



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GIORGIA CLETO MOECKE

ANÁLISE DA CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO
DE 15 BARRAGENS BRASILEIRAS COM BASE NOS RESULTADOS DE 90
CENÁRIOS DE RUPTURA

FORTALEZA

2019

GIORGIA CLETO MOECKE

ANÁLISE DA CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO DE 15
BARRAGENS BRASILEIRAS COM BASE NOS RESULTADOS DE 90 CENÁRIOS DE
RUPTURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M71a Moecke, Giorgia.
Análise da classificação quanto ao dano potencial associado de 15 barragens brasileiras com base nos resultados de 90 cenários de ruptura / Giorgia Moecke. – 2019.
112 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho.

1. DAM-BREAK. 2. Dano Potencial Associado (DPA). 3. Plano de Ações Emergenciais (PAE). 4. Plano de Segurança de Barragens (PSB). I. Título.

CDD 624.15

GIORGIA CLETO MOECKE

ANÁLISE DA CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO DE 15
BARRAGENS BRASILEIRAS COM BASE NOS RESULTADOS DE 90 CENÁRIOS DE
RUPTURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos). Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 29/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcos Aurélio Marques Noronha
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho, pela orientação e por embarcar nas minhas mudanças de tema repentinas.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Francisco de Assis e Prof. Dr. Marcos Noronha, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e ajuda ao longo de todos esses anos. Não haveria essa conquista sem vocês.

À minha Oma, dona Ruth Carmen Moecke, que nos deixou em maio desse ano, por todos os ensinamentos e por compartilhar comigo o seu último dia bom. *Ich vermisse dich.*

Ao meu noivo lindo, João Rafael Gomes Vaz, por ser meu maior incentivador, torcedor nº 1 e por não me deixar desistir.

Aos meus colegas da Fractal Engenharia, Juliana D'Moreira e Pedro de Lara, por todo o auxílio e suporte para a elaboração deste estudo.

Por fim, aos amigos que o mestrado me proporcionou, por fazerem desta experiência em Fortaleza única e divertida, mesmo nos momentos mais difíceis. Vocês são todos show.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Words are, in my not so humble opinion, our most inexhaustible source of magic, capable of both inflicting injury and remedying it.”

J.K Rowling.

RESUMO

O rompimento de barragens expõe o vale de jusante a um risco significativo de perdas de vidas e bens materiais. Nesse contexto, a Lei 12.334/10 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e regulamenta o Plano de Segurança de Barragens (PSB). Como sistema auxiliar à Lei, foi criada a matriz de classificação quanto à Categoria de Risco (CR) e o Dano Potencial Associado (DPA), que direciona o PSB de acordo com a classe da barragem. De acordo com o estabelecido na legislação em vigência, o DPA é classificado como alto sempre que houver pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, condicionando o empreendedor a apresentar, junto ao órgão fiscalizador, um Plano de Ação de Emergência (PAE). Apesar dos critérios estabelecidos pela legislação, a análise do DPA é subjetiva, uma vez que depende dos estudos de ruptura hipotética no momento da classificação, e que estes só devem ser elaborados para barragens com alto DPA. Desta forma, as agências fiscalizadoras podem solicitar o PAE a barragens que apresentam, na verdade, baixo dano potencial associado. Neste contexto, foi elaborado um estudo com base nos resultados de rupturas hipotéticas de 15 barragens brasileiras, a fim de discutir a classificação quanto ao dano potencial associado à pequenos e grandes empreendimentos. Foram analisados 06 cenários de ruptura para cada empreendimento, considerando a alteração das vazões de entrada nos modelos. Os resultados das rupturas foram comparados aos resultados das cheias naturais da bacia, totalizando 180 cenários simulados. Foram analisadas as variáveis de vazão de pico, volume liberado, altura incremental e área de inundação incremental para cada um dos cenários. As análises indicaram que, para pequenas barragens, os resultados são dependentes dos cenários avaliados e apresentam grande variabilidade dos parâmetros. Ainda, as inundações decorrentes de cheias naturais nestas bacias ocasionariam danos similares aos esperados pela ruptura destas barragens. Para grandes e médias barragens, este cenário não se verifica, uma vez que as rupturas apresentam grande alteração do regime fluvial, bem como inundação e altura incremental significativas nos eventos de ruptura. Nestes casos, os resultados não apresentam grande variabilidade, não havendo um cenário menos crítico de ruptura para os mesmos parâmetros de brecha. As análises indicaram que a classificação de dano potencial associado como “alto” só cabe a empreendimentos de médio e de grande porte, mesmo que a região a jusante das barragens classificadas como de pequeno porte seja habitada. Indicando que a exigência da elaboração de PAE para pequenos empreendimentos se mostra desproporcional, visto que a possível área atingida pela ruptura destas barragens seria equivalente à área atingida por uma cheia natural.

Palavras-chave: PAE, DPA, PSB, DAM-BREAK.

ABSTRACT

Dam failures expose the downstream valley to a significant risk of loss of human life and material goods. In this context, Law 12.334/2010 of September 20th establishes the National Dam Safety Policy (PNSB) and regulates the Dam Safety Plan (PSB). As an auxiliary tool to this Law, the Risk Category (CR) and Hazard Potential (DPA) classification matrix was created, which establishes guidelines for the PSB according to the dam classification. According to the legislation in force, DPA is classified as high whenever there are people permanently occupying the affected area downstream of the dam, making it mandatory for the entrepreneur to submit an Emergency Action Plan (PAE) to the enforcement body. Despite the criteria established by the legislation, the analysis of the DPA is subjective since it relies on hypothetical failure studies at the time of classification, and states that these should only be designed for dams with high DPA values. To that end, enforcement agencies may request PAE for dams that actually have low hazard potential. In this context, a study based on the hypothetical failure results of 15 Brazilian dams was developed to discuss the hazard potential classification of small and large reservoirs. Six failure scenarios were analyzed for each dam, taking into consideration the change in the inflows of the models. The results of the modeled failures were compared to the reservoir basin natural flood results, bringing a total of 180 simulated scenarios. The variables peak flow, reservoir released water volume, incremental height and incremental flooding area for each scenario were analyzed. The analyses indicated that for small dams the results are dependent on the evaluated scenarios and present great variability of the parameters. Also, flooding caused by natural floods in these basins resulted in damage similar to those expected by the failure of these dams. For large and medium dams this scenario was not verified, since the failures presented great alteration over the river regime, as well as significant flood routing and incremental height during failures events. In these cases, the results did not present great variability, and a less critical failure scenario could not be identified for the same breach parameters. The analyses indicated that the classification of hazard potential as “high” is only fit to medium and large dams, while it is excessive for small dams even if the downstream region is classified as inhabited. This indicates that the requirement for the elaboration of PAE for small dams is excessive since the area possibly affected by the failure of these dams would be equivalent to that resulted from the natural flood.

Keywords: Emergency Action Plan. Hazard Potential, Dam Safety Plan, DAM-BREAK.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma de aplicação da classificação estabelecida pela Resolução 143/CNRH.....	24
Figura 2	Classificação quanto ao porte das barragens, segundo ICOLD, 2011.....	34
Figura 3	Módulo de formação da brecha de ruptura no modelo HEC-RAS.....	48
Figura 4	Módulo de visualização de manchas de inundação no modelo HEC-RAS.....	48
Figura 5	Representação da geometria no modelo HEC-RAS	51
Figura 6	Representação dos parâmetros de forma da brecha de ruptura.....	54
Figura 7	Exemplificação dos tempos de referência da onda de inundação.....	61
Figura 8	Mapa de classificação de relevo, de acordo com o proposto pelo CPRM.....	65
Figura 9	Mapa de classificação de relevo, de acordo com o proposto pelo CPRM.....	65
Figura 10	Hidrogramas de cheia da barragem B01.....	67
Figura 11	Ilustração do modelo digital de terreno (MDT) utilizado para a elaboração dos estudos.....	68
Figura 12	Perfil longitudinal do modelo conceitual utilizado nas análises da B01.....	69
Figura 13	Modelo conceitual HEC-RAS das barragens B01 e B02.....	69
Figura 14	Hidrogramas de ruptura para as barragens: B01, B02, B03 e B04.....	71
Figura 15	Hidrogramas de ruptura para as barragens B05 a B12.....	72
Figura 16	Hidrogramas de ruptura para as barragens B13, B14 e B15.....	73
Figura 17	Variabilidade dos resultados de vazão de pico na seção do barramento para os 90 cenários avaliados.....	76
Figura 18	Variabilidade dos resultados de vazão de pico na seção de delimitação da ZAS para os 90 cenários avaliados.....	76
Figura 19	Resultados de altura incremental para as seções da barragem e de delimitação da ZAS para as barragens: B01 a B08.....	78
Figura 20	Resultados de altura incremental para as seções da barragem e de delimitação da ZAS para as barragens: B09 a B15.....	79
Figura 21	Variabilidade dos resultados de altura incremental na seção de delimitação da ZAS para os 90 cenários avaliados.....	80
Figura 22	Comportamento padrão do volume efluente em função dos cenários avaliados.....	82
Figura 23	Variabilidade dos resultados de volume efluente na seção do barramento para os 90 cenários avaliados.....	82

Figura 24	Comparação dos hidrogramas para os cenários naturais (C0) e de ruptura (R0) para as barragens de pequeno porte B11 e de grande porte B12.....	83
Figura 25	Comparação das áreas de inundação incrementais para as barragens B01 a B05.....	84
Figura 26	Comparação das áreas de inundação incrementais para as barragens B06 a B15.....	85
Figura 27	Área de inundação incremental para o cenário R01 para barragem classificada como de pequeno porte.....	86
Figura 28	Área de inundação incremental para o cenário R01 para barragem classificada como de grande porte.....	86
Figura 29	Área de inundação para os cenários C06, R01, R02 e R06 para barragem classificada como de pequeno porte.....	88
Figura 30	Correlação entre a relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ e a vazão máxima na seção da barragem...	90
Figura 31	Correlação entre a relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ e a vazão máxima na seção de 10 km.....	90
Figura 32	Correlação entre a relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ e o volume efluente máximo.....	91
Figura 33	Correlação entre a altura do barramento e a altura incremental máxima na seção de delimitação da ZAS (10km).....	91
Figura 34	Correlação entre a altura da barragem H e a área incremental máxima inundada.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Características Técnicas – Resolução nº 143 CNRH.....	25
Quadro 2	Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Estado de Conservação – Resolução nº 143 CNRH.....	26
Quadro 3	Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Plano de Segurança de Barragens – Resolução nº 143 CNRH.....	27
Quadro 4	Matriz de classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) – Resolução nº 143 CNRH.....	28
Quadro 5	Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, Resolução CNRH nº 143.....	29
Quadro 6	Matriz de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial associado – Resolução nº 236 – ANA.....	29
Quadro 7	Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, Resolução ANEEL nº 696.....	30
Quadro 8	Matriz de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial associado - Resolução nº 696 – ANEEL.....	31
Quadro 9	Classificação quanto ao dano potencial associado, segundo a FEMA (2004).....	31
Quadro 10	Classificação de Dano Potencial Associado segundo USACE, 1997.....	33
Quadro 11	Classificação quanto ao tamanho do reservatório segundo USACE, 1979.	33
Quadro 12	Classificação quanto ao Dano Potencial Associado segundo ICOLD, 2011.....	34
Quadro 13	Regulamentação de segurança em alguns países europeus.....	35
Quadro 14	Classificação de barragens segundo a legislação finlandesa.....	36
Quadro 15	Critérios para avaliação de perigo para a vida, a propriedade e o meio ambiente, segundo a legislação norueguesa.....	37
Quadro 16	Classificação de barragens segundo a legislação portuguesa.....	38
Quadro 17	Classificação de barragens segundo a legislação espanhola.....	39
Quadro 18	Classificação de barragens segundo a legislação sueca.....	40
Quadro 19	Classificação quanto ao porte da barragem segundo a legislação da África do Sul.....	40

Quadro 20	Classificação quanto ao potencial de risco da barragem segundo a legislação da África do Sul.....	41
Quadro 21	Matriz de classificação da barragem segundo a legislação da África do Sul.....	41
Quadro 22	Classificação de barragens segundo a legislação da província de Quebec – Canadá.....	42
Quadro 23	Critérios para cálculo da vulnerabilidade de barragens segundo a legislação da província de Quebec – Canadá.....	43
Quadro 24	Critérios para a classificação da categoria de consequência da barragem, segundo a legislação da província de Quebec – Canadá.....	43
Quadro 25	Sistemas de classificação de barragens de acordo com as especificações legais de diversos países e agências reguladoras.....	45
Quadro 26	Emprego do modelo número HEC-RAS para estudos de DAM-BREAK..	49
Quadro 27	Faixas e possíveis valores para caracterização da brecha.....	53
Quadro 28	Estudos de caso para desenvolvimento dos modelos de regressão para cálculo de parâmetros da brecha.....	54
Quadro 29	Equações de regressão para a obtenção dos parâmetros de formação de brechas.....	55
Quadro 30	Cenários analisados nos estudos de Dam-Break.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Coeficientes Cb.....	56
Tabela 2	Coeficientes de descarga.....	57
Tabela 3	Características das barragens e dos trechos analisados.....	62
Tabela 4	Classificação quanto ao porte dos empreendimentos analisados.....	63
Tabela 5	Classificação do relevo da região de jusante – CPRM.....	66
Tabela 6	Vazões de cheia e volume dos hidrogramas das 15 barragens analisadas...	66
Tabela 7	Métodos de calibração e características técnicas dos modelos conceituais das 15 barragens analisadas.....	68
Tabela 8	Mecanismo de ruptura e parâmetros de abertura de brecha utilizados nos estudos.....	70
Tabela 9	Resultados de vazão de pico para a seção da barragem.....	74
Tabela 10	Resultados de vazão de pico para a seção de delimitação da ZAS (10 km)	75
Tabela 11	Resultados de altura incremental para a seção da barragem.....	77
Tabela 12	Resultados de altura incremental para a seção de delimitação da ZAS (10 km).....	77
Tabela 13	Resultados de altura incremental para a seção da barragem.....	81
Tabela 14	Resultados de área de inundação incremental para a região da ZAS.....	83
Tabela 15	Resultados de área de inundação incremental em relação à cheia de projeto da barragem para a região da ZAS.....	87
Tabela 16	Classificação quanto ao porte dos empreendimentos analisados.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
APMR	Análises de Potenciais Modos de Ruptura
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CCV	Concreto Convencional
CDA	Canadian Dam Association (Canadá)
CIGB	Comitê Internacional de Grandes Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CRI	Categoria de Risco
CT	Características Técnicas
DPA	Dano Potencial Associado
DSA	Dam Safety Act (Canadá)
DSO	Dam Safety Office (África do Sul)
DSR	Dam Safety Regulations (África do Sul e Canadá)
EC	Estado de Conservação
FEMA	Federal Emergency Management
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FLDWAV	Flood Wave Dynamic Model
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center River Analysis System – Software de Análise Hidráulica Fluvial
ICODS	Interagency Committee on Dam Safety
ICOLD	International Commission on Large Dams
IDF	Inflow Design Flood
LPI	Local Partial Inertia
MDT	Modelo Digital de Terreno
N.A	Nível de Água
NRCS	Natural Resources Conservation Service (USDA)
NWS	Flood Wave Dynamic Model

PAE	Plano de Ações Emergenciais
PFMA	Potential Failure Mode Analysis
PLACON	Plano de Contingência
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens (Portugal)
Sunny Day	Condições Normais de Operação
TR	Período de Retorno (Recorrência em anos)
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
ZAS	Zonas de Auto Salvamento

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Vazão	m ³ /s
h	Altura da Coluna D'água	m
x	Distância ao Longo do Rio	m
t	Tempo	s
A	Área da Seção	m ²
L	Largura da Superfície	m
K	Capacidade de Transporte	m ³ /s
g	Aceleração da Gravidade	m/s ²
q	Escoamento Lateral	m ³ /s/m
β	Fator de Distribuição de Fluxo	-
V	Velocidade	m/s
n	Coefficiente de Rugosidade de Manning	-
S	Declividade	m/m
R _h	Raio Hidráulico	m
φ	Fator de LPI	-
F _T	Número de Froude	-
F _R	Número de Froude	-
m	Expoente da Equação de LPI	-
Δx	Distância entre Seções	m
c	Velocidade da Onda	m/s
T _R	Tempo de Ascensão da Onda	s
D	Profundidade Média	m
S ₀	Declividade Média	m/m
B _M	Largura Média da Brecha	m
H _W	Altura d'água Acima da Geratriz inferior da Brecha	m
T _F	Tempo de Formação da Brecha	h
K ₀	Constante da equação (1,4 para galgamento e 1,0 para piping)	-
V _W	Volume do Reservatório	m ³
H _B	Altura da Brecha	m
C _b	Coefficiente em Função do Volume Acumulado	-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivo Geral.....	20
1.2	Objetivos Específicos.....	20
2	CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS.....	21
2.1	Classificação de Barragens no Brasil.....	21
2.1.1	<i>Classificação de Barragens no Brasil – ANEEL.....</i>	<i>29</i>
2.2	Classificação de Barragens no Mundo.....	30
2.2.1	<i>Estados Unidos.....</i>	<i>30</i>
2.2.2	<i>Comitê Internacional de Grandes Barragens – ICOLD.....</i>	<i>32</i>
2.2.3	<i>Europa.....</i>	<i>34</i>
2.2.4	<i>África do Sul.....</i>	<i>39</i>
2.2.5	<i>Canadá.....</i>	<i>40</i>
2.3	Síntese dos Sistemas de Classificação de Barragens Apresentados.....	44
3	DAM BREAK: HISTÓRICO E METODOLOGIA UTILIZADA.....	45
3.1	Propagação da Onda de Cheia – HEC-RAS 5.0.6.....	46
3.2	Parâmetros de Formação da Brecha de Ruptura.....	51
3.2.1	<i>Equações de Regressão.....</i>	<i>53</i>
3.2.2	<i>Coefficientes de Descarga da Brecha.....</i>	<i>56</i>
3.3	Critérios de Simulação.....	56
3.4	Variáveis Hidráulicas – Saída do Modelo.....	58
4	BARRAGENS ANALISADAS.....	61
4.1	Características Técnicas.....	61
4.1.1	<i>Classificação quanto ao Porte da Barragem.....</i>	<i>62</i>
4.1.2	<i>Relevo do Vale de Jusante.....</i>	<i>63</i>
4.1.3	<i>Hidrogramas de Cheias Naturais.....</i>	<i>65</i>
4.2	Modelos Conceituais.....	66
4.3	Parâmetros de Ruptura.....	68
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	70
5.1	Hidrogramas de Saída.....	70
5.2	Vazão de Pico.....	73
5.3	Altura Incremental.....	75
5.4	Volume Efluente.....	80

5.5	Área Inundada.....	82
5.5.1	<i>Comparação com Cheia Natural de Referência.....</i>	86
5.6	Discussões e Correlações.....	87
5.6.1	<i>Correlações.....</i>	88
6	ANÁLISES EM RELAÇÃO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO....	92
6.1	DPA – Barragens Analisadas.....	94
7	CONCLUSÃO.....	95
7.1	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	96
	REFERÊNCIAS.....	97
	ANEXO A – HIDROGRAMAS DE CHEIA.....	101
	APÊNDICE A – MODELOS CONCEITUAIS.....	106
	APÊNDICE B – VAZÃO DE PICO PARA OS 90 CENÁRIOS	
	ANALISADOS.....	110

1. INTRODUÇÃO

Diante das rupturas das barragens da Indústria de Papel Cataguases em 2003 e de Camará em 2004, foi instituída, pelo Governo Federal Brasileiro, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) por intermédio da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. A PNSB estabelece padrões mínimos de segurança de barragens, objetivando a redução de acidentes e suas consequências, visando à proteção da população e do meio ambiente.

Como sistema auxiliar à Lei de Segurança de Barragens, foi criada a matriz de classificação por categoria de risco e por dano potencial associado. O sistema brasileiro classifica as barragens em função de suas características técnicas (CT), estado de conservação (EC), plano de segurança (PS) e dano potencial associado (DPA).

De acordo com o estabelecido pela legislação em vigor no Brasil, o dano potencial associado (DPA) é classificado como alto SEMPRE que houver pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, independente das características do reservatório ou dos impactos ambientais e socioeconômicos gerados. A classificação do DPA como alto condiciona o empreendedor a apresentar junto ao órgão fiscalizador da barragem, além do Plano de Segurança de Barragem (PSB), um Plano de Ações Emergenciais (PAE).

