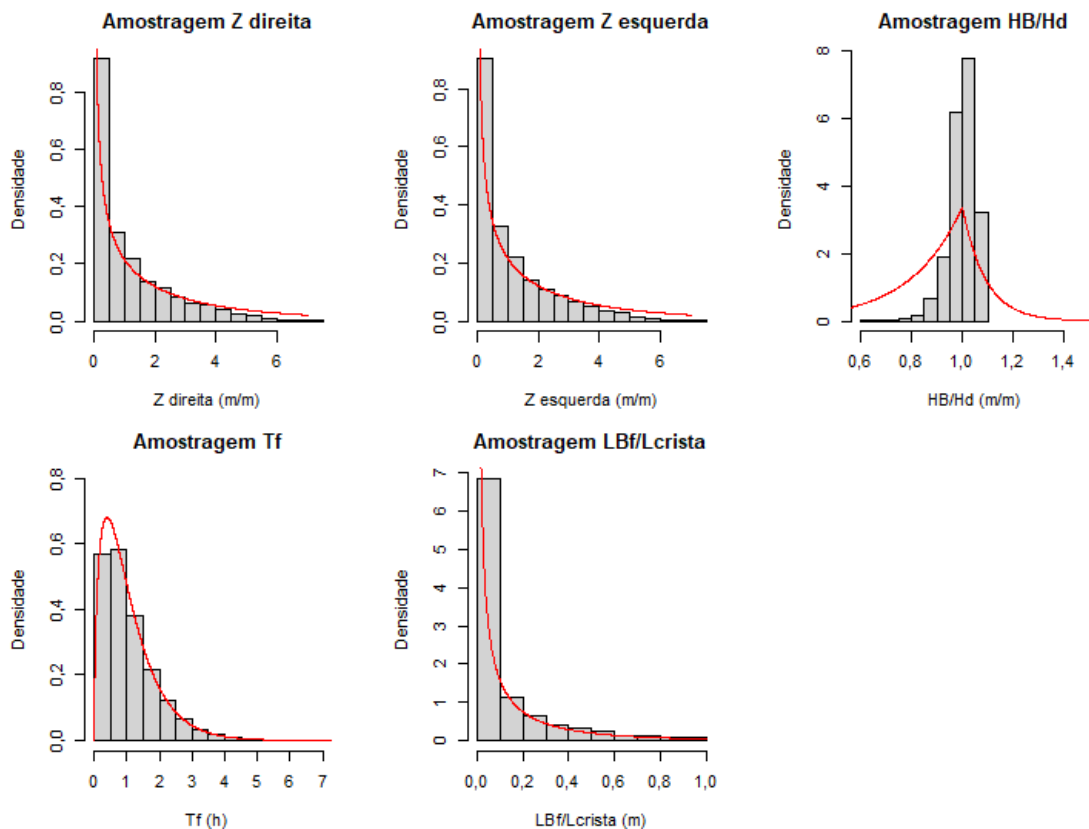


Figura H.2 – Aderência entre modelos de distribuição de probabilidade definidos para amostragem aleatória dos parâmetros de brecha e os resultados observados

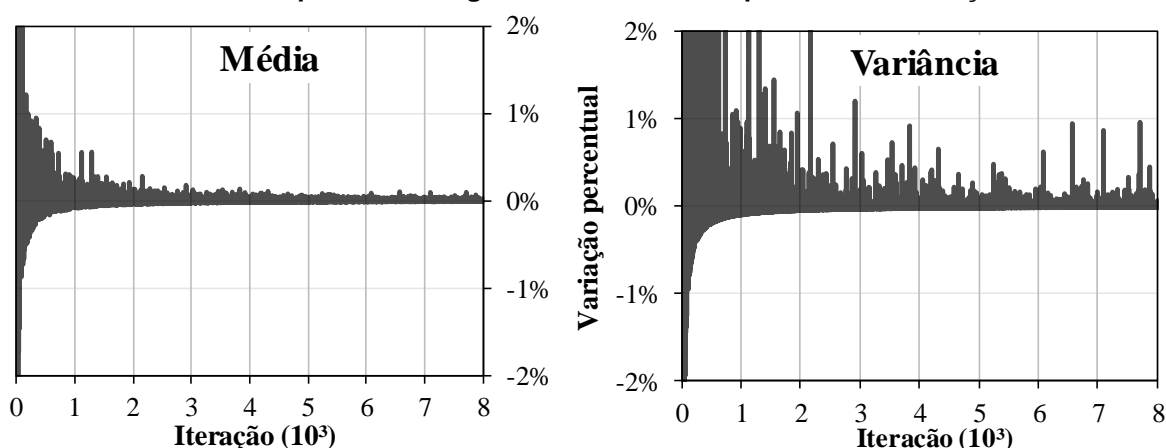


Observa-se que, assim como esperado, os valores amostrados durante o processo de simulação se mostraram aleatórios e sem viés. A aderência entre os resultados amostrados e os modelos de densidade de probabilidade também atenderam às expectativas, demonstrando que o amostrador aplicado foi eficiente na representação dos modelos. Ressalva se faz ao sorteio dos valores de H_B/H_d que apresentou uma pequena divergência entre os dados amostrados e o modelo de distribuição em razão do limite superior aplicado correspondente a cota da superfície da rocha sã.

Estabilidade Estatística da Resposta do Modelo

A estabilidade estatística do conjunto amostral dos resultados significa observar uma convergência para os valores dos momentos da amostra o que em outras palavras, significa o acréscimo de uma nova iteração não altera o comportamento amostral dos resultados de maneira considerável e, portanto, não alterara a análise. Para verificar a estabilidade estatística da amostra resultante do MMC, observou-se a variação percentual dos dois primeiros momentos estatísticos do conjunto de observações da resposta do sistema, considerado como as vazões de pico dos hidrogramas. Foram observados a variação nos valores da média e variância, assumindo o atingimento da estabilidade a partir de variações inferiores a mais ou menos 1%. A Figura H.3 apresenta graficamente a análise de convergência estatística da modelagem.

Figura H.3 – Variação percentual dos momentos amostrais do conjunto de observações da vazão de pico do hidrograma defluente da ruptura a cada iteração



A estabilidade do valor da média é observada logo nas primeiras centenas de iterações, sendo observada essa estabilidade antes das 1.000 repetições. Para a variância foram necessárias mais de 3.000 iterações para verificar a estabilidade. Assim, conclui-se que o número de repetições realizadas foi mais do que suficiente

para observar a estabilidade estatística da amostra, necessária para a validação dos resultados do MMC. Assim, indica-se que para um estudo de ruptura hipotética um número de 5.000 repetições pode ser suficiente para o alcance da estabilidade estatística. Reduzir o número de repetições também reduz consideravelmente o tempo necessário para o desenvolvimento da análise probabilística. Ressalta-se que esse aspecto depende do número de variáveis consideradas como aleatórias, que nesse caso foram cinco. Análises com um número maior de variáveis, que incluam, por exemplo, método de progressão, coeficiente de descarga, nível de água no reservatório, hidrograma afluente, entre outros, pode demandar um número bem maior de simulações.