O PAE deve conter a descrição das ações que devem ser tomadas pelo proprietário e/ou operador da barragem em situações de emergência. Para tanto, uma série de estudos deve ser realizada, tais como: resposta durante períodos de intempéries, fontes de energia de emergência e mapas de inundação do vale de jusante (Ministério da Integração Nacional, 2002).

Apesar da legislação brasileira estabelecer os critérios para a classificação do DPA, esta análise ainda é subjetiva, uma vez que depende dos estudos de ruptura hipotética no momento da classificação, e que estes só devem ser elaborados para barragens com alto DPA. Desta forma, as agências fiscalizadoras podem solicitar o PAE a barragens que apresentam, na verdade, baixo dano potencial associado. É o que vem ocorrendo no Brasil desde as trágicas rupturas das barragens de rejeito de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019. Atualmente, os órgãos competentes têm exigido o PAE de barragens enquadradas como baixo DPA, como medida de proteção à população de jusante. Essa exigência demonstra a preocupação das agências fiscalizadoras com a segurança dos possíveis afetados pela ruptura, mas não se mostra pertinente em todos os casos, principalmente se tratando de pequenas barragens.

Neste contexto, foi elaborado um estudo com base nos resultados de rupturas hipotéticas de barragens, a fim de discutir a classificação quanto ao dano potencial associado à pequenos e grandes empreendimentos.

As análises apresentadas nesta dissertação foram embasadas nos resultados de estudos de ruptura hipotética de 15 barragens de geração de energia elétrica. As barragens foram escolhidas devido à disponibilidade de dados e de modelos conceituais por parte da autora desta dissertação.

Foram analisados 06 cenários de ruptura hipotética para cada empreendimento, considerando a alteração das vazões de entrada nos modelos. Os resultados das rupturas foram comparados aos resultados das cheias naturais da bacia, totalizando 180 cenários simulados (90 cenários de ruptura e 90 cenários de cheia natural). Os resultados foram analisados em termos de hidrogramas efluentes, vazão de pico, volume liberado, altura incremental e área de inundação incremental.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados das rupturas hipotéticas de 15 barragens brasileiras sob a ótica de 90 cenários de ruptura distintos. Os resultados serão avaliados em função dos danos potenciais associados aos barramentos.

1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos desta dissertação:

- Obter para 90 cenários de ruptura hipotética os resultados em termos de vazão de pico, altura incremental, volume efluente e área de inundação incremental;
- Analisar a variabilidade dos resultados em relação aos cenários avaliados;
- Analisar as correlações entre as características técnicas das barragens e os resultados obtidos; e
- Avaliar o dano potencial associado das barragens com base nos resultados até a seção de delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS).

2. CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS

A classificação de barragens de acordo com suas características técnicas e com o dano potencial associado à sua ruptura é usada por diferentes entidades para fins de aplicações legais e regulamentares. FEMA (2004) corrobora com esta afirmação, alegando que a classificação de barragens de acordo com as possíveis consequências da ruptura nas áreas localizadas a jusante é uma prática comum entre agências regulamentadoras.

Segundo Baima (2015), as classificações de barragens baseadas no risco são as mais apropriadas para o controle de segurança e medidas de proteção civil, uma vez que possibilitam graduar o nível de exigência destas ações. O objetivo principal desta graduação consiste em evitar medidas de segurança injustificáveis para barragens que apresentem baixo risco, ao mesmo tempo em que busca garantir níveis de segurança aceitáveis para o vale a jusante.

Os itens a seguir apresentam os sistemas de classificação de barragens adotados por diversos países e agências reguladoras, incluindo o Brasil e a agência responsável pela fiscalização de barragens de geração de energia elétrica (ANEEL). A consulta a esses sistemas permitiu constatar que todos os países que apresentam classificação quanto ao dano potencial associado, classificam como alto o dano de barragens localizadas a montante de regiões habitadas.

2.1 Classificação de Barragens no Brasil

As rupturas da Barragem de Rejeitos da Indústria de Papel Cataguases, em 2003, e da Barragem de Camará, em 2004, levantaram um olhar crítico sobre as questões relativas à segurança de barragens no território brasileiro (Lauriano et al, 2008). Neste contexto, no dia 20 de setembro de 2010 foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Lei Federal nº 12.334/2010. Esta lei tem como objetivo garantir a observância de padrões mínimos de segurança de barragens, de forma a possibilitar a redução de acidentes e suas consequências, visando à proteção da população e do meio ambiente.

A Lei nº 12.334/2010 aplica-se às barragens destinadas à acumulação d'água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem, pelo menos, uma das seguintes características:

- (i) Altura do maciço maior ou igual a 15 m;
- (ii) Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 hm³;
- (iii) Reservatório que contenha resíduos perigosos; e
- (iv) Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perdas de vidas humanas – classificadas pelo órgão fiscalizador, segundo critérios estabelecidos pela Resolução CNRH nº143/2012.

Dentre os instrumentos citados pela referida legislação, destacam-se o sistema de classificação de barragens por categoria e risco e dano potencial associado, o Plano de Segurança de Barragens (PSB) e o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) (Brasil, 2010).

A Lei 12.334/2010 atribui às entidades fiscalizadoras a responsabilidade de classificar as barragens sob sua jurisdição. Os critérios gerais do sistema de classificação de barragens foram estabelecidos pelo CNRH, por meio da sua Resolução nº 143/2012.

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens (RSA), publicado pela ANA em 2016, a classificação de barragens é uma atividade que está concentrada na fase inicial de implementação do PNSB, uma vez que as entidades fiscalizadoras devem conhecer o estado atual das barragens sob sua jurisdição. ANA (2016) dispõe, ainda, que a classificação atribuída à barragem pode sofrer alteração ao longo dos anos. Modificações ligadas à categoria de risco, face ao estado de conservação da barragem, ou modificações da categoria de dano potencial associado, decorrentes de alterações da ocupação a jusante da barragem, podem alterar a classe do empreendimento.

A Resolução CNRH nº 143/2012 estabelece a necessidade, por parte das entidades fiscalizadoras, de se reavaliar, no máximo, a cada 5 anos ou se assim considerar necessária, as classificações quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado dos empreendimentos sob sua fiscalização. A resolução estabelece, ainda, que cada fiscalizador poderá adotar critérios complementares para a classificação, como ocorre com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, e com a Agência Nacional de Mineração - ANM, que apresentam critérios próprios para classificação de barragens.

Segundo a Resolução nº 143/2012 do CNRH, a classificação de barragens é realizada de acordo com duas vertentes: categoria de risco e dano potencial associado. A categoria de risco é classificada com base nas características técnicas do empreendimento (CT), como: altura, comprimento, tipo de barragem quanto ao material de construção, tipo de fundação, idade da barragem e vazão de projeto. A classificação também leva em conta o estado de conservação da barragem (EC) e o plano de segurança do empreendimento (PS). A classificação pelo dano potencial associado (DPA) considera como critérios: perdas de vidas humanas, tamanho de reservatório e impactos sociais e econômicos decorrentes da ruptura da barragem. Os Quadro 1, Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4 apresentam o sistema de classificação proposto pelo CNRH.

O método utiliza, no total, 21 critérios, cujos valores são somados para a definição da classe de risco e de dano potencial associado, conforme as equações a seguir:

$$\text{Classe de risco} = \sum CT + \sum EC + \sum PS \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Classe de dano} = \sum DPA \quad \text{Equação 2}$$

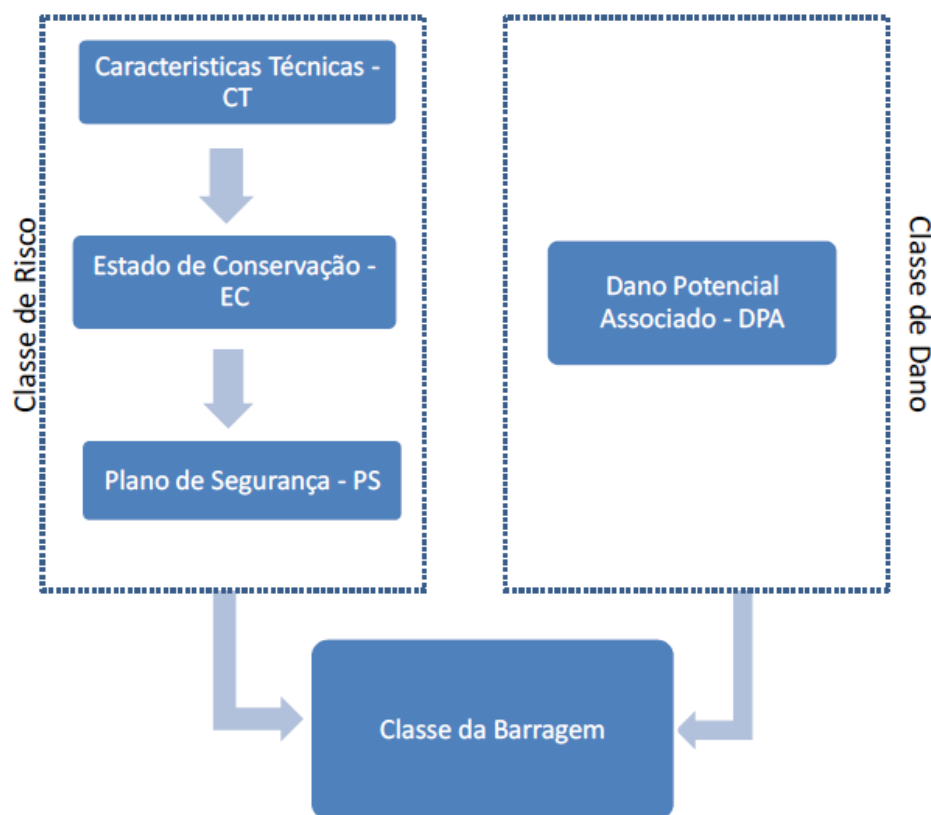


Figura 1. Fluxograma de aplicação da classificação estabelecida pela Resolução 143/CNRH.
Fonte: BAIMA, 2015.

Quadro 1. Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Características Técnicas – Resolução nº 143 CNRH.

1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS [CT]					
Altura [a]	Comprimento [b]	Tipo de Barragem [c]	Tipo de Fundação [d]	Idade da Barragem [e]	Vazão de Projeto [f]
≤ 15 m [0]	≤ 200 m [2]	Concreto Convencional - CCV [1]	Rocha sã [1]	entre 30 e 50 anos [1]	CMP ou TR 10.000 [3]
15m < H < 30m [1]	> 200 m [3]	Alvenaria de Pedra / Concreto Ciclópico / CCR [2]	Rocha alterada dura com tratamento [2]	entre 10 e 30 anos [2]	TR 1.000 [5]
30m ≤ H ≤ 60m [2]	-	Terra homogênea / Enrocamento / Terra e Enrocamento [3]	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento [3]	entre 5 e 10 anos [3]	TR 500 [8]
H > 60m [3]	-	-	Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto [4]	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação [4]	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável [10]
-	-	-	Solo residual / aluvião [5]	-	-

CT = Σ (a até f):

Quadro 2. Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Estado de Conservação – Resolução nº 143 CNRH.

2. ESTADO DE CONSERVAÇÃO [EC]					
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras [g]	Confiabilidade das Estruturas de Adução [h]	Percolação [i]	Deformação e Recalques [j]	Deterioração dos taludes / Parâmetros [k]	Eclusa [l]*
Estruturas civis e hidroeletrônicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos [0]	Estruturas civis e dispositivos hidroeletrônicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento [0]	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem [0]	Inexistente [0]	Inexistente [0]	Não possui eclusa [0]
Estruturas civis e hidroeletrônicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente. [4]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação [4]	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas [3]	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo [1]	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. [1]	Estruturas civis e hidroeletrônicas bem mantidas e funcionando [1]
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente. [7]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas [6]	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico [5]	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento [5]	Erosões superficiais, ferrugem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva [5]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação [2]
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas [10]	-	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente [8]	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança [8]	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança [7]	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e sem medidas corretivas [4]

EC = Σ (g até l):

Quadro 3. Matriz de classificação da Categoria de Risco (CRI) – Plano de Segurança de Barragens – Resolução nº 143 CNRH.

3. PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGENS [PS]				
Existência de documentação de projeto [n]	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem [o]	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento [p]	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem [q]	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação [r]
Projeto executivo e <i>as built</i> [0]	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem [0]	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento [0]	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre [0]	Emite regularmente os relatórios [0]
Projeto executivo OU <i>as built</i> [2]	Possui técnico responsável pela segurança da barragem [4]	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção [3]	Não [6]	Emite os relatórios sem periodicidade [3]
Projeto básico [4]	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem [8]	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento [5]	-	Não emite os relatórios [5]
Anteprojeto ou projeto conceitual [6]	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento [6]	-	-
Documentação inexistente [8]	-	-	-	-

PS = Σ (n até r):

Quadro 4. Matriz de classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) – Resolução nº 143 CNRH.

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

DPA = Σ (a até d):

A partir dos valores resultantes dos somatórios, classifica-se a barragem quanto à sua categoria de risco e dano potencial associado, de acordo com o Quadro 5.

Quadro 5. Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, Resolução CNRH n° 143.

	CRI	DPA
ALTO	≥60 ou EC*≥8	≥ 16
MÉDIO	35 a 60	10 a 16
BAIXO	≤ 35	≤ 10

* Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.

De acordo com o estabelecido pela legislação em vigor no Brasil, o Dano Potencial Associado (DPA) em barragens é classificado como alto SEMPRE que houver pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, independente das características do reservatório ou dos impactos ambientais e socioeconômicos gerados.

A Resolução n°91 de 02 de abril de 2012 da Agência Nacional de Águas (ANA) apresenta o Plano de Segurança de Barragens como um dos instrumentos da PNSB e regulamenta sua implementação. A resolução apresentou, inicialmente, a Matriz de Classificação da Barragem, que direcionava o PSB de acordo com o risco associado a cada empreendimento. A matriz proposta em 2012 foi atualizada na Resolução n° 236, de 30 de janeiro de 2017, diminuindo o número de classes de risco de 5 (A, B, C, D e F) para 4 (A, B, C e D). O Quadro 6 apresenta a Matriz de Categoria de Risco e o Dano Potencial Associado, presente no Anexo I da Resolução n°236 da ANA, que classifica a barragem em 4 classes e direciona o plano de segurança para cada uma delas.

Quadro 6. Matriz de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial associado – Resolução n° 236 - ANA.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
-			
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	D	D

Fonte: ANA, 2017.

As resoluções n° 91 de 2012 e n°236 de 2017, da ANA, direcionam o PSB de acordo com a classe da barragem. Segundo o disposto nestas resoluções, barragens classificadas como risco “A” ou “B” devem apresentar, além dos documentos previstos pela Lei 12.334/2010, o Plano de Ações Emergenciais - PAE.

O PAE deve apresentar em seu conteúdo a descrição das ações que devem ser tomadas pelo proprietário e/ou operador da barragem em situações de emergência. Para tanto, uma série de estudos deve ser realizada, tais como: resposta durante períodos de intempéries, fontes de energia de emergência e mapas de inundação do vale de jusante (Ministério da Integração Nacional, 2002).

Dentre os estudos necessários para a elaboração de um PAE, destaca-se o de ruptura hipotética da barragem, com análises da inundação do vale de jusante. Os mapas de inundação presentes no PAE são de fundamental importância para a mitigação de perdas nas áreas de jusante, uma vez que as informações neles contidas devem auxiliar a evacuação rápida da população situada nas áreas de risco (Lauriano et al, 2008).

2.1.1 Classificação de Barragens no Brasil - ANEEL

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL é o órgão responsável pela fiscalização das barragens de geração de energia elétrica no território brasileiro. Nesta linha, a Resolução Normativa nº696 de 15 de dezembro de 2015, estabelece diretrizes para a classificação de barragens de geração, simplificando o proposto pelo CNRH e ANA.

De acordo com o proposto na resolução da ANEEL, a classificação de risco da barragem passa de MÉDIA para ALTA com somatório do CRI maior ou igual a 62, frente ao somatório de 60 do CNRH, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7. Matriz Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, Resolução ANEEL nº 696.

	CRI	DPA
ALTO	≥ 62 ou $EC^* \geq 8$	≥ 16
MÉDIO	35 a 62	10 a 16
BAIXO	≤ 35	≤ 10

* Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

A resolução da ANEEL simplificou, ainda, a matriz de classificação quanto à classe da barragem. De acordo com o proposto, o número de classes de barragens passou de 5 para 3, conforme indicado no Quadro 8, presente no Anexo I da resolução nº 696 da ANEEL.

Quadro 8. Matriz de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial associado. Resolução nº 696 - ANEEL

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
-			
ALTO	A	B	B
MÉDIO	B	C	C
BAIXO	B	C	C

Fonte: ANEEL, 2015.

Apesar de alterar a classificação de risco e o número de classes de barragens, a resolução nº696 da ANEEL permanece com o mesmo sistema de classificação quanto ao dano potencial associado apresentado pelo CNRH. Desta forma, qualquer barragem cuja região de jusante é habitada permanentemente apresenta DPA classificado como ALTO.

2.2 Classificação de Barragens no Mundo

2.2.1 Estados Unidos

O documento “*Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams*”, elaborado pelo *Interagency Committee on Dam Safety (ICODS)* e editado pela *Federal Emergency Management Agency (FEMA)* em 2004, é tido como referência para classificação de barragens nos EUA.

O sistema de proposto pelo órgão americano classifica a barragem em 3 classes de risco: baixo, significativo e alto. O método categoriza as barragens com base no potencial de perda de vidas humanas e nos impactos econômicos, ambientais e sociais. Segundo FEMA (2004), esse sistema foi proposto com o entendimento de que a falha de qualquer barragem, ou estrutura associada, representa um perigo para a vida e para as propriedades localizadas a jusante. O Quadro 9 apresenta o sistema de classificação proposto por FEMA, 2004.

Quadro 9. Classificação quanto ao dano potencial associado, segundo a FEMA (2004)

DANO POTENCIAL ASSOCIADO	PERDA DE VIDAS HUMADAS	PERDAS ECONOMICAS, AMBIENTAIS E SOCIAIS
BAIXO	Não Esperado	Baixa e/ou Limita a particulares
SIGNIFICATIVO	Não Esperado	Sim
ALTO	Provável ou Esperado	Sim

Fonte: FEMA, 2004.

Segundo FEMA (2004), não são esperadas perdas de vidas humanas em zonas inabitadas, ou que pessoas residem de forma temporária. Desta forma, o sistema não contempla a perda de vidas de usuários ocasionais de lazer do rio e de terras a jusante, transeuntes ou usuários externos. Entende-se que, em qualquer sistema de classificação nem todas as possibilidades podem ser definidas. O julgamento e o senso comum devem fazer parte de qualquer decisão sobre classificação.

A classificação do dano potencial associado, de acordo com a proposta americana, é baseada na consideração dos efeitos da ruptura ou da operação incorreta da barragem. A classificação atribuída deve ser baseada sempre no pior cenário de falha ou de mau funcionamento. Ou seja, a classificação deve se basear nas consequências da falha que resultariam na atribuição da classificação de maior potencial de risco, entre todas as falhas e cenários de operação incorreta provável.

Conforme o proposto, os cenários considerados devem ser razoáveis, justificáveis e consistentes com o documento de referência “*Federal Guidelines for Dam Safety: Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failure*”, elaborado pela FEMA em 2004. Um exemplo citado pela referência é o de se assumir a ruptura no cenário *Sunny Day* (condições normais de operação), o qual pode resultar em uma condição de escoamento confinado na calha do rio e em nenhuma perda provável de vida humana, indicando uma classificação de dano potencial baixo. No entanto, ao se presumir que a barragem falhou de maneira semelhante durante uma condição de inundação, o resultado teria uma provável perda de vidas humanas, resultando em uma classificação de dano potencial alto.

De acordo com FEMA (2004), na maioria das situações, a investigação do impacto da ruptura nas vidas humanas a jusante, nos danos à propriedade e nas preocupações ambientais já é o suficiente para determinar a classificação quanto ao dano potencial associado da barragem. No entanto, se a falha ou o mau funcionamento contribuir para a falha de uma barragem a jusante, a classe do empreendimento deve ser tão alta quanto a classe da barragem de jusante, e deve considerar as consequências incrementais adversas das falhas em cascata.

Outras agências federais americanas, como: FERC, USBR, NRCS e USACE, também adotam uma classificação baseada em três níveis. O Quadro 10 apresenta a classificação de dano potencial associado proposta por USACE, em 1997.

Quadro 10. Classificação de Dano Potencial Associado segundo USACE, 1997.

	CLASSIFICAÇÃO DE DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	BAIXO	SIGNIFICATIVO	ALTO
Perdas de vida diretas	Não esperado (área rural, sem estruturas ou habitações humanas)	Incerto (área rural com poucas residências permanentes, temporárias ou desenvolvimento industrial)	Certo (um ou mais agrupamentos residenciais, comerciais ou industriais)
Perdas devido a descontinuidade de serviços e atividades	Não há interrupção de serviços – reparos superficiais e rápidos	Interrupção de serviços essenciais e acessos	Interrupção de serviços críticos e acessos
Perda de propriedades	Terras particulares (agricultura). Equipamentos e construções isoladas.	Maiores perdas particulares e públicas	Extensivas perdas particulares e públicas
Perdas ambientais	Mínimas	Maiores, com necessidade de mitigação	Custo extensivo de mitigação ou impossíveis de mitigar

Fonte: USACE, 1997.

FEMA (2004) menciona que cerca de 80% dos estados americanos, em suas legislações, complementam a classificação de barragens pelas suas dimensões (*dam size classification system*) com a classificação por dano potencial (*hazard potential classification system*). Na maioria destes estados a classificação por perigo potencial é baseada em 3 níveis, conforme recomendação de FEMA (2004). A classificação por tamanho, proposta por USACE (1979), segue apresentada no Quadro 11.

Quadro 11. Classificação quanto ao tamanho do reservatório segundo USACE, 1979.

CATEGORIA DO PORTE DO EMPREENDIMENTO	CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM	
	ALTURA [m]	VOLUME DO RESERVATÓRIO [hm³]
PEQUENO	7 a 12	Menor do que 1,23
INTERMEDIÁRIO /MÉDIO	12 a 30	1,23 a 62
GRANDE	Maior do que 30	Maior do que 62

Fonte: USACE, 1979.

2.2.2 Comitê Internacional de Grandes Barragens - ICOLD

De acordo com o documento de referência “Small Dams – Design, Surveillance and Rehabilitation” desenvolvido pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens – ICOLD, a classificação de barragens quanto ao dano potencial associado pode ser realizada com base nos parâmetros de altura máxima da barragem (H) e volume máximo acumulado (V). Esses dois

parâmetros são combinados na equação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ para a obtenção da classe de risco da barragem (I, II ou III), conforme exposto no Quadro 12.

A relação apresentada não possui significado científico, sendo um fator determinístico aplicável para avaliar o risco potencial de danos e perda de vidas na área de inundação da barragem, em caso de rompimento.

Quadro 12. Classificação quanto ao Dano Potencial Associado segundo ICOLD, 2011.

COMPONENTE	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	BAIXO (I)	MÉDIO (II)	ALTO (III)
$H^2 \cdot \sqrt{V}$	< 20	$20 < H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$	≥ 200
Nº de Pessoas Afetadas	~ 0	< 10	≥ 10
Risco Econômico	Baixo	Moderado	Alto
Risco Ambiental	Baixo	Alto	Extremo
Risco Social	Baixo (área rural)	Regional	Nacional

Fonte: ICOLD, 2011.

ICOLD apresenta, ainda, a classificação quanto ao porte dos empreendimentos com base no mesmo parâmetro, conforme ilustrado na Figura 2. Para relações $H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$ e alturas máximas entre 2,5 m e 15 m, as barragens são consideradas de pequeno porte. Para relações maiores do que 200 ou alturas superiores à 15 m, a barragem é considerada de grande porte.

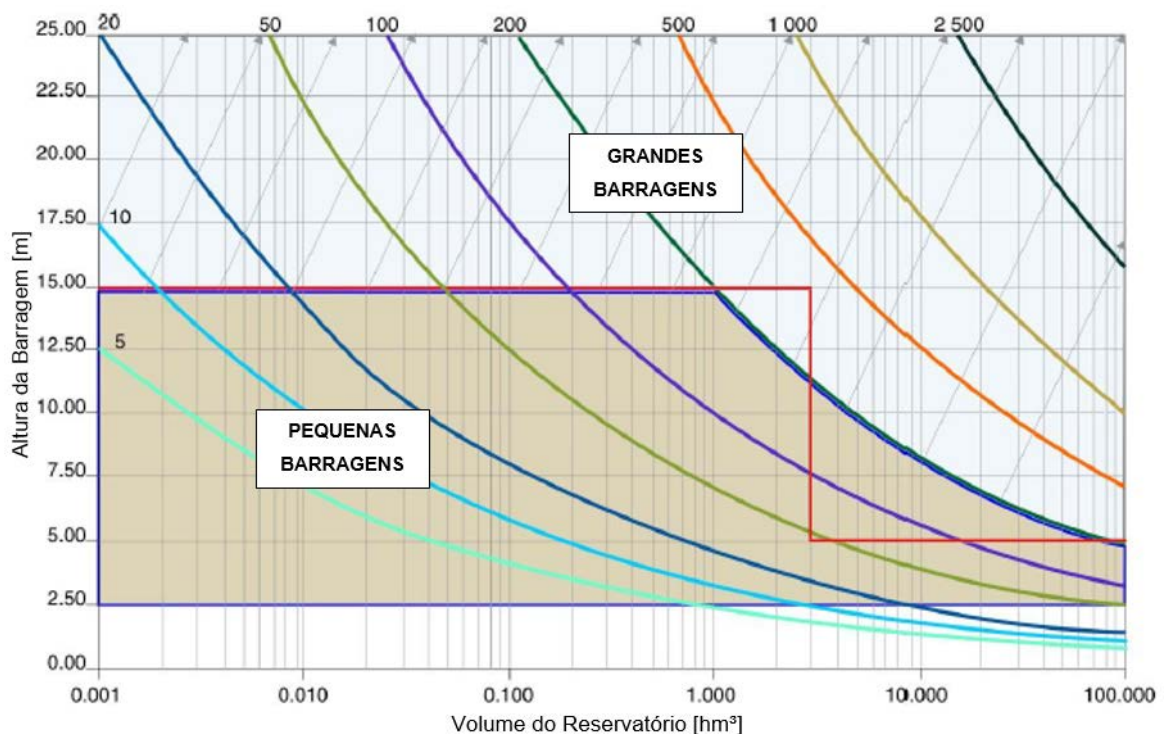


Figura 2. Classificação quanto ao porte das barragens, segundo ICOLD, 2011.

Fonte: Adaptado de ICOLD, 2011.

2.2.3 Europa

De acordo com o apresentado no documento do ICOLD - EuroClub (2013), há uma tendência de que alguns países europeus adotem 3 classes de perigo na classificação de barragens (alta, significativa e baixa). Embora também sejam adotados, com menor frequência, 2, 4 ou mais classes. Os critérios para a adoção das classes refletem, entre outras coisas, diferentes características, experiência e cultura de cada país (Baima, 2015).

O Quadro 13 apresenta uma síntese do sistema de classificação de barragens adotado nos países europeus, de acordo com duas vertentes: controle de segurança e medidas de proteção civil. A consulta à legislação internacional ratifica que os sistemas de classificação, baseados nas características técnicas das barragens, são preferencialmente utilizados para a definição da aplicabilidade da legislação, enquanto sistemas baseados em risco são considerados auxiliares, utilizados como base para a definição das medidas de proteção civil.

Quadro 13. Regulamentação de segurança em alguns países europeus.

PAÍS	REGULAMENTAÇÃO QUANTO AO CONTROLE DE SEGURANÇA	MEDIDAS DE PROTEÇÃO CIVIL	
		CLASSIFICAÇÃO DE PERIGO	ANÁLISE DAM-BREAK E PLANO DE EMERGÊNCIA
Austria	$H \geq 15 \text{ m}$ ou $V \geq 5 \text{ hm}^3$	-	Barragens “Muito Grandes” ou de risco “alto”
Finlândia	Todas	3 Classes	Barragens “Muito Grandes” ou de risco “alto”
França	$H \geq 20 \text{ m}$	-	$H \geq 20 \text{ m}$ ou $V \geq 15 \text{ hm}^3$
Alemanha	$H \geq 5 \text{ m}$ ou $V \geq 1 \text{ hm}^3$	-	Requerimentos e normas legais não prevêm a elaboração de planos
Itália	$H \geq 15 \text{ m}$ ou $V \geq 1 \text{ hm}^3$	-	Barragens sujeitas à legislação
Holanda	-	-	-
Noruega	Todas	5 Classes	Para as classes 2, 3 e 4
Portugal	$H \geq 15 \text{ m}$ ou $V \geq 1 \text{ hm}^3$	3 Classes	Barragens “Muito Grandes” ou de risco “alto”
Romênia	Legislação específica de acordo com as classes de dimensão	-	$H \geq 10 \text{ m}$ ou $V \geq 1 \text{ hm}^3$
Eslovênia	$H \geq 15 \text{ m}$ ou $H \geq 10 \text{ m}$ e $V \geq 1 \text{ hm}^3$	-	Barragens “Muito Grandes” ou de risco “alto”
Espanha	$H \geq 15 \text{ m}$ ou $10 \leq H \leq 15 \text{ m}$ e $V \geq 1 \text{ hm}^3$	3 Classes	Classes A e B

PAÍS	REGULAMENTAÇÃO QUANTO AO CONTROLE DE SEGURANÇA	MEDIDAS DE PROTEÇÃO CIVIL	
		CLASSIFICAÇÃO DE PERIGO	ANÁLISE DAM-BREAK E PLANO DE EMERGÊNCIA
Suécia	Todas	4 Classes	Barragens “Muito Grandes” ou de risco “alto”
Suíça	$H \geq 10$ m ou $H \geq 5$ m e $V \geq 0,5$ hm ³	-	$V \geq 2$ hm ³
Reino Unido	$V \geq 25.000$ hm ³	-	Barragens “Muito Grandes” ou de risco “alto”

Fonte: BAIMA, 2015.

Os itens a seguir apresentam, de forma sucinta, as principais características dos sistemas de classificação de perigo dos países europeus.

2.2.3.1 Finlândia

A legislação finlandesa sobre segurança de barragens abrange todas as barragens do país, independentemente de sua altura, porte ou finalidade. São incluídas, ainda, as barragens para usos temporários, como ensecadeiras.

O documento de referência “*Dam Safety Guide*” do “*Häme Centre for Economic Development, Transport and the Environment*”, equivalente ao ministério da agricultura brasileiro, explica e descreve em detalhes o conteúdo da Lei de Segurança de Barragens e o Decreto do governo sobre Segurança de Barragens da Finlândia.

As barragens finlandesas são classificadas de acordo com o dano potencial associado, entre as classes 1, 2 e 3, apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14. Classificação de barragens segundo a legislação finlandesa.

CLASSE	DESCRIÇÃO
CLASSE 1	Barragem, que no caso de acidente, causa perigo para a vida e a saúde humana ou perigo considerável para o meio ambiente ou propriedades.
CLASSE 2	Barragem, que em caso de acidente, pode causar perigo para a saúde, mas não perigo para a vida humanas.
CLASSE 3	Barragem, que em caso de acidente, pode provocar apenas perigo ao meio ambiente.

Fonte: ELY, 2012.

2.2.3.2 Noruega

Até a década de 1980, as diretrizes para planejamento, construção e operação de barragens na Noruega eram determinadas por normas técnicas e boas práticas de engenharia. Os primeiros regulamentos para a segurança de barragens são datados de 1981, com foco em requisitos técnicos para a construção de barragens. Nos anos 90, os requisitos para o controle interno, classificação e qualificações do proprietário da barragem foram introduzidos. Em 2001, o quadro legal para a segurança de barragens foi revisado e três novos regulamentos foram emitidos com base legal na Lei de Recursos Hídricos. Em janeiro de 2010, um novo regulamento sobre segurança de barragens, e demais estruturas hidráulicas, foi emitido com base na Lei de Recursos Hídricos (ICOLD, 2017).

O regulamento norueguês de segurança da barragem abrange todas as barragens e estruturas pertinentes, para todos os fins (abastecimento de água, hidrelétricas, etc.) e também túneis e condutos anexos às barragens de geração. As barragens são classificadas em 4 classes em conformidade com as consequências em caso de ruptura. De acordo com a classe imposta, é exigido que as barragens contenham requisitos mínimos de segurança.

O Quadro 15 apresenta os critérios para classificação de barragens de acordo com a legislação em vigor na Noruega.

Quadro 15. Critérios para avaliação de perigo para a vida, a propriedade e o meio ambiente, segundo a legislação norueguesa.

CLASSE	QUANTIDADE DE CASAS	INFRAESTRUTURAS	PROPRIEDADES / AMBIENTE
4	>150	-	-
3	21 – 150	Rodoviária / ferroviária com tráfego pesado, outras infraestruturas de elevada importância para a vida e saúde	Grandes danos a valores ambientais / propriedades muito importantes
2	1 – 20	Rodoviária / ferroviária com tráfego médio, outras infraestruturas de elevada importância para a vida e saúde	Grandes danos a valores ambientais / propriedades importantes
1	< 1	Rodoviária / ferroviária com tráfego baixo, outras infraestruturas de elevada importância para a vida e saúde	Grandes danos a valores ambientais / propriedades.

Fonte: ICOLD, 2017.

2.2.3.3 Portugal

O primeiro decreto regulamentando a segurança de barragens em Portugal foi promulgado em 1968, e tratava da segurança de pequenas barragens de terra. Em 1993, o Decreto-Lei nº 409/93, substituiu a legislação anterior, tratando de pequenas barragens de quaisquer materiais. As exigências legais de controle de segurança foram estendidas às barragens de maiores dimensões com a publicação do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), anexo ao Decreto-Lei nº 11/90, que foi atualizado através do decreto nº 344 em 15 de outubro de 2007. Esse regulamento define critérios para o controle de segurança e estipula medidas de proteção civil para a população localizada a jusante de uma barragem.

O RSB se aplica a todas as barragens de altura superior a 15 m e de altura inferior a 15 m, cujos reservatórios possuem capacidade superior a 100.000 m³.

O RSB define que as barragens devem agrupar-se em função dos danos potenciais a elas associados, sendo consideradas três classes de barragens definidas em função da ocupação humana, dos bens e do ambiente existentes (Quadro 16).

Quadro 16. Classificação de barragens segundo a legislação portuguesa.

CLASSE	OCUPAÇÃO HUMANA, BENS E AMBIENTE
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou Infraestruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens.

Fonte: PORTUGAL, 2007.

O RSB determina que barragens classe I apresentem o planejamento de emergência contendo, entre outros, o mapa de inundação com a delimitação de “Zonas de Autosalvamento” (ZAS). Estas zonas são definidas como região do vale, imediatamente a jusante da barragem, na qual se considera não haver tempo suficiente para uma adequada intervenção dos serviços e agentes de proteção civil em caso de acidente, sendo definida pela distância à barragem que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a meia hora, com o mínimo de 5 km.

2.2.3.4 Espanha

Na Espanha, a primeira legislação que trata de segurança de barragens data de 1994. A chamada Diretriz Básica para Proteção Contra Risco de Inundações, apresentou, inicialmente, a classificação de barragens de acordo com os possíveis danos a jusante em caso de ruptura ou falha de operação.

Desde então, foram decretadas as leis 11/2001, 11/2005 e 9/2008, que estabelecem as obrigações e responsabilidades dos proprietários, bem como as funções e tarefas das administrações competentes em matéria de controle de segurança de barragens. O sistema de segurança de barragens espanhol repousa sobre dois pilares: obrigações exigidas ao detentor da barragem e o controle de segurança como um conjunto de ações a serem executadas pela administração pública (Espanha, 2019).

Atualmente, a classificação de barragens na Espanha é feita com base nas Normas Técnicas de Segurança para Barragens e Seus Reservatórios, estabelecidas pelo Decreto Real de maio de 2019. O sistema espanhol apresenta 3 classes de barragens (A, B e C), descritas no Quadro 17.

Quadro 17. Classificação de barragens segundo a legislação espanhola.

CLASSE	DESCRIÇÃO
A	Ruptura pode afetar gravemente os núcleos urbanos (mais de 5 residências), serviços essenciais ou provocar danos materiais ou danos ao meio ambiente muito importantes.
B	Ruptura pode ocasionar danos materiais e ao meio ambiente importantes ou afetar um número reduzido de residências (1 a 5).
C	Ruptura pode ocasionar danos materiais de pouca importância e algumas perdas acidentais de vidas humanas.

Fonte: ESPANHA, 2019.

2.2.3.5 Suécia

A segurança de barragens na Suécia é tratada através de diversos estatutos relativos ao tema, e não por uma lei específica. Os regulamentos mais importantes são encontrados no Código Ambiental e na Lei de Proteção Civil (ICOLD, 2017).

Em 2014, requisitos legais de segurança de barragens foram introduzidos no Código Ambiental através de uma Portaria de Segurança de Barragem. A portaria inclui um sistema de classificação baseado nas consequências sociais da ruptura da barragem, conforme o apresentado no Quadro 18.

Quadro 18. Classificação de barragens segundo a legislação sueca.

CLASSE	DESCRIÇÃO
A	Graves consequências nacionais.
B	Severas consequências regionais e locais.
C	Severas consequências locais.

Fonte: ICOLD, 2017.

O Código Ambiental sueco se aplica a todas as barragens, independentemente do tamanho, finalidade e consequências em caso de ruptura. No entanto, para pequenas barragens (altura menor de 5 m e/ou reservatórios com capacidade inferior à 100.000 m³), a classificação é realizada pela autoridade supervisora, que deve decidir se a barragem deve ou não ter uma classe de segurança.

De acordo com a Lei de Proteção Civil, requisitos especiais são aplicados em empreendimentos classificados como A ou B, que devem apresentar planos de ações emergenciais.

2.2.4 África do Sul

O sistema de classificação utilizado pela África do Sul se assemelha muito ao sistema brasileiro, considerando características técnicas e relativas ao dano potencial associado para a imposição de uma classe à barragem.

De acordo com o *Dam Safety Office* (DSO) do *Department of Water Affairs and Forestry*, as *Dam Safety Regulations* (DSR) são aplicadas somente a barragens com altura máxima superior a 5 m e com volume armazenado acima de 50 mil m³.

A associação da classificação por porte, Quadro 19, e a da classificação por dano potencial, Quadro 20, resulta em três categorias de risco, como pode ser observado no Quadro 21.

Quadro 19. Classificação quanto ao porte da barragem segundo a legislação da África do Sul.

PORTE	ALTURA MÁXIMA DA BARRAGEM [H]
PEQUENO	$H < 12$ m
MÉDIO	$12 \text{ m} \leq H < 30$ m
GRANDE	$H \geq 30$ m

Fonte: REPÚBLICA DA ÁFRICA DO SUL, 2012.

Quadro 20. Classificação quanto ao potencial de risco da barragem segundo a legislação da África do Sul.

POTENCIAL DE RISCO	POTENCIAL DE PERDA DE VIDAS HUMADAS	POTENCIAL DE PERDAS ECONÔMICAS	POTENCIAL DE IMPACTOS AMBIENTAIS
BAIXO	Nenhuma	Mínimo	Baixo
SIGNIFICATIVO	Inferior a 10	Significativo	Significativo
ALTO	Superior a 10	Grande	Severo

Fonte: REPÚBLICA DA ÁFRICA DO SUL, 2012.

Quadro 21. Matriz de classificação da barragem segundo a legislação da África do Sul.

PORTE	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	BAIXO	SIGNIFICATIVO	ALTO
-			
PEQUENO	I	II	II
MÉDIO	II	II	III
GRANDE	III	III	III

Fonte: REPÚBLICA DA ÁFRICA DO SUL, 2012.

De acordo com a categoria da barragem (I, II e III), são determinados os requisitos a serem cumpridos em relação ao projeto, construção, comissionamento, manutenção, monitoramento, inspeções de segurança da barragem, avaliações de segurança da barragem e descomissionamento.

2.2.5 Canadá

Segundo a *Canadian Dam Association - CDA* (2019), a regulamentação para construção, operação, manutenção e descomissionamento de barragens no Canadá é de responsabilidade provincial/territorial, semelhante a outras áreas de jurisdição provincial (tais como: saúde e educação). Ao contrário de outros países, como: França, Portugal, África do Sul, etc., o Canadá não possui uma agência reguladora federal, ou um programa abrangente para orientar o desenvolvimento de requisitos para o gerenciamento seguro de barragens.

Neste contexto, merece destaque especial os aspectos da segurança de barragens da província de Quebec, regida pelo *Dam Safety Act (DSA)* e as *Dam Safety Regulations (DSR)*, de 2019. Segundo a legislação vigente na província citada, as barragens são divididas em dois grupos: alta capacidade e baixa capacidade.

São considerados barragens de alta capacidade:

- Barragens de 1 metro ou mais de altura, tendo uma capacidade maior do que 1.000.000 m³;

- Barragens de 2,50 metros ou mais de altura com uma capacidade superior a 30.000 m³;
- Barragens de 7,50 metros ou mais de altura, independentemente da capacidade; e
- Independentemente da sua altura, barragens associadas ou anexas a uma barragem já classificada por suas dimensões, como de alta capacidade.

São consideradas barragens com baixa capacidade:

- Barragens com 2 metros ou mais de altura e sem alta capacidade; e
- Independentemente da sua altura, as obras de retenção e as instalações anexas a uma barragem acima mencionada e as obras destinadas a reter toda ou parte da água armazenada por essa barragem.

De acordo com o DSR de Quebec, a classificação de barragens em relação ao risco que representam para pessoas e propriedades é baseada no produto da medida de sua vulnerabilidade (V) pelas consequências ocasionadas pela ruptura da barragem (C), à qual o valor "P" é atribuído na fórmula " $P = V \times C$ ".

Quadro 22. Classificação de barragens segundo a legislação da província de Quebec – Canadá.

VALOR DE "P"	CLASSE DA BARRAGEM
$P \geq 120$	A
$70 \leq P < 120$	B
$25 \leq P < 70$	C
$P < 25$	D

Fonte: QUEBEC, 2019.

O valor numérico da vulnerabilidade da barragem é medido multiplicando a média aritmética dos parâmetros físicos constantes (altura, tipo, capacidade e tipo de fundação) pela média aritmética dos parâmetros variáveis (idade, sismicidade, confiabilidade das estruturas de descarga e condições de conservação). Para cada parâmetro apresentado, constante e variável, são atribuídos pesos, que são utilizados nos cálculos. O método é similar ao proposto pelo CNRH (2012), diferindo no número de variáveis utilizadas (8 para o método canadense, frente aos 17 critérios para definição da classe de risco do método brasileiro). O Quadro 23 apresenta os critérios utilizados no cálculo de vulnerabilidade segundo a legislação de Quebec.

Quadro 23. Critérios para cálculo da vulnerabilidade de barragens segundo a legislação da província de Quebec – Canadá

CRITÉRIOS PARA CÁLCULO DE VULNERABILIDADE	PARÂMETROS
Altura da Barragem	8
Tipo de Barragem	15
Capacidade do Reservatório	6 (≤1, 50, 1.000, 2.000, 5.000 e 6.000 hm ³)
Tipo de Fundação	8 (rocha - aluvião)
Idade da Barragem ¹	10 (0 a 60 ou mais anos)
Sismicidade	5
Confiabilidade dos órgãos extravasores	3 (satisfatória, aceitável e insatisfatória)
Condições da Barragem	4 (muito boa, boa, aceitável e ruim/indefinida)

Fonte: Adaptado de QUEBEC, 2019.

O nível das consequências “C” decorrentes da ruptura da barragem é determinado de acordo com as características do vale afetado pela ruptura. Assim como FEMA (2004), a legislação da província de Quebec também recomenda o uso do cenário mais crítico de ruptura para a classificação da barragem.

As características de jusante, para a obtenção do nível de consequências, são avaliadas em termos de densidade populacional e importância de infraestruturas e serviços que seriam destruídos, ou fortemente danificados em caso da ruptura. A descrição das características consideradas para a determinação do nível de consequências está apresentada no Quadro 24.

Quadro 24. Critérios para a classificação da categoria de consequência da barragem, segundo a legislação da província de Quebec – Canadá

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA AFETADA	CATEGORIA DE CONSEQUÊNCIAS	PONTOS
Área desabitada ou: Área contendo infraestruturas ou serviços mínimos, tais como: <ul style="list-style-type: none"> • Segunda barragem na categoria de consequências muito baixa; • Estrada de acesso; • Fazendas; • Instalação comercial sem acomodações. 	Muito Baixa	1
Área habitada ocasionalmente contendo menos de 10 casas ou residências sazonais, ou: Área contendo uma instalação comercial que fornece alojamento para menos do que 25 pessoas ou que tenha menos de 10 unidades de alojamento (ou seja, 10 casas de campo, 10 parques de campismo, 10 quartos de hotel), ou: Área contendo infraestruturas ou serviços limitados, como: <ul style="list-style-type: none"> • Segunda barragem na categoria de baixa consequência; 	Baixa	2

¹ **Nota:** O parâmetro de idade da barragem difere para o tipo de barragem quanto ao material de construção (concreto, terra, enrocamento e madeira).

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA AFETADA	CATEGORIA DE CONSEQUÊNCIAS	PONTOS
<ul style="list-style-type: none"> • Estrada local. 		
<p>Área permanentemente habitada contendo menos de 10 residências ou ocasionalmente habitadas e contendo 10 ou mais casas ou residências sazonais, ou:</p> <p>Área que contém uma instalação comercial sazonal que oferece acomodação para 25 ou mais pessoas ou que contém 10 ou mais unidades de alojamento ou que opera durante todo o ano e oferece acomodação para menos de 25 pessoas ou com menos de 10 unidades de alojamento, ou:</p> <p>Área contendo infraestruturas ou serviços moderados, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Segunda barragem na categoria consequência moderada; • Via de acesso; • Linha de trem (local ou regional); • Empresa com menos de 50 trabalhadores; 	Moderada	3
<p>Área permanentemente habitada contendo 10 ou mais residências e menos de 1.000 moradores, ou:</p> <p>Área que contém um estabelecimento comercial que opera durante todo o ano e oferece acomodação para 25 ou mais pessoas, ou tem 10 ou mais unidades de alojamento, ou:</p> <p>Área contendo infraestruturas ou serviços significativos, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Segunda barragem na categoria Alta Consequência; • Estrada regional • Linha de trem (transcontinental ou transfronteiriça); • Escola; • Empresa que detém 50 a 499 trabalhadores. 	Alta	5
<p>Área permanentemente habitada por uma população de mais de 1.000 e menos do que 10.000, ou:</p> <p>Área contendo grandes infraestruturas ou serviços, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Segunda barragem na categoria Consequência Muito Alta • Estrada autoestrada ou nacional • Empresa que tem 500 ou mais empregados • Parque industrial • Local de armazenamento de substâncias perigosas 	Muito alta	8
<p>Área permanentemente habitada por uma população de 10.000 ou mais, ou:</p> <p>Área contendo infraestruturas ou serviços substanciais tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Segunda barragem na categoria Consequência grave; • Hospital; • Grande complexo industrial; • Grande local de armazenamento de substâncias perigosas. 	Grave	10

Fonte: Adaptado de QUEBEC, 2019.

2.3 Síntese dos Sistemas de Classificação de Barragens Apresentados

De acordo com o apresentado anteriormente, os sistemas de classificação de barragens no Brasil e no mundo consideram critérios técnicos e de dano potencial para classificar barragens. O Quadro 25 apresenta uma síntese do número de critérios e de classes utilizados para a classificação de barragens em todos os sistemas apresentados nesta dissertação.

Quadro 25. Sistemas de classificação de barragens de acordo com as especificações legais de diversos países e agências reguladoras.

PAÍS – ÓRGÃO FISCALIZADOR	CRITÉRIOS TÉCNICOS	CRITÉRIOS DE RISCO	Nº DE CLASSES DE BARRAGENS
Brasil – ANA (2017)	17	4	4
Brasil – ANEEL (2015)	17	4	3
EUA – FEMA (2004)	-	2	3
EUA – USACE (1997)	-	4	3
ICOLD (2011)	-	5	3
Filândia – ELY (2012)	-	3	3
Noruega (2011)	-	3	4
Portugal (2007)	-	1	3
Espanha (2019)	-	1	3
Suécia (2017)	-	1	3
África do Sul (2012)	3	3	3
Canadá – Quebec (2019)	7	1	4

3. DAM BREAK: HISTÓRICO E METODOLOGIA UTILIZADA

Historicamente, no Brasil e no mundo, ocorreram diversos eventos que vieram a causar o rompimento de barragens, trazendo prejuízos financeiros, humanos e ambientais. Até 2007, já se tinham registros, de pelo menos, 400 acidentes envolvendo barragens no Brasil, com mais de 24 mortos entre os anos de 2003 e 2007 (Menescal, 2007). Nos últimos anos, o Brasil vivenciou dois grandes desastres ambientais causados pela ruptura das barragens de rejeito de Fundão/MG em novembro 2015 e Brumadinho/MG em janeiro de 2019, que juntas somam mais de 270 mortes e prejuízos ambientais incalculáveis. Pode-se citar, ainda, o rompimento da Barragem de Algodões no Piauí que acarretou em pelo menos sete mortes, além das mundialmente conhecidas rupturas das barragens de Malpasset no sul da França em 1959 e Teton nos Estados Unidos em 1976 (ICOLD 1974, 1995).

Por se tratar de um fenômeno complexo, diversos estudos a fim de delimitar as condicionantes para o desenvolvimento de simulações de ruptura de barragens já foram desenvolvidos. Modelos de previsão do comportamento do escoamento proveniente da ruptura existem desde meados dos anos 1960. Segundo FEMA (2013) a necessidade de melhorias nos métodos de previsão se deu, principalmente, em decorrência de eventos de rupturas ocorridos entre 1960 e 1970.

Em 1977, foi desenvolvido o modelo DAMBRK, ferramenta de análise do processo de formação de brechas e vazão de pico para estudos de inundação. Entre 1977 e meados dos anos 90, foram desenvolvidas uma série de equações de regressão para prever as dimensões da brecha, tempo de abertura e vazão de pico. Modelos estatísticos, como os de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), USBR (1988), Von Thun e Gillette (1990), Dewey e Gillette (1993) e Froehlich (1995 e 2008), foram desenvolvidos para a previsão dos parâmetros de ruptura de barragens (FEMA, 2013). Os processos de modelagem de ruptura foram avançando com a previsão dos hidrogramas defluentes através de dois tipos de modelagem: física e empírica.

Modelos físicos são embasados em leis da física e em relações que governam o fluxo e a erosão (FEMA, 2013). Esses modelos são pouco utilizados na avaliação de rupturas de barragens devido à falta de dados para estimar a erosão da brecha. O modelo físico mais famoso é o NWS BREACH (1985), um modelo matemático de base física utilizado para prever as características da brecha e do hidrograma defluente para análises de ruptura de barragens de terra. O modelo foi desenvolvido acoplando o princípio da conservação de massa, a vazão do

vertedouro e a vazão da brecha juntamente com a capacidade de transporte de sedimentos do fluxo uniformemente variado (FEMA, 2013).

Já os modelos empíricos, também conhecidos como modelos paramétricos, são baseados em dados de entrada controlados, predeterminados, para estimar a brecha resultante da ruptura da barragem. Esses modelos são baseados em informações de estudos para estimativa do tempo de abertura e geometria final da brecha. Exemplos de modelos de ruptura empírica incluem NWS DAMBRK (1988) e seu sucessor NWS *Flood Wave Dynamic Model* (FLDWAV) (1998), HEC-1, HEC-HMS e HEC-RAS.

Neste trabalho, as simulações de ruptura foram realizadas utilizando o modelo empírico para a análise de formação das brechas de ruptura. As simulações da propagação da onda de cheia foram realizadas no modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0.6, da USACE, software amplamente utilizado em análises de ruptura hipotética de barragens. Os itens a seguir apresentam o modelo hidrodinâmico empregado nos estudos, bem como a metodologia utilizada para a parametrização da brecha e os cenários simulados.

3.1 Propagação da Onda de Cheia – HEC-RAS 5.0.6

O HEC-RAS é um modelo hidrodinâmico unidimensional, desenvolvido pelo “*US Army Corps of Engineers - USACE*” em 1995. O modelo é capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície d’água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre, considerando o fundo fixo. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercríticos e mistos, onde poderão ocorrer mudanças de regime supercrítico para subcrítico ou de subcrítico para supercrítico.

As simulações de ruptura no modelo podem ser realizadas pela abertura de brechas decorrentes do “*piping*” ou do galgamento da barragem. Adicionalmente, podem-se simular rupturas instantâneas de barragens de concreto, decorrentes de terremotos, por exemplo. O modelo possui um módulo dedicado para análise de rompimento de barragens, onde é possível determinar os parâmetros de formação da brecha. A formação da brecha no HEC-RAS é tratada segundo embasamento empírico através de parametrização de largura, altura, tempo de formação e tipo de deflagração (Figura 3). Ainda, é possível a visualização e a elaboração dos mapas de inundação decorrentes da ruptura através de uma plataforma GIS, inserida no próprio HEC (Figura 4).

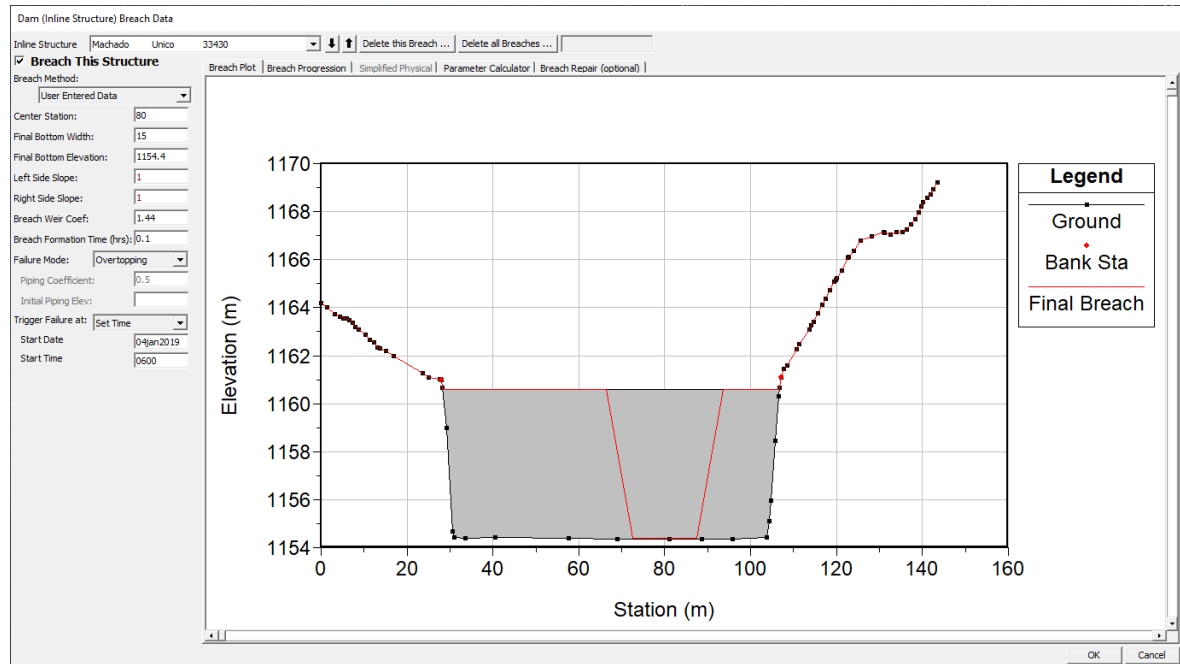


Figura 3. Módulo de formação da brecha de ruptura no modelo HEC-RAS.

Fonte: HEC-RAS.

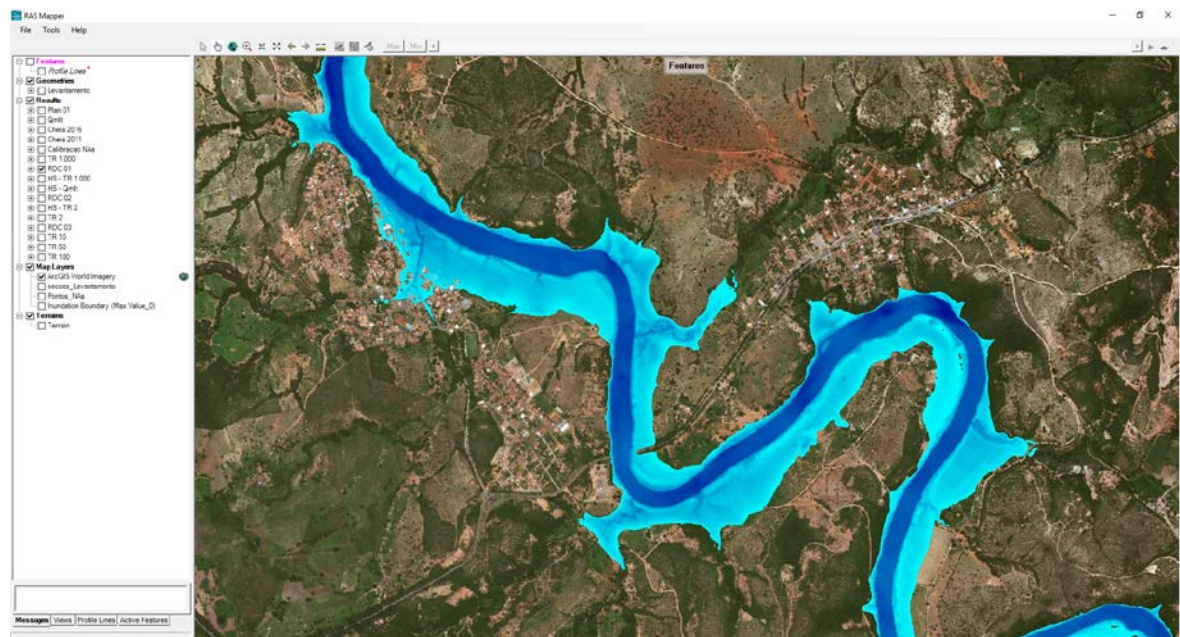


Figura 4. Módulo de visualização de manchas de inundação no modelo HEC-RAS.

Fonte: HEC-RAS.

O trabalho de Lara (2016) apresenta diversos autores que fazem uso do HEC-RAS para estudos de inundação, tais como: Calçada et al. (2004), Ackerman & Brunner (2006), Xiong (2011), Asnaashari et al. (2014), USACE (2014), Goodell (2012) e Goodell & Froehlich (2012). HEC (2010) coloca que o modelo é bastante empregado para análises de rompimento de barragens. O Quadro 26 resume alguns trabalhos referência simulados no modelo HEC-RAS.

Quadro 26. Emprego do modelo número HEC-RAS para estudos de *DAM-BREAK*.

ESTUDO	AUTORES
Inundação e hidrodinâmica	Ackerman (2000), Calçada et al. (2004), Marfai (2003)
DAM-BREAK	Ackerman & Brunner (2006), Xiong (2011), Asnaashari et al. (2014) e USACE (2014)
DAM-BEAK com uso de modelos probabilísticos	Goodell (2012) e Goodell & Froehlich (2012)

Fonte: LARA, 2016.

O HEC-RAS realiza as simulações da propagação da onda de cheia com base na solução da equação da conservação do momento unidimensional. O modelo utiliza as equações de momento em situações onde o perfil da superfície de água varia rapidamente. Essas situações incluem ressaltos hidráulicos, pontes e confluências de rios.

Para uma abordagem unidimensional, pode-se descrever a equação da conservação o momento de *Saint-Venant* como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta \cdot Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + A \cdot \frac{|Q| \cdot Q}{K^2} + q \cdot \frac{Q}{A} = 0$$

Equação 3

$$L \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

onde: Q é a vazão [m³/s]; h é a altura da coluna d'água [m]; x é a distância ao longo do rio [m]; t é o tempo [s]; A é a área da seção de escoamento [m²]; L é a largura da superfície de água [m]; K é a capacidade de transporte [m³/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; q é o escoamento lateral [m³/s/m]; e β é o fator de distribuição do fluxo [adim].

A capacidade de transporte é baseada em experimentos de cunho unidirecional, segundo a fórmula de Gauckler-Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot R_h^{\frac{2}{3}}$$

Equação 4

onde: V é a velocidade [m/s]; n é o coeficiente de rugosidade de Manning [adim]; S é a declividade do escoamento [m/m]; e R_h é o raio hidráulico da seção [m].

Segundo Miroslaw-Swiatek (2012), a formulação hidráulica 1D, conforme proposta no HEC-RAS, é mais confiável para estudos de ruptura de barragens, do que as propostas 2D, uma vez que já é validada e aplicada com resultados coerentes.

De acordo com Goodell (2012), o modelo HEC-RAS pode apresentar instabilidades numéricas na resolução das equações durante a passagem do hidrograma de ruptura. Isso ocorre em virtude da grande variação da vazão no tempo e no espaço, característica de um escoamento rapidamente variado. Desta forma, deve-se utilizar a opção de regime misto de escoamento (“*mixed flow regime*”) para estabilizar a solução numérica em casos de mudança do regime hidráulico. O modelo HEC-RAS possui, ainda, a opção de estabilização através da técnica de inércia local parcial (*Local Partial Inertia – LPI*), proposta por Fread et al. (1996). Com esta técnica é possível estabilizar a solução numérica para escoamentos não permanentes e não uniformes do modelo HEC-RAS.

A seguinte simplificação é empregada na formulação do modelo HEC-RAS como fator de redução nos termos inerciais da equação do momento:

$$\varphi \cdot \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \cdot \left(\frac{\beta \cdot Q^2}{A} \right)}{\partial x} \right] + A \cdot g \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad \text{Equação 5}$$

$$\sigma = F_T - F_R^M \rightarrow F_R \leq F_T ; m \geq 1$$

Equação 6

$$\sigma = 0 \rightarrow F_R > F_T$$

onde: φ é fator LPI multiplicador dos termos inerciais; F_T é o número de Froude, o qual determina o coeficiente igual a zero para valores de 1 a 2; F_R representa o número de Froude; e m é o expoente da equação, o qual altera o formato da curva da equação e varia entre 1 e 128.

Os valores de F_T e m devem ser ajustados durante a simulação numérica, de modo a estabilizar a solução da equação. Ainda que o aumento destes parâmetros ocasione o aumento da acurácia da solução, valores altos de F_T e m podem induzir a soluções instáveis. Sendo assim, deve-se avaliar constantemente os resultados de saída do modelo numérico, verificando a coerência hidrodinâmica e ajustando os coeficientes de modo a obter soluções estáveis.

3.1.1.1 Geometria do Modelo

No modelo unidirecional HEC-RAS, a representação do rio se dá por um eixo e a geometria do canal é definida a partir de seções transversais, ou seções hidráulicas. Estas seções devem ser posicionadas ao longo do comprimento do rio em espaçamentos condizentes com as singularidades hidráulicas existentes no curso d’água e com os critérios de estabilidade numérica do modelo (Figura 5).

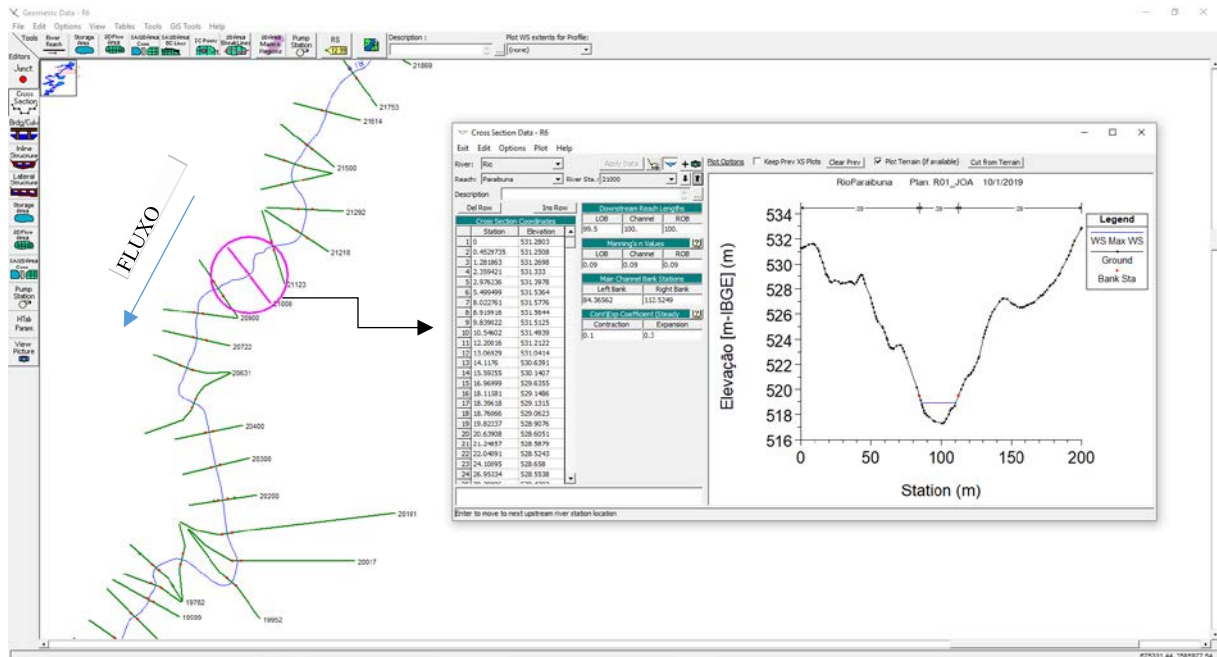


Figura 5. Representação da geometria no modelo HEC-RAS.

O posicionamento das seções deve ser feito de forma tal que retrate o canal uniformemente e também as singularidades hidráulicas, como pontos de mudança brusca de declividade, afunilamentos, ilhas e fluxo por estruturas hidráulicas existentes no curso do rio.

As seções devem sempre estar posicionadas de maneira perpendicular ao fluxo e devem conter informações como fundo do canal, distância das margens, declividade das paredes do canal e parâmetros de rugosidade de cada região da seção.

O espaçamento das seções transversais é um dos maiores fatores de causa de instabilidade numérica em modelos unidirecionais de regime de vazão não permanente. O manual de referências hidráulicas do HEC-RAS 5.0.5 (2016) sugere as equações de Fread (1993) e Samuels (1989) para se estabelecer um espaçamento mínimo entre as seções:

$$\Delta x \leq \frac{cTr}{20} \quad \text{Equação 7}$$

$$\Delta x \leq \frac{0,15D}{S_0} \quad \text{Equação 8}$$

onde: Δx é o distanciamento das seções [m], c é a velocidade da onda [m/s], Tr é o tempo de ascensão da onda [s], D é a profundidade média do canal [m] e S_0 é a declividade média do canal [m/m].

3.1.1.2 Rompimento de barragens no HEC-RAS

Para o modelo HEC-RAS, os seguintes parâmetros de formação da brecha de ruptura, devem ser inseridos:

- Largura da geratriz inferior da brecha;
- Altura da brecha;
- Declividades laterais da brecha (H:V);
- Coeficiente de descarga da brecha;
- Tempo de formação;
- Modo de ruptura;
- Coeficiente de descarga do piping;
- Elevação d'água de formação do piping;
- Mecanismos de ruptura; e,
- Nível d'água da ruptura.

Tais parâmetros devem ser determinados através do emprego de relações empíricas e conhecimento do responsável pelo estudo de rompimento hipotético da barragem.

3.2 Parâmetros de Formação da Brecha de Ruptura

Os parâmetros de formação de brecha utilizados na entrada do modelo de ruptura hipotética variam com o tipo de barragem, de acordo com o material de sua construção. Barragens de concreto, por exemplo, tendem a romper rapidamente, tendo parte de sua estrutura retirada em curto intervalo de tempo, enquanto barragens de terra e enrocamento apresentam ruptura gradual, com erosão contínua, que pode ocorrer ao longo de horas após o início da ruptura.

Schaefer (1992) coloca que a representação numérica da ruptura hipotética de uma barragem de concreto, ou de elementos mecânicos da barragem, tais como comportas, constituem um procedimento de baixa complexidade. Nestes casos, a ruptura é analisada de forma instantânea. De acordo com USACE, 2014, a determinação dos parâmetros de formação da brecha de barragens de terra e enrocamento apresenta maior complexidade, dada a heterogeneidade dos materiais.

Diversos estudos já foram desenvolvidos analisando dados históricos de casos de ruptura de barragens para criação de normativas, equações de regressão e de metodologias de modelagem numérica para estimativa de tamanho e tempo de formação da brecha (USACE, 2014). Os trabalhos de Wahl (2004, 2010) são uma referência para estimativa dos parâmetros de formação da brecha de ruptura. O Quadro 27 apresenta os valores recomendados para os parâmetros de forma geométrica e tempo de formação das brechas de ruptura, para cada tipo de barragem.

Quadro 27. Faixas e possíveis valores para caracterização da brecha.

TIPO DE BARRAGEM	LARGURA MÉDIA DA BRECHA (BM)	COMPONENTE HORIZONTAL DA DECLIVIDADE LATERAL DA BRECHA (H:V)	TEMPO DE FORMAÇÃO DA BRECHA (TF) [H]	AGÊNCIA (EUA)
Terra/Enrocamento	(0,5 até 3,0) x hd	0 até 1,0	0,5 até 4,0	USACE (1980)
	(1,0 até 5,0) x hd	0 até 1,0	0,1 até 1,0	FERC
	(2,0 até 5,0) x hd	0 até 1,0 (maior)	0,1 até 1,0	NWS
	(0,5 até 5,0) x hd ²	0 até 1,0	0,1 até 4,0 ¹	USACE (2007)
Concreto (Gravidade)	Múltiplos blocos	Vertical	0,1 até 0,5	USACE (1980)
	Típico < 0,5 L	Vertical	0,1 até 0,3	FERC
	Típico < 0,5 L	Vertical	0,1 até 0,2	NWS
	Múltiplos blocos	Vertical	0,1 até 0,5	USACE (2007)
Concreto em arco	Toda o barramento	Declividade do vale	<0,1	USACE (1980)
	Toda o barramento	0 até a declividade do vale	<0,1	FERC
	(0,8 x L) até L	0 até a declividade do vale	<0,1	NWS
	(0,8 x L) até L	0 até a declividade do vale	<0,1	USACE (2007)
Escombros	(0,8 x L) até L	1,0 até 2,0	0,1 até 0,3	FERC
	(0,8 x L) até L		<0,1	NWS

Fonte: LARA, 2016.

Neste trabalho, as brechas são representadas através dos parâmetros de largura média, altura e declividade dos taludes laterais (H:V). Este conceito, de tratar a brecha como uma forma prismática, é uma simplificação utilizada para representá-la em modelos numéricos como HEC-RAS. A Figura 6 ilustra os parâmetros de forma da brecha de ruptura, bem como sua representação no modelo numérico conceitual.

² **Nota:** Barragens com grande volume de água armazenado, e que tenham grande extensão de crista, continuarão erodindo por longos períodos, podendo apresentar maiores larguras e tempos de formação da brecha. h_d = altura da barragem; L = largura de crista da barragem.

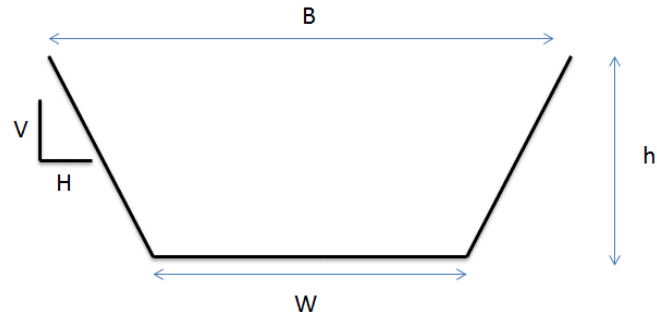


Figura 6. Representação dos parâmetros de forma da brecha de ruptura.
Fonte: LARA, 2016.

3.2.1 Equações de Regressão

As equações empíricas utilizadas para a obtenção dos parâmetros das brechas de ruptura foram determinadas estatisticamente através de estudos de regressão, com base nas informações de 108 casos reportados de rupturas de barragens. Para a formulação das equações, os autores dividiram as barragens em grupos, segundo o tamanho e o tipo de barragem (Wahl, 2004).

O Quadro 28 resume as principais referências de equações empíricas para estimativa de parâmetros geométricos de brechas.

Quadro 28. Estudos de caso para desenvolvimento dos modelos de regressão para cálculo de parâmetros da brecha.

REFERÊNCIA	NÚMERO DE ESTUDOS DE CASO
Singh & Snorrason (1984)	20
MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	42
Froehlich (1987)	43
Singh & Scarlatos (1988)	52
Von Thun & Gillette (1990)	57
Dewey & Gillette (1993)	57
Froehlich (1995)	63

Fonte: USACE, 2014.

Nesta pesquisa, as brechas foram parametrizadas com base nas equações dos autores citados a seguir:

- Bureau of Reclamation (1988);
- Froehlich (1995);
- Froehlich (2008);
- MacDonald & Langridge-Monopolis (1984); e,
- Von Thun & Gillette (1990).

A escolha destas equações está embasada nos argumentos de USACE (2014), que coloca que estas têm sido amplamente empregadas em estudos de rompimento hipotético de barragens. O Quadro 29 apresenta as equações utilizadas para a obtenção dos parâmetros de geometria e tempo de abertura das brechas nesta pesquisa.

Quadro 29. Equações de regressão para a obtenção dos parâmetros de formação de brechas.

AUTOR	EQUAÇÃO	
Bureau of Reclamation (1988)	$B_M = 3 \cdot H_w$ $T_F = 0,011 \cdot B_M$	Equação 9
Froelich (1995)	$B_M = 0,1803 \cdot K_0 \cdot V_W^{0,32} \cdot H_B^{0,19}$ $T_F = 0,00254 \cdot V_W^{0,53} \cdot H_B^{-0,90}$	Equação 10
Froelich (2008)	$B_M = 0,27 \cdot K_0 \cdot V_W^{0,32} \cdot H_B^{0,04}$ $T_F = 63,2 \cdot \sqrt{\frac{V_W}{g \cdot H_B^2}}$	Equação 11
Von Thun & Gillette (1990)	$B_M = 2,5 \cdot H_w + C_B$ $T_F = 0,02 \cdot H_w + 0,025$ (resistente à erosão)	Equação 12
	$T_F = 0,015 \cdot H_w$ (facilmente erodível) ou $T_F = \frac{B_M}{4 \cdot H_w}$ (resistente à erosão)	
	$T_F = \frac{B_M}{4 \cdot H_w + 61}$ (facilmente erodível)	Equação 13

onde: B_m representa a largura média da brecha [m]; H_w representa a altura d'água [m] acima da geratriz inferior da brecha no momento do rompimento; T_F representa o tempo de formação da brecha [h]; K_0 representa uma constante na equação e equivale a 1,4 para rompimentos por galgamento e 1,0 para rompimentos por piping; V_w representa o volume do reservatório no momento do rompimento [m³]; H_b representa a altura final da brecha [m]; e C_b representa um coeficiente, o qual é função do tamanho do reservatório.

A Equação 10, proposta por Froehlich em 1995, foi embasada em 63 casos de rompimentos de barragens de terra e enrocamento. As barragens utilizadas pelo autor apresentavam dentre suas características, alturas do barramento variando entre 3,66 m até 92,96 m e volume armazenado no reservatório, no momento de rompimento, entre 0,013 até 660 hm³.

Já a Equação 11, proposta pelo mesmo autor em 2008, é indicada para pequenas e grandes barragens e gera resultados conservadores e, segundo SEO (2010), coerentes. A equação anterior foi atualizada, empregando 74 casos de barragens de terra e enrocamento. Os mesmos parâmetros de largura média da brecha, tempo de formação e declividades laterais foram utilizados para o desenvolvimento desta atualização. As barragens estudadas pelo autor apresentavam dentre suas características, alturas do barramento variando entre 3,05 m até 92,96 m e volume armazenado no reservatório, no momento de rompimento, entre 0,0139 até 660 hm³.

Von Thun & Gillette (1990) desenvolveram dois conjuntos de equações para o tempo de formação da brecha. O primeiro em função da profundidade d'água sobre a geratriz inferior da brecha (Equação 12) e o segundo em função da profundidade d'água sobre sua geratriz inferior e largura média, conforme Equação 13. O método proposto utiliza a declividade lateral da brecha igual a 1H:1V, exceto para casos que o corpo da barragem é composto por solos coesivos, onde as declividades laterais devem ficar em torno de 0,5H:1V a 0,33H:1V. Os dados característicos das barragens empregados pelos autores variaram entre 3,66 m até 92,96 m de altura do barramento, e volume armazenado no reservatório no momento de rompimento entre 0,0027 até 660 hm³. O coeficiente C_b utilizado no cálculo da largura da brecha varia conforme o tamanho do reservatório (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficientes C_b.

TAMANHO DO RESERVATÓRIO [m ³]	CB [m]
<1,23.10 ⁶	6,1
1,23.10 ⁶ – 6,17.10 ⁶	18,3
6,17.10 ⁶ – 1,23.10 ⁷	42,7
>1,23.10 ⁷	54,9

Fonte: USACE, 2014.

USACE (2014) orienta que os termos “barragens resistentes à erosão” e “barragens facilmente erodíveis”, dispostos nas equações de Von Thun & Gillette (1990), sejam associados ao controle de qualidade do método construtivo aplicado.

Segundo FEMA (2013), a aplicabilidade das equações empíricas para estimar largura média e tempo de formação deve ser ponderada para reservatórios com volumes superiores a 62 hm³ e altura superior a 30 m. O limite de uso das equações, considerando unicamente o volume do reservatório, é de 660 hm³, devendo ser observado, também, a altura do maciço (USACE, 2014).

Para reservatórios de grande porte e para barragens em terra e enrocamento, o uso de uma relação de taxa de erosão por carga hidráulica auxilia na obtenção de parâmetros adequados frente à aplicação das equações empíricas (Equação 15). A taxa de erosão representa como deverá ser a evolução da perda de massa do corpo do maciço durante a ocorrência da ruptura da barragem, obtida a partir da Equação 14 (Lara, 2016). Tal índice é recomendado por Von Thun & Gillette (1990) para verificar se os parâmetros empregados para representar o processo de formação da brecha estão adequados fisicamente. O intervalo entre 1,6 e 21 é uma recomendação, a qual é indicada por órgãos fiscalizadores norte-americanos, como no estado

do Colorado. Von Thun & Gillette (1990) colocam que o intervalo pode ter seu extremo superior ampliado até $200 + 4H_w$, no entanto, o deve atentar aos valores do extremo inferior. Valores abaixo de 1,6 indicam um tempo de formação da brecha muito longo ou uma largura média pequena em relação à altura do barramento.

$$E_R = \frac{B_M}{T_F} \quad \text{Equação 14}$$

$$1,6 < \frac{E_R}{H_w} < 21,0 \quad \text{Equação 15}$$

3.2.2 Coeficientes de Descarga da Brecha

Baseado no tipo de material de construção da barragem, USACE (2014) sugere o emprego da Tabela 2 como norteador na adoção dos valores dos coeficientes de descarga da brecha e para o piping.

Tabela 2. Coeficientes de descarga.

TIPO DE BARRAGEM	COEF. DE VAZÃO DA BRECHA	COEF. DE DESCARGA PARA O PIPING
Barragem de argila ou núcleo de argila	1,44 – 1,82	0,5 – 0,6
Barragem de enrocamento	1,44 – 1,66	0,5 – 0,6
Concreto em arco	1,71 – 1,82	0,5 – 0,6
Concreto (gravidade)	1,44 – 1,66	0,5 – 0,6

Fonte: USACE, 2014.

3.3 Critérios de Simulação

FEMA (2013) apresenta duas abordagens para o estudo de ruptura de barragens: a abordagem por evento hidrológico e a abordagem baseada em risco. A abordagem baseada em eventos é, tradicionalmente, a mais utilizada nas análises de ruptura. Caracterizada como um método determinístico, esta abordagem é baseada em eventos específicos de precipitação e/ou não precipitação. Nesta abordagem, são avaliados dois cenários hidrológicos: o chamado *Sunny Day* (operação normal da barragem, não associado a uma cheia) e o evento hidrológico crítico, relacionado à vazão de projeto da barragem.

Abordagens baseadas em risco, por sua vez, são associadas às consequências da ruptura da barragem ao longo do vale de jusante. Segundo FEMA (2013), a avaliação das consequências não é realizada com base na probabilidade de falha da barragem, e sim na perda

potencial de vidas ou no aumento de perdas econômicas causadas pela ruptura. Um benefício dessa abordagem é a obtenção, através de análises por dano incremental, das áreas afetadas somente pela ruptura, desconsiderando os efeitos das cheias naturais. Para uma abordagem baseada em risco, as consequências a jusante para uma série de eventos de falha da barragens são avaliadas.

Várias agências federais americanas, incluindo a USACE, USBR, FERC e FEMA, desenvolveram procedimentos de avaliação baseados em risco para análise de ruptura de barragens e mapeamento de inundações.

FEMA (2004) apresenta premissas para a análise de segurança de barragens com base no risco. No documento de referência FEMA 94, a inundação de projeto da barragem (do inglês “*inflow design flood*” - *IDF*) é definida como “a inundação acima da qual o aumento incremental na superfície d’água a jusante, devido à falha da barragem, não é mais considerada uma ameaça adicional”. Portanto, a avaliação incremental de perigos e o estabelecimento da *IDF* é, em sua essência, uma abordagem baseada em riscos.

Segundo FEMA (2013) a seleção da *IDF* é baseada na avaliação da magnitude de vários eventos de inundação. O mesmo evento hidrológico é simulado para condições naturais e de ruptura. As elevações da superfície d’água para os eventos de ruptura e para os cenários de cheia natural são comparados, para determinar o aumento na elevação da superfície d’água resultante da ruptura da barragem. Se o aumento incremental resulta em um valor aceitável, uma cheia de menor magnitude é simulada. O processo é repetido até que o aumento incremental seja superior aos requisitos especificados. As publicações da FEMA e da FERC classificam as “conseqüências aceitáveis” da ruptura como alturas incrementais de aproximadamente 2 pés (~ 61 cm).

A *IDF*, nos EUA, é utilizada como referência para o projeto de adequação de barragens. Nos casos em que a estrutura da barragem não apresente condições estruturais adequadas para a passagem desta cheia ou, que a região de jusante seja habitada nas delimitações da mancha da *IDF*, medidas para adequação da estrutura e/ou desapropriações devem ser previstas (FEMA, 2013).

As análises de ruptura hipotética, nesta pesquisa, foram realizadas tomando como base a abordagem de risco. Optou-se por essa abordagem por apresentar resultados para diferentes volumes de cheia, permitindo a obtenção da *IDF* e embasando as análises de dano

potencial associado. Nas análises, foi adotada a elevação incremental de 0,61 m (~2 ft) para parametrizar a chegada da onda de inundação induzida pela ruptura hipotética da barragem. Esse critério de avaliação da chegada da onda é adequado frente aos requisitos das regulamentações da Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, Lei 12.334/2010.

Para todas as barragens analisadas neste estudo, foram simulados cenários considerando diversas probabilidades de ocorrência de cheias, conforme disposto no Quadro 30.

Quadro 30. Cenários analisados nos estudos de *Dam-Break*.

CENÁRIO NATURAL	CENÁRIO DAM-BREAK	CHEIA DE REFERÊNCIA (ANOS)
C01	R01	Sunny Day (Q_{MLT})
C02	R02	TR 2
C03	R03	TR 10
C04	R04	TR 50
C05	R05	TR 100
C06	R06	TR 1.000 ou TR 10.000

onde: “C0” corresponde ao cenário da cheia natural; e “R0” corresponde ao cenário de ruptura hipotética da barragem.

3.4 Variáveis Hidráulicas – Saída do Modelo

A análise hidráulica das saídas dos modelos numéricos é crucial para a construção das cartas de inundação e procedimentos de tomada de decisão. Sendo assim, as seguintes variáveis hidráulicas são extraídas e pós processadas do modelo numérico hidráulico:

- Cota de pico para cada um dos cenários naturais avaliados;
- Cota de pico para cada um dos cenários de ruptura avaliados;
- Altura incremental da coluna d’água;
- Vazão de pico;
- Tempo de pico, Tempo de Inundação e Tempo de chegada da frente de onda;
- Velocidade da onda; e,
- Área inundada para cada cenário.

Nesta linha, serão apresentados os resultados para 1 seção de interesse em cada um dos modelos analisados nesta pesquisa. Optou-se pela seção localizada a 10 km do barramento, seção que delimita a Zona de Autossalvamento (ZAS), conforme disposto no Artigo 3º da Resolução nº 236 da ANA, de 30 de janeiro de 2017:

“XXIII - Zona de Autossalvamento - ZAS: região do vale a jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar, no mínimo, a menor das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km”.

As cotas são extraídas dos perfis hidráulicos da superfície da linha d’água com referencial altimétrico tido como zero IBGE. Esses valores são interpretados em relação às cotas das estruturas e benfeitorias de referência ao longo do vale a jusante, de modo a determinar o nível de impacto da onda de cheia.

A altura incremental é a diferença entre as cotas do cenário de escoamento das vazões de referência. A altura incremental para cenários hidrológicos extremos representa o quanto de inundação é proveniente da ruptura induzida da barragem.

A vazão de pico é extraída dos hidrogramas da cheia em diferentes locais do vale a jusante.

O tempo de pico é calculado pela diferença entre o instante de início da ruptura e o instante de pico do cotograma para cada local do vale a jusante determinado como estratégico. O tempo de inundação é calculado como o tempo de permanência do nível d’água superior a uma determinada cota de referência. O tempo de chegada é calculado como o instante em que a onda induzida pela ruptura hipotética atinge uma cota de referência gerada por uma elevação incremental de 0,61 m (~2 ft).

A velocidade da onda é calculada com base no tempo de deslocamento dos picos do cotograma ao longo do vale a jusante, que equivale à velocidade da massa d’água da onda induzida pela ruptura hipotética.

A Figura 7 ilustra os tempos de referência em relação à onda induzida pela ruptura hipotética da barragem, sendo apresentado o tempo de pico a partir do início da ruptura da barragem, o tempo de chegada da onda e o tempo de inundação acima da elevação de referência para indicar o tempo de chegada.

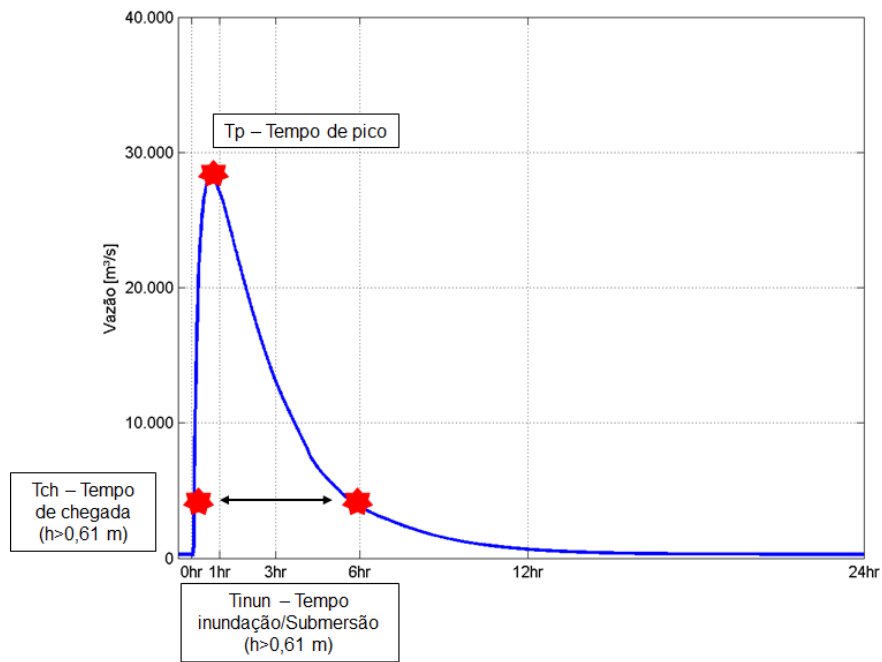


Figura 7. Exemplificação dos tempos de referência da onda de inundação.
Fonte: LARA, 2016.

4. BARRAGENS ANALISADAS

As análises quanto à classificação de Dano Potencial Associado (DPA) apresentadas nesta dissertação foram embasadas nos resultados de 15 estudos de ruptura hipotética de barragens. As barragens estudadas foram escolhidas devido à disponibilidade de dados e modelos conceituais por parte da autora desta dissertação. Os empreendimentos foram selecionados de forma aleatória, primando pela diversificação de porte dos barramentos. Devido a termos de confidencialidade, os nomes, localização e resultados em termos de cotas e número de atingidos não serão apresentados neste estudo.

Os itens a seguir apresentam as características das barragens, os modelos conceituais utilizados e os parâmetros de ruptura utilizados como base para as análises de classificação de DPA.

4.1 Características Técnicas

Este estudo foi embasado nos resultados de ruptura hipotética de 15 barragens brasileiras de geração de energia elétrica. Os empreendimentos localizados, em sua maioria, na região sudeste do Brasil, apresentam tipo e porte variável, com barragens de terra, enrocamento e concreto, com reservatórios variando entre 0,05 hm³ e 18.500 hm³.

A Tabela 3 apresenta as características técnicas das barragens, como: altura (H), comprimento do barramento (L), tipo do barramento, volume do reservatório (V) e tipo do sistema extravasor.

Tabela 3. Características das barragens e dos trechos analisados.

SIGLA	TIPO	H _{MÁXIMA} [m]	L _{BARRAGEM} [m]	V _{RESERVATÓRIO} [hm ³]	VERTEDOURO
B01	Concreto	5,00	30,0	0,42	Soleira Livre
B02	Concreto	4,00	122,0	0,13	Soleira Livre
B03	Concreto	7,50	51,0	0,02	Soleira Livre
B04	Concreto	4,00	35,0	0,06	Controlado
B05	Concreto	9,00	55,0	0,36	Controlado
B06	Concreto	13,00	28,0	0,96	Controlado
B07	Concreto	6,00	80,0	0,14	Soleira Livre
B08	Mista ³	24,00	550,0	171,89	Controlado
B09	Mista	8,50	185,0	2,42	Soleira Livre
B10	Concreto	46,00	85,0	43,56	Controlado
B11	Concreto	9,00	170,0	0,05	Controlado

³ Barramento composto por trechos de terra, enrocamento e vertedouro em concreto.

SIGLA	TIPO	H_{MÁXIMA} [m]	L_{BARRAGEM} [m]	V_{RESERVATÓRIO} [hm³]	VERTEDOURO
B12	Mista	36,00	608,0	797,63	Controlado
B13	Mista	23,00	550,0	11,20	Controlado
B14	Mista	70,00	1.060	447,98	Controlado
B15	Mista	75,00	2.700	18.855,00	Controlado

As barragens localizadas nos mesmos cursos d'água (B01 e B02; B03, B04 e B05; B08 e B09; e B14 e B15) foram simuladas nos mesmos modelos conceituais, considerando os possíveis efeitos de rupturas em cascata. Os demais pontos possuem modelo individual.

4.1.1 Classificação quanto ao Porte da Barragem

A classificação quanto ao porte dos empreendimentos analisados neste estudo foi realizada com base na Resolução nº 143 do CNRH, no proposto por USACE em 1979 e por ICOLD em 2011. Os sistemas de classificação foram apresentados no capítulo 2 desta dissertação.

A Tabela 4 apresenta os resultados da classificação, indicando que o estudo foi realizado com 07 (sete) barragens de pequeno porte, 03 (três) barragens de porte intermediário e 05 (cinco) barragens de grande porte, segundo o sistema americano de classificação.

Tabela 4. Classificação quanto ao porte dos empreendimentos analisados.

SIGLA	H_{MÁXIMA} [m]	V_{RESERVATÓRIO} [hm³]	TAMANHO RES. 143 - CNRH	PORTE - USACE 1979	PORTE - ICOLD 2011
B01	5,00	0,42	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B02	4,00	0,13	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B03	7,50	0,02	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B04	4,00	0,06	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B05	9,00	0,36	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B06	13,00	0,96	Pequeno	Intermediário	Pequeno
B07	6,00	0,14	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B08	24,00	171,89	Grande	Grande	Grande
B09	8,50	2,42	Pequeno	Intermediário	Pequeno
B10	46,00	43,56	Médio	Grande	Grande
B11	9,00	0,05	Pequeno	Pequeno	Pequeno
B12	36,00	797,63	Muito Grande	Grande	Grande
B13	23,00	11,20	Médio	Intermediário	Grande
B14	70,00	447,98	Grande	Grande	Grande
B15	75,00	18.855,00	Muito Grande	Grande	Grande

4.1.2 Relevo do Vale de Jusante

A classificação quanto ao domínio de relevo do vale de jusante foi realizada até a seção localizada a 10 km do barramento. Foi utilizado o sistema proposto pelo CPRM (Serviço Geológico do Brasil) nos mapas de Geodiversidade dos estados de Minas Gerais e de Santa Catarina (Figura 8 e Figura 9).

Ao todo, foram obtidos 06 (seis) grupos de classificação quanto ao relevo da região, conforme apresentado na Tabela 5 e descrito a seguir:

- Domínio de Colinas Amplas e Suaves: formas pouco dissecadas, com vertentes convexas e topos amplos, de morfologia tabular ou alongada. Apresentam sistema de drenagem principal com deposição de planícies aluviais relativamente amplas;
- Domínio de Colinas e Morros Baixos: colinas dissecadas, com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou aguçados. Sistema de drenagem principal com deposição de planícies aluviais restritas ou em vales fechados;
- Domínio de Morros e Serras Baixas: morros convexo-côncavos dissecados com topos arredondados ou aguçados. Esse padrão de relevo apresenta sistema de drenagem principal com planícies aluviais restritas;
- Domínio Montanhoso: formas muito acidentadas, com vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Exibem sistema de drenagem principal em franco processo de entalhamento;
- Domínio de Escarpas Serranas: relevo montanhoso, muito acidentado, com vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas, assim como topos de cristas alinhadas, aguçadas ou levemente arredondadas. Apresentam sistema de drenagem principal em franco processo de entalhamento; e
- Domínio de Vales Encaixados: feições de relevo fortemente entalhadas pela incisão vertical da drenagem formando vales encaixados e incisões sobre planaltos e chapadas. São formas constituídas por vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, fortemente sulcadas, declivosas, com sedimentação de colúvios e depósitos de tálus. Apresentam sistema de drenagem principal em franco processo de entalhamento.

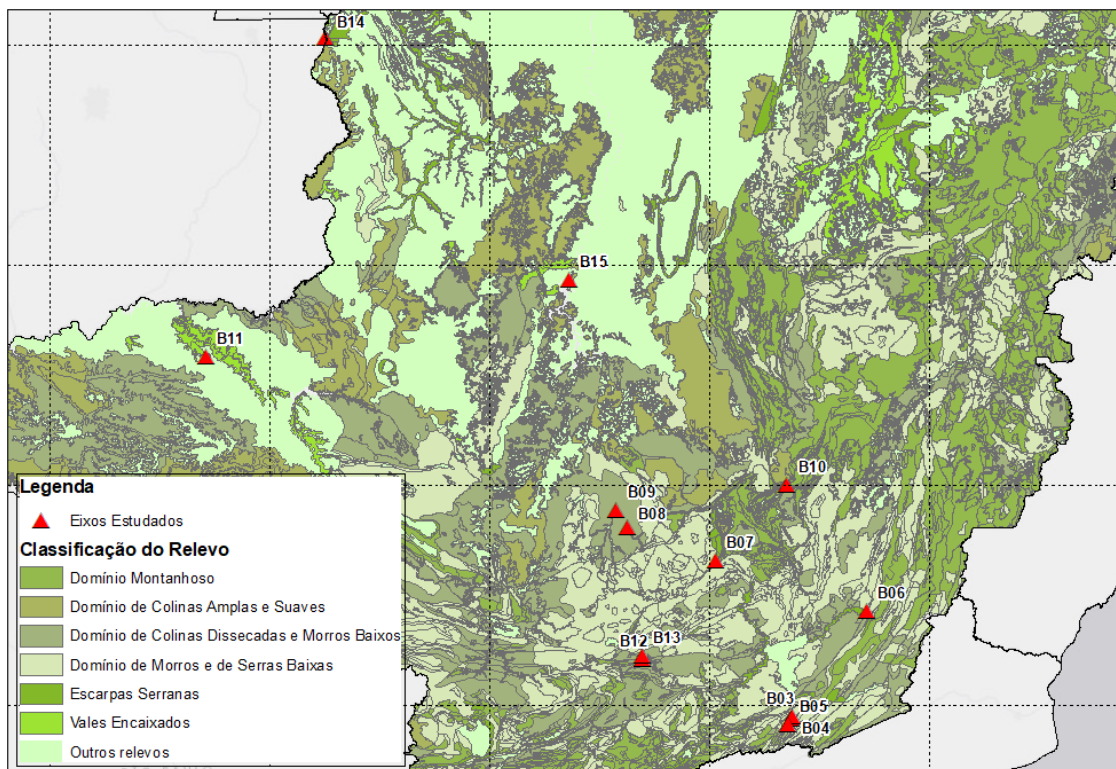


Figura 8. Mapa de classificação de relevo, de acordo com o proposto pelo CPRM.

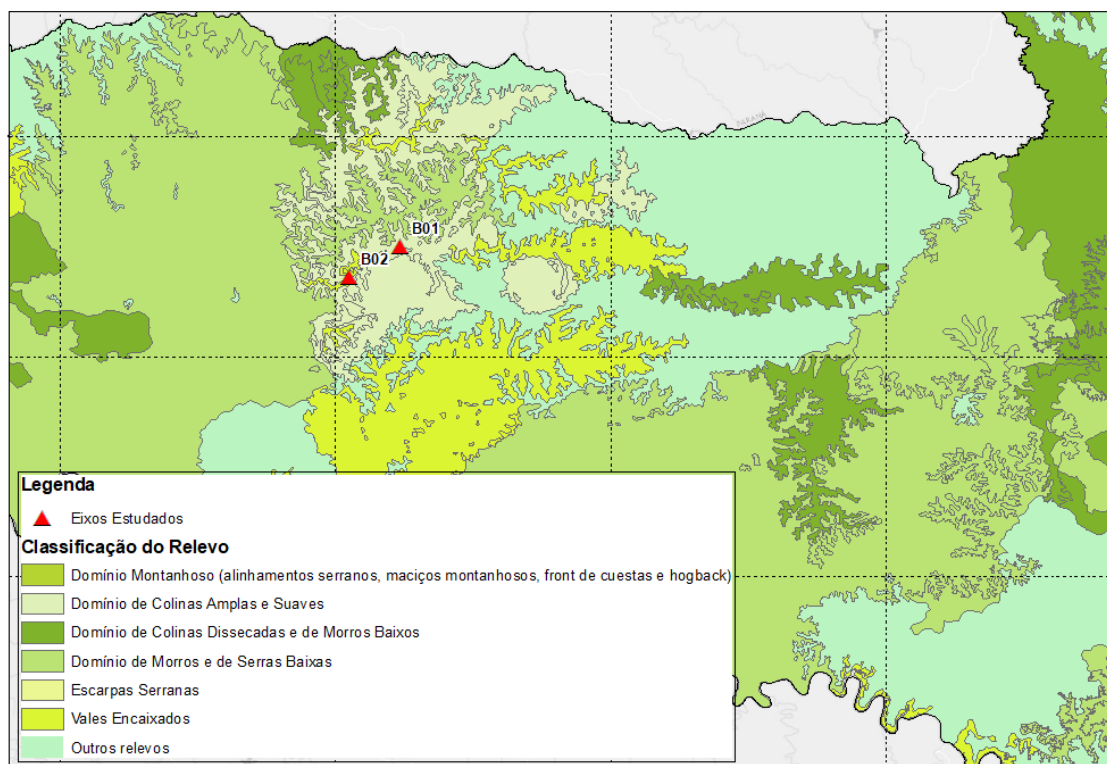


Figura 9. Mapa de classificação de relevo, de acordo com o proposto pelo CPRM.

Tabela 5. Classificação do relevo da região de jusante – CPRM.

SIGLA	$i_{JUSANTE}^4$ [%]	DOMÍNIO DO RELEVO⁵
B01	0,28%	Colinas amplas e suaves
B02	1,03%	Vales encaixados
B03	1,46%	Morros e serras baixas
B04	0,84%	Morros e serras baixas
B05	0,32%	Colinas e morros baixos
B06	0,74%	Escarpas serranas
B07	0,11%	Morros e serras baixas
B08	0,04%	Colinas e morros baixos
B09	0,38%	Colinas e morros baixos
B10	0,55%	Montanhoso
B11	0,32%	Vales encaixados
B12	0,16%	Colinas e morros baixos
B13	0,90%	Colinas e morros baixos
B14	0,09%	Escarpas serranas
B15	0,28%	Colinas amplas e suaves

4.1.3 Hidrogramas de Cheias Naturais

Os estudos de cheia foram atualizados nos últimos anos, para verificação hidráulica das estruturas extravasoras e embasaram as modelagens de ruptura hipotética das barragens, sendo utilizados como condição de contorno de montante dos modelos. A Tabela 6 apresenta as vazões de pico e os volumes dos hidrogramas para cada um dos eixos estudados. A Figura 10 ilustra o hidrograma da barragem B01. Os demais hidrogramas seguem apresentados no Anexo A.

Tabela 6. Vazões de cheia e volume dos hidrogramas das 15 barragens analisadas.

	TR 2		TR 10		TR 50		TR 100		TR 1.000		TR 10.000	
	Q_{PICO} [m ³ /s]	V [hm ³]	Q_{PICO} [m ³ /s]	V [hm ³]	Q_{PICO} [m ³ /s]	V [hm ³]	Q_{PICO} [m ³ /s]	V [hm ³]	Q_{PICO} [m ³ /s]	V [hm ³]	Q_{PICO} [m ³ /s]	V [hm ³]
B01	630	293	1.161	540	1.627	756	1.824	848	2.475	1150	-	-
B02	689	320	1.271	591	1.781	828	1.997	928	2.710	1259	-	-
B03	149	28	230	43	301	57	331	63	-	-	529	100
B04	157	30	242	46	317	60	348	66	-	-	557	105
B05	161	30	249	47	326	62	358	68	-	-	572	108
B06	19	1	42	2	81	4	103	5	210	10	-	-
B07	347	114	922	281	1.470	448	1.705	520	2.489	759	-	-
B08	303	91	655	196	1.007	302	1.159	347	-	-	2.166	649
B09	354	106	765	229	1.176	352	1.353	405	-	-	2.529	757
B10	293	51	525	91	729	127	815	141	-	-	1.384	240
B11	138	31	227	51	306	68	339	76	448	100	-	-
B12	584	470	899	724	1.175	946	1.292	1041	-	-	2.062	1.661

⁴ Inclinação média do leito do rio referente ao trecho de 10 km a jusante do barramento.

⁵ Classificação feita com base nos mapas de geodiversidade estadual do Serviço Geológico do Brasil – CPRM para o trecho de até 10 km a jusante do barramento.

	TR 2		TR 10		TR 50		TR 100		TR 1.000		TR 10.000	
	QPICO [m ³ /s]	V [hm ³]	QPICO [m ³ /s]	V [hm ³]	QPICO [m ³ /s]	V [hm ³]	QPICO [m ³ /s]	V [hm ³]	QPICO [m ³ /s]	V [hm ³]	QPICO [m ³ /s]	V [hm ³]
B13	584	470	899	724	1.175	946	1.292	1041	-	-	2.062	1.661
B14	208	39	433	81	645	121	754	141	-	-	1.396	261
B15	3.311	5.937	5.155	9.244	6.771	12.142	7.445	13.369	-	-	11.967	21.460

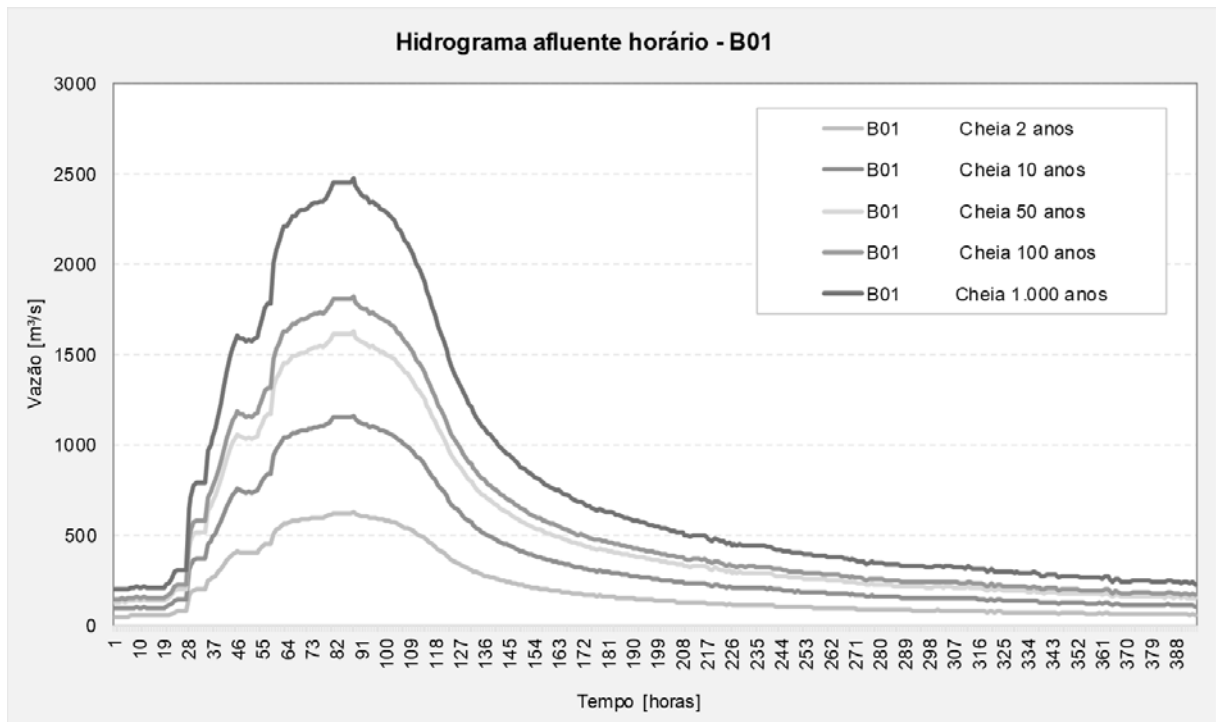


Figura 10. Hidrogramas de cheia da barragem B01.

4.2 Modelos Conceituais

A geometria dos modelos é composta por seções topobatimétricas levantadas em campo e seções obtidas através da interpolação dos modelos digitais de terreno (MDT). Os MDTs foram elaborados com base nos levantamentos de campo, realizados em todo o trecho de estudo das barragens (reservatório e região de jusante), com precisão de 0,50 m, o que permitiu a representação fiel da superfície do terreno (Figura 11).

Os modelos foram calibrados com base em pontos de nível d'água medidos na ocasião do levantamento das seções topobatimétricas e na passagem de cheias naturais (quando notada presença de estação fluviométrica no trecho de jusante - que permitisse a calibração). A Tabela 7 apresenta o modo de calibração, bem como os coeficientes de rugosidade e demais características dos modelos.

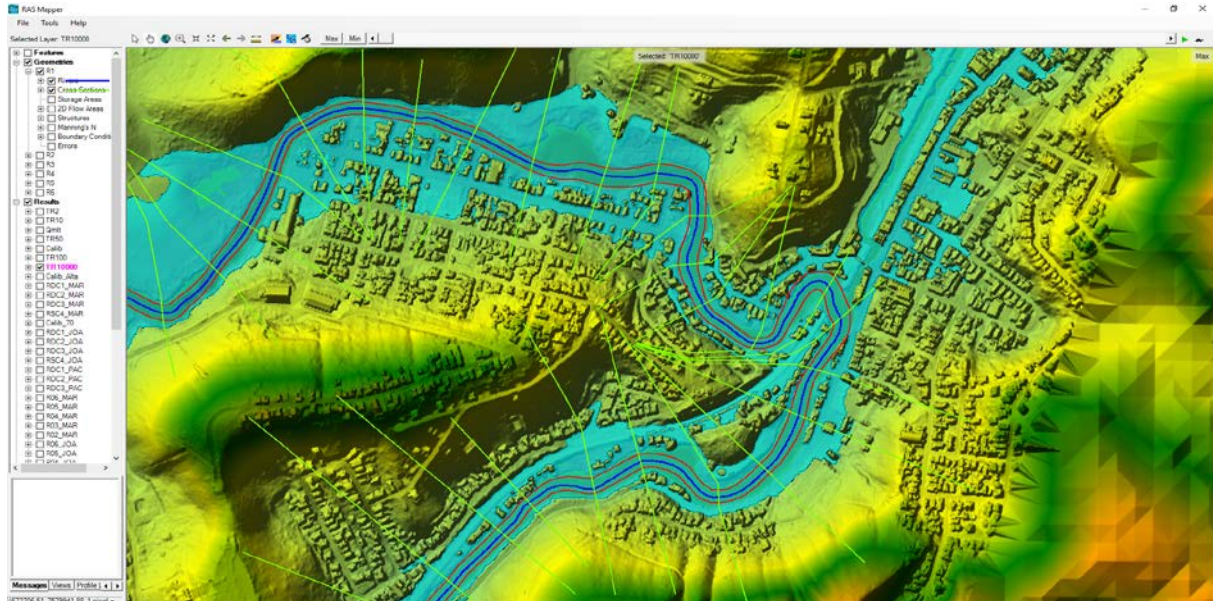


Figura 11. Ilustração do modelo digital de terreno (MDT) utilizado para a elaboração dos estudos.

Tabela 7. Métodos de calibração e características técnicas dos modelos conceituais das 15 barragens analisadas.

MODELO	MÉTODO PARA CALIBRAÇÃO		COEFICIENTE DE MANNING		NÚMERO DE SEÇÕES	EXTENSÃO DO MODELO
	PONTOS DE N.A	CHEIAS NATURAIS	CANAL	MARGENS		
B01	10	Sim - 2014	0,05	0,22	426	36 km
B02	-	-	0,05	0,09	183	12 km
B03	34	Sim - 2012	0,03	0,10	341	29 km
B04	34	Sim - 2012	0,03	0,10	341	29 km
B05	34	Sim - 2012	0,03	0,10	341	29 km
B06	-	Sim - 2012	0,25	0,25	395	30 km
B07	40	Sim - 2012	0,03	0,13	515	60 km
B08	35	Sim - 2012	0,03	0,10	630	115 km
B09	35	Sim - 2012	0,03	0,10	630	115 km
B10	08	-	0,03	0,25	556	18 km
B11	15	-	0,03	0,10	125	10 km
B12	32	Sim - 2012	0,05	0,10	263	51 km
B13	32	Sim - 2012	0,05	0,10	263	51 km
B14	08	-	0,03	0,12	666	30 km
B15	115	Sim - 2012	0,02	0,10	195	255 km

A Figura 12 ilustra o perfil longitudinal e os pontos de nível d'água utilizados para a calibração do modelo conceitual da barragem B01. A Figura 13 ilustra o trecho simulado em planta, plotado em conjunto com o modelo digital de terreno e as seções utilizadas na modelagem. Os demais modelos são apresentados no Apêndice A.

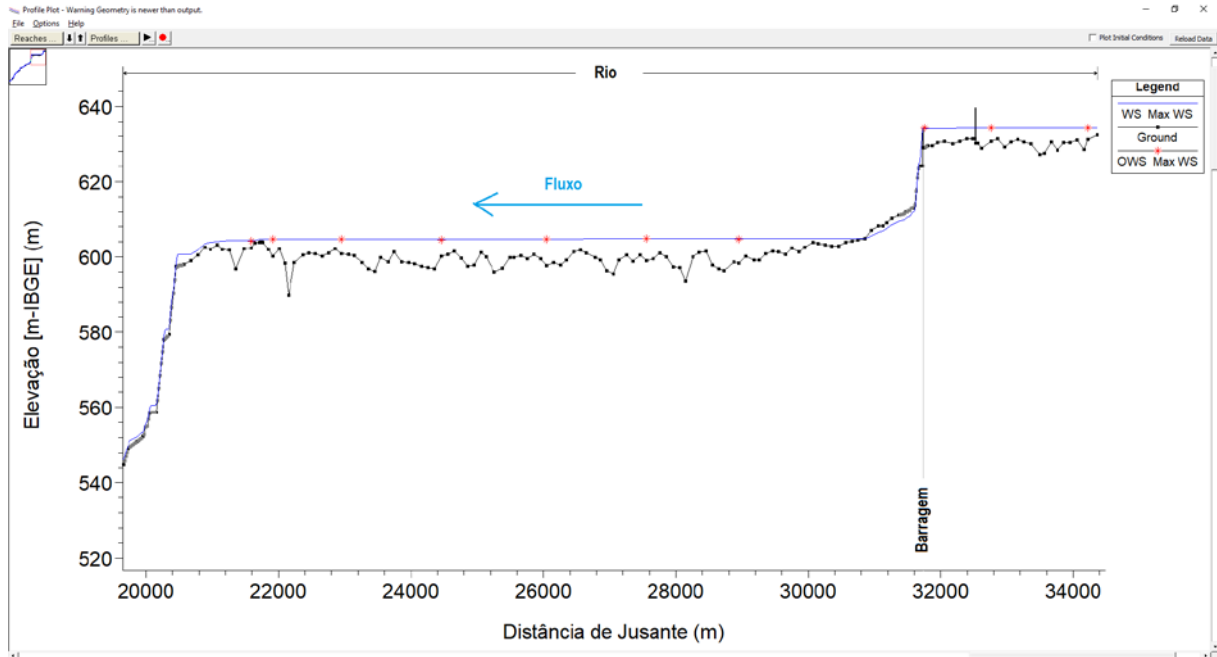


Figura 12. Perfil longitudinal do modelo conceitual utilizado nas análises da B01.

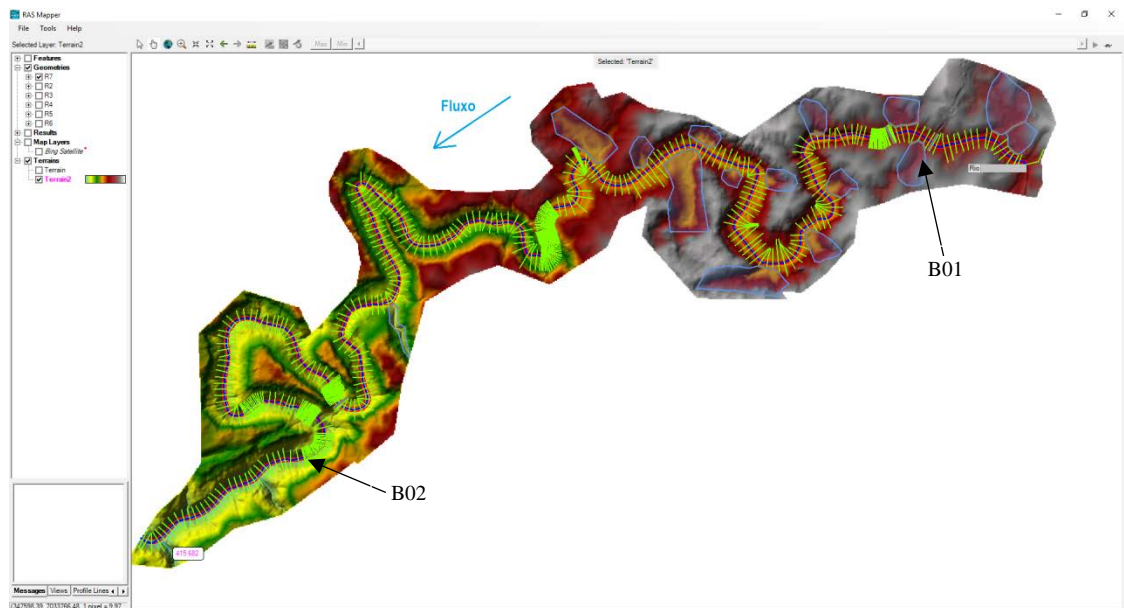


Figura 13. Modelo conceitual HEC-RAS das barragens B01 e B02.

4.3 Parâmetros de Ruptura

As brechas de ruptura foram definidas com base nos estudos de Análises de Potenciais Modos de Ruptura (APMR), do inglês *Potential Failure Mode Analysis* (PFMA). Esta análise, segundo FERC (2005), é um procedimento informal executado para levantamento das prováveis formas de ruptura de uma barragem.

A APMR é fundamentada em levantamento de informações diversas existentes a respeito da barragem. Tais dados podem ser compostos por histórico de operação hidráulica do

reservatório e do barramento, monitoramento geotécnico e estrutural, relatórios de inspeções regulares, plantas, croquis e memoriais de cálculo do projeto executivo, entre outros.

Com bases nas análises de APMR das barragens, foram definidas as brechas apresentadas na Tabela 8. Ressalta-se que foram adotados valores de brechas e tempos de formação conservadores, de modo a obter os cenários mais críticos de ruptura.

Tabela 8. Mecanismo de ruptura e parâmetros de abertura de brecha utilizados nos estudos.

SIGLA	MECANISMO DE RUPTURA	EQUAÇÃO UTILIZADA	B_M [m]	T_F [h]	INCLINAÇÃO LATERAL	C_d
B01	Colapso Estrutural	USBR, 1988	184,0	0,50	Vertical	1,60
B02	Colapso Estrutural	USBR, 1988	108,95	0,50	Vertical	1,60
B03	Colapso Estrutural	USBR, 1988	20,05	0,50	Vertical	1,60
B04	Colapso Estrutural	USBR, 1988	16,0	0,50	Vertical	1,60
B05	Colapso Estrutural	USBR, 1988	35,0	0,50	Vertical	1,60
B06	Colapso Estrutural	USBR, 1988	13,20	0,1	Vertical	1,44
B07	Colapso Estrutural	USBR, 1988	32,85	0,50	Vertical	1,70
B08	Colapso Estrutural	USBR, 1988	80,0	0,50	Vertical	1,60
B09	Colapso Estrutural	USBR, 1988	60,0	0,50	Vertical	1,60
B10	Colapso Estrutural	USBR, 1988	15,0	0,50	0,40	1,44
B11	Colapso Estrutural	USBR, 1988	56,0	0,10	Vertical	1,44
B12	Colapso Estrutural	USBR, 1988	170,0	0,75	Vertical	1,85
B13	<i>Piping</i>	USBR, 1988	75,0	1,0	8,0	1,60
B14	<i>Piping</i>	USBR, 1988	60,0	1,20	0,90	1,44
B15	<i>Piping</i>	USBR, 1988 ⁶	680,0	2,0	0,50	1,75

⁶ Nos casos de ruptura por piping, as equações de Von Thun & Gillette e Froehlich (2008), foram avaliadas e verificadas. No entanto, a equação de USBR (1988) apresentou valores mais conservadores.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

As análises hidráulicas das saídas dos modelos numéricos foram realizadas tomando-se como base os resultados em termos de vazão de pico, altura incremental, volume de hidrograma e área inundada para cada um dos cenários avaliados. Os subitens a seguir apresentam cada um dos parâmetros detalhadamente.

5.1 Hidrogramas de Saída

A principal avaliação do comportamento do escoamento nos estudos de ruptura hipotética de barragens faz referência aos hidrogramas efluentes. Todos os resultados apresentados nesta dissertação foram obtidos através da propagação destes hidrogramas ao longo dos trechos de jusante.

Neste contexto, seguem apresentados, na Figura 14 a Figura 16, todos os hidrogramas obtidos nos 90 cenários simulados, tanto para a seção do barramento (DAM), quanto para a seção de delimitação da ZAS (10 km).

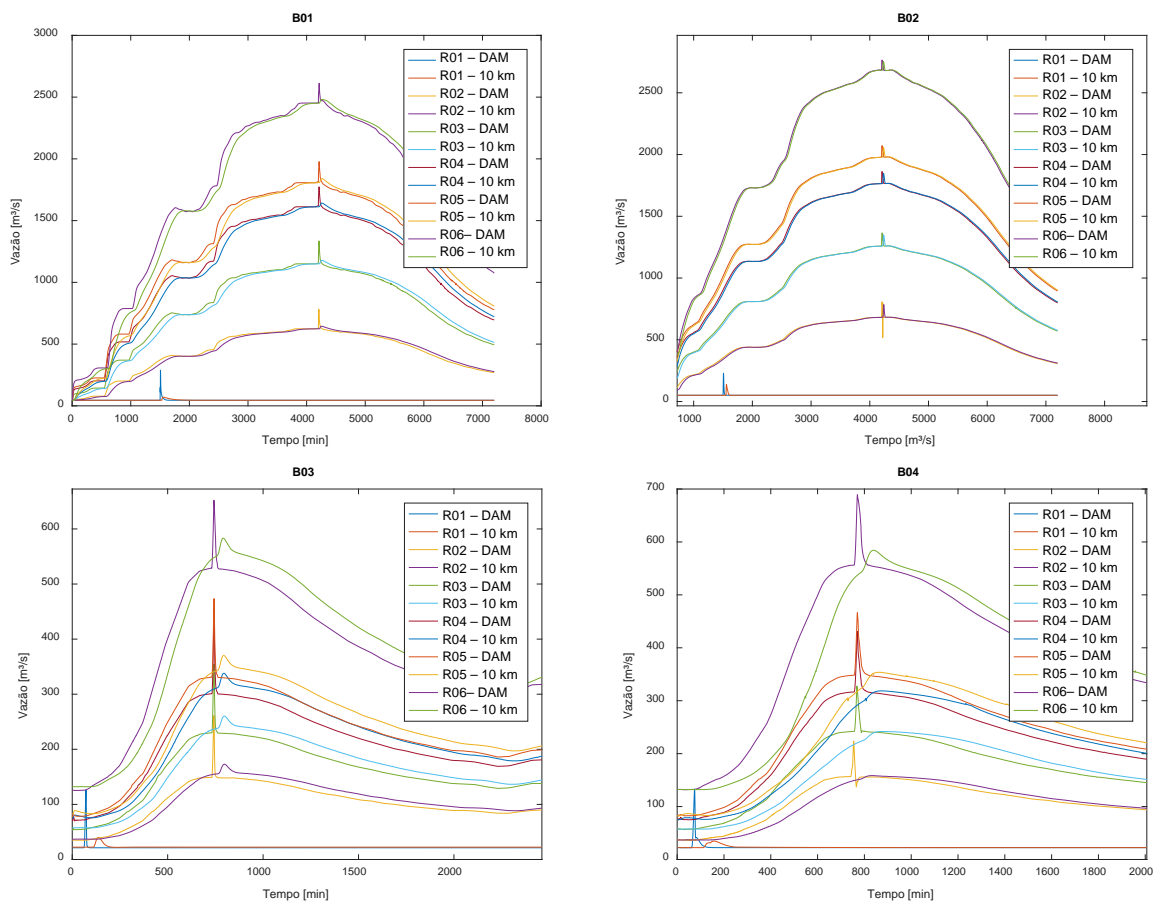


Figura 14. Hidrogramas de ruptura para as barragens: B01, B02, B03 e B04.

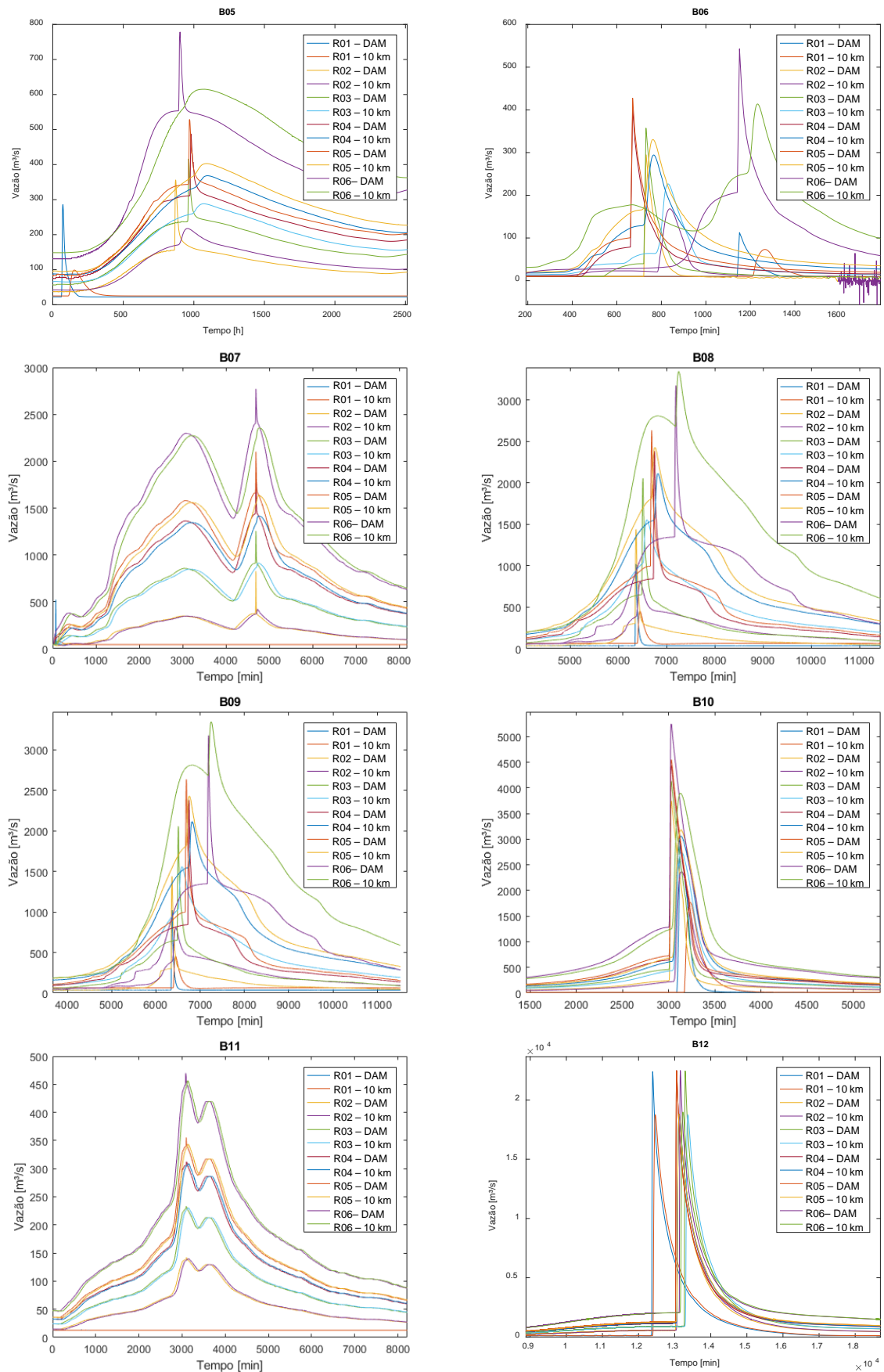


Figura 15. Hidrogramas de ruptura para as barragens B05 a B12.

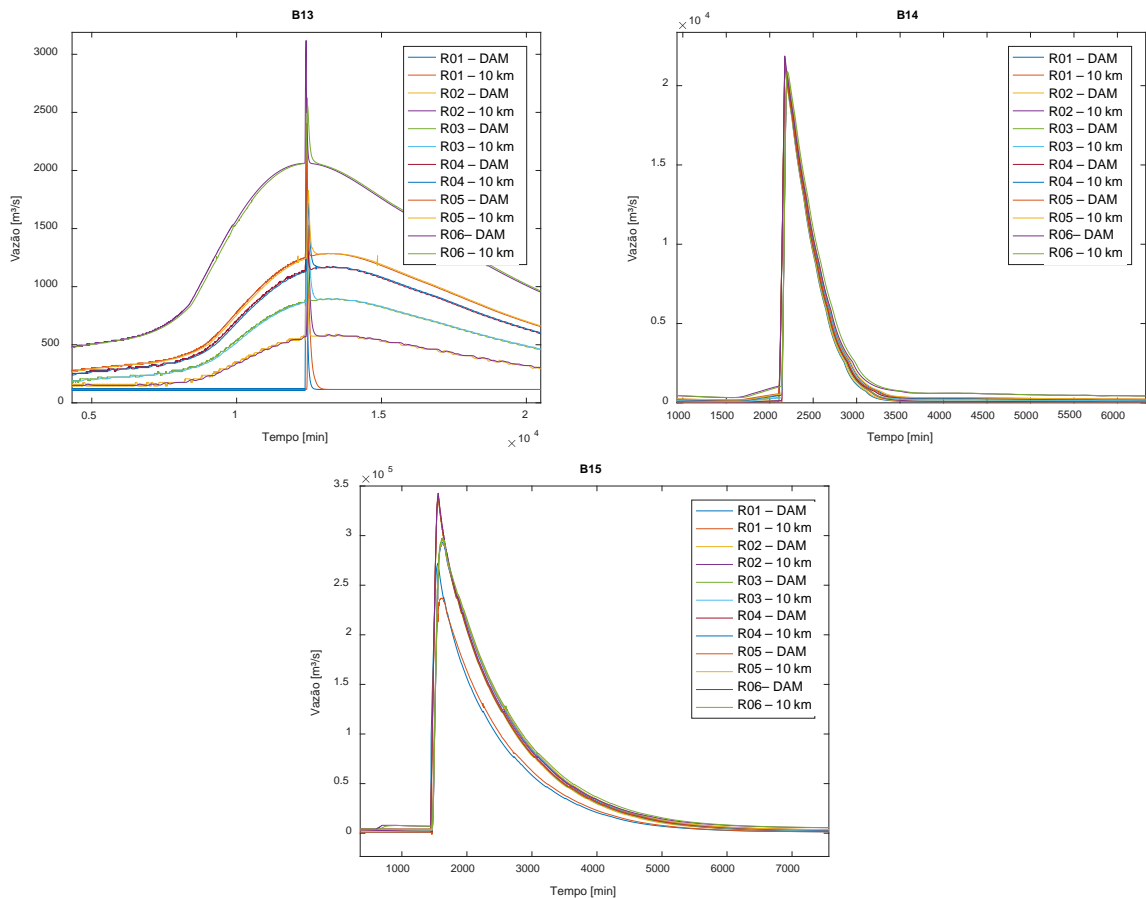


Figura 16. Hidrogramas de ruptura para as barragens B13, B14 e B15.

O comportamento geral dos hidrogramas efluentes após a ruptura das barragens varia de acordo com as características dos hidrogramas de entrada dos modelos. No entanto, foi observado um padrão de acréscimo de volume para pequenas e para grandes barragens.

As barragens classificadas como pequenas adicionam “pulsos” aos hidrogramas de saída, não alterando seu formato natural, acarretando, apenas, em um pequeno acréscimo de volume na região do pico. No geral, esses picos são abatidos dentro da região da ZAS, não se propagando até a seção de delimitação da zona citada, uma vez que não foram observados acréscimos nos hidrogramas da seção de 10 km.

Os hidrogramas para o cenário R01, nestas barragens, indicaram que a ruptura em *Sunny Day* não supera as vazões de cheia natural. Nas barragens B01, B02, B03 e B04, por exemplo, o pico do hidrograma para o cenário R01 é inferior a uma cheia de 2 anos de recorrência. Sendo assim, apesar de ocasionar variações abruptas no regime de escoamento fluvial do trecho de jusante das barragens, a ruptura de pequenas barragens em *Sunny Day* não deve gerar inundações superiores às cheias naturais recorrentes na região.

Grandes e médios empreendimentos, por sua vez, apresentaram alterações mais perceptíveis no comportamento dos hidrogramas. Foram adicionados picos bem definidos na região de maior vazão. Em alguns casos o comportamento do hidrograma natural nem pôde ser observado, dada à proporção do volume adicional decorrente da ruptura da barragem (B12, B14 e B15).

Com isso, pode-se concluir que, para os casos de rupturas de empreendimentos de pequeno porte, o comportamento do hidrograma de saída é associado ao comportamento da cheia natural utilizado como condição de contorno. Já para grandes e médios empreendimentos, o comportamento do hidrograma é associado à ruptura da barragem em si, não tendo correlação com a cheia natural dos cenários.

5.2 Vazão de Pico

Em relação aos resultados de vazão de pico, tanto para as seções do barramento, quanto para as seções de delimitação da ZAS, foram observadas tendências de aumento da vazão conforme o aumento da vazão de cheia natural utilizada como condição de contorno. Os resultados individuais podem ser observados no Apêndice B.

Os resultados de vazão de pico, tanto para a seção do barramento quanto para a seção de delimitação da ZAS seguem apresentados numericamente nas Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9. Resultados de vazão de pico para a seção da barragem.

MODELO	VAZÃO DE PICO – BARRAGEM [m ³ /s]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	289	782	1335	1773	1978	2612
B02	229	808	1365	1863	2073	2765
B03	126	261	355	437	474	652
B04	133	224	328	431	466	689
B05	286	356	416	488	529	778
B06	113	295	357	404	427	543
B07	522	826	1255	1867	2101	2772
B08	12519	12556	12891	13669	13861	15353
B09	1022	1440	2055	2384	2635	3344
B10	2930	3746	4131	4436	4548	5248
B11	14	142	233	313	355	470
B12	22396	22428	22456	22479	22488	22489
B13	1646	1899	2125	2319	2405	3119
B14	21203	21269	21386	21495	21552	21872
B15	272.221	339.802	339.802	339.802	342.634	342.634

Tabela 10. Resultados de vazão de pico para a seção de delimitação da ZAS (10 km).

MODELO	VAZÃO DE PICO – 10 km [m ³ /s]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	70	645	1178	1642	1839	2481
B02	138	785	1349	1848	2059	2754
B03	40	173	260	338	370	583
B04	35	159	242	319	354	584
B05	99	218	288	368	403	615
B06	73	168	227	294	330	414
B07	82	420	913	1416	1634	2354
B08	7616	7653	7934	8337	8479	9522
B09	454	803	1557	2112	2426	3175
B10	1766	2370	2750	3061	3183	3898
B11	13	140	230	309	343	457
B12	18759	18695	18751	18805	18827	18979
B13	1000	1308	1528	1716	1827	2560
B14	20208	20280	20399	20507	20563	20879
B15	236.935	292.689	293.722	294.682	295.063	297.594

Os valores apresentados nas tabelas foram adimensionalizados pela vazão de pico média de cada barragem e plotados em diagramas de caixas, de forma a ilustrar a variabilidade do parâmetro “vazão de pico” em função dos cenários. A Figura 17 e a Figura 18 apresentam os resultados obtidos para a seção da barragem e de delimitação da ZAS, respectivamente.

De acordo com o ilustrado, a vazão de pico na seção do barramento apresenta menor variabilidade do que os resultados obtidos para a seção de delimitação da ZAS. Esse efeito é mais evidente em pequenas barragens, em que o amortecimento da cheia de ruptura é completo na região da ZAS e a vazão que atinge a seção de delimitação faz referência somente à cheia natural utilizada como condição de contorno dos cenários.

Para empreendimentos de médio e grande porte esse efeito não é tão evidenciado, uma vez que a vazão de pico apresenta maior influência das características técnicas do barramento (volume acumulado e altura máxima), e que não há abatimento relevante no vale de jusante, dada a elevada vazão e volume propagado. Para essas barragens, a adoção de mais de um cenário de ruptura não apresenta um ganho significativo em termos de resultados, não havendo, para os mesmos parâmetros de brecha, cenário menos crítico de ruptura.

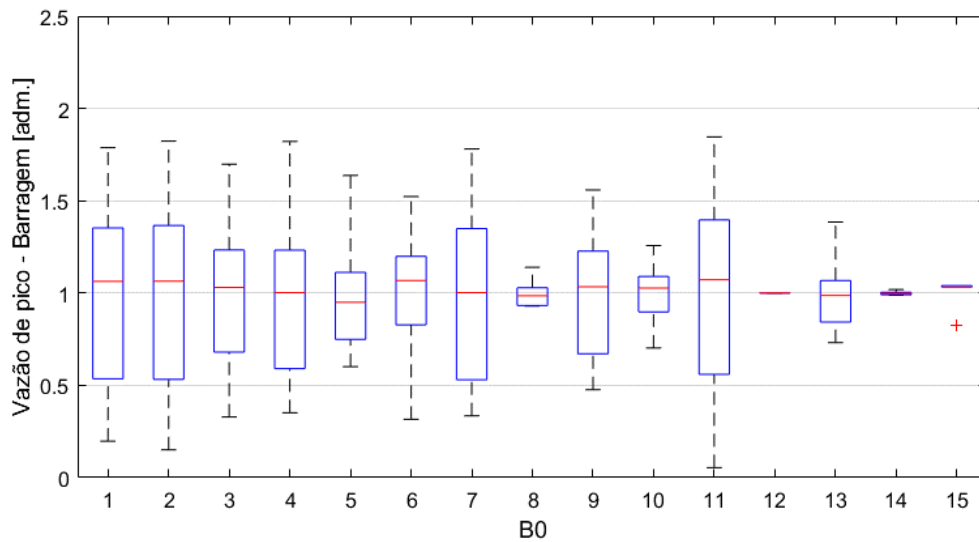


Figura 17. Variabilidade dos resultados de vazão de pico na seção do barramento para os 90 cenários avaliados.

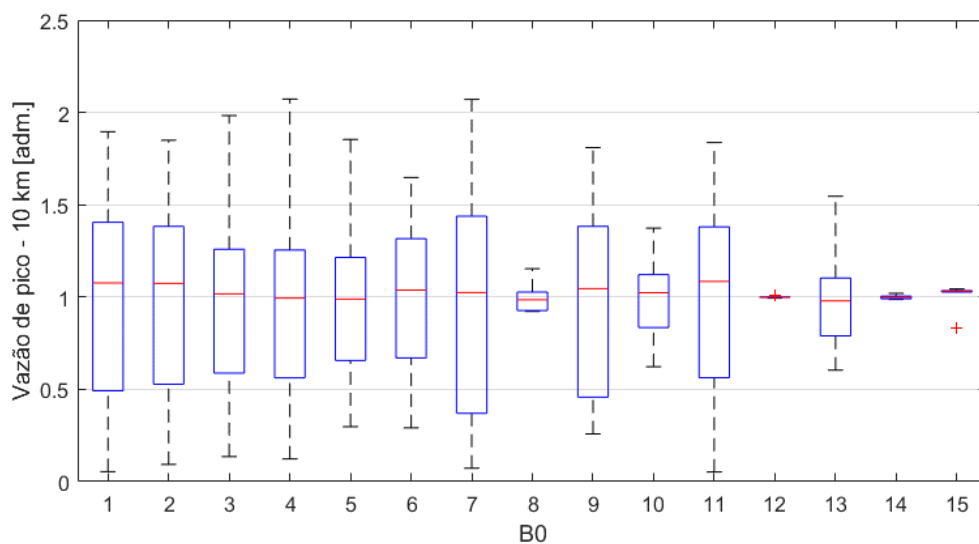


Figura 18. Variabilidade dos resultados de vazão de pico na seção de delimitação da ZAS para os 90 cenários avaliados.

5.3 Altura Incremental

Os resultados de altura incremental foram analisados para as seções do barramento e de delimitação da ZAS, para os 90 cenários simulados, conforme apresentado na Tabela 11 e na Tabela 12.

Para as barragens de pequeno porte (B01, B02, B03, B04, B05, B07 e B11) a altura incremental máxima foi da ordem de 2,10 m na seção do barramento e de 1,30 m na seção de delimitação da ZAS (B07 e B05 – Cenário R01). O cenário R01 foi o que apresentou as maiores alturas incrementais. Este resultado já era esperado, uma vez que este faz referência à diferença

ente a ruptura em *Sunny Day* e o nível normal no curso d'água. Todos os demais cenários apresentaram altura incremental próxima ou inferior a 0,60 m, o que indica baixa influência da ruptura da barragem na inundação, conforme critério da FEMA (2013) apresentado no capítulo 3.3.

Para grandes e médias barragens, foram apresentados incrementos superiores a 0,60 m para todos os cenários. Nestes casos, a inundação está associada à ruptura da barragem e não à cheia natural que ocasionou a mesma.

Tabela 11. Resultados de altura incremental para a seção da barragem.

MODELO	ALTURA INCREMENTAL [m]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
B02	1,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
B03	1,5	1,1	1,0	0,8	0,8	0,7
B04	1,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
B05	1,7	0,9	0,7	0,7	0,7	0,6
B06	0,9	1,4	1,4	1,1	1,0	1,2
B07	2,1	1,7	1,0	0,9	0,8	0,6
B08	15,8	15,8	16,1	16,4	16,5	17,4
B09	3,5	2,1	2,0	2,0	2,0	2,1
B10	22,1	18,1	16,5	15,5	15,1	13,1
B11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
B12	22,9	20,1	18,8	17,9	17,6	15,8
B13	8,0	4,6	3,3	2,5	2,1	1,5
B14	29,9	27,3	25,7	24,4	24,1	22,6
B15	36,4	39,1	37,7	37,4	37,2	35,3

Tabela 12. Resultados de altura incremental para a seção de delimitação da ZAS (10 km).

MODELO	ALTURA INCREMENTAL [m]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
B02	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
B03	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
B04	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
B05	1,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
B06	1,9	2,2	2,0	1,5	1,4	2,0
B07	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
B08	11,7	11,7	12,1	12,5	12,6	13,4
B09	2,8	1,5	1,0	0,9	0,9	0,6
B10	11,3	8,2	7,1	6,7	6,5	5,7
B11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B12	19,3	19,0	17,8	16,9	16,5	14,8
B13	4,3	2,4	1,5	1,2	1,0	0,6
B14	21,3	19,9	18,5	17,6	17,2	15,6
B15	37,3	39,0	37,4	37,0	37,0	34,7

As Figura 19 e Figura 20 a seguir ilustram o comportamento das alturas incrementais para os 90 cenários simulados para as duas seções de interesse.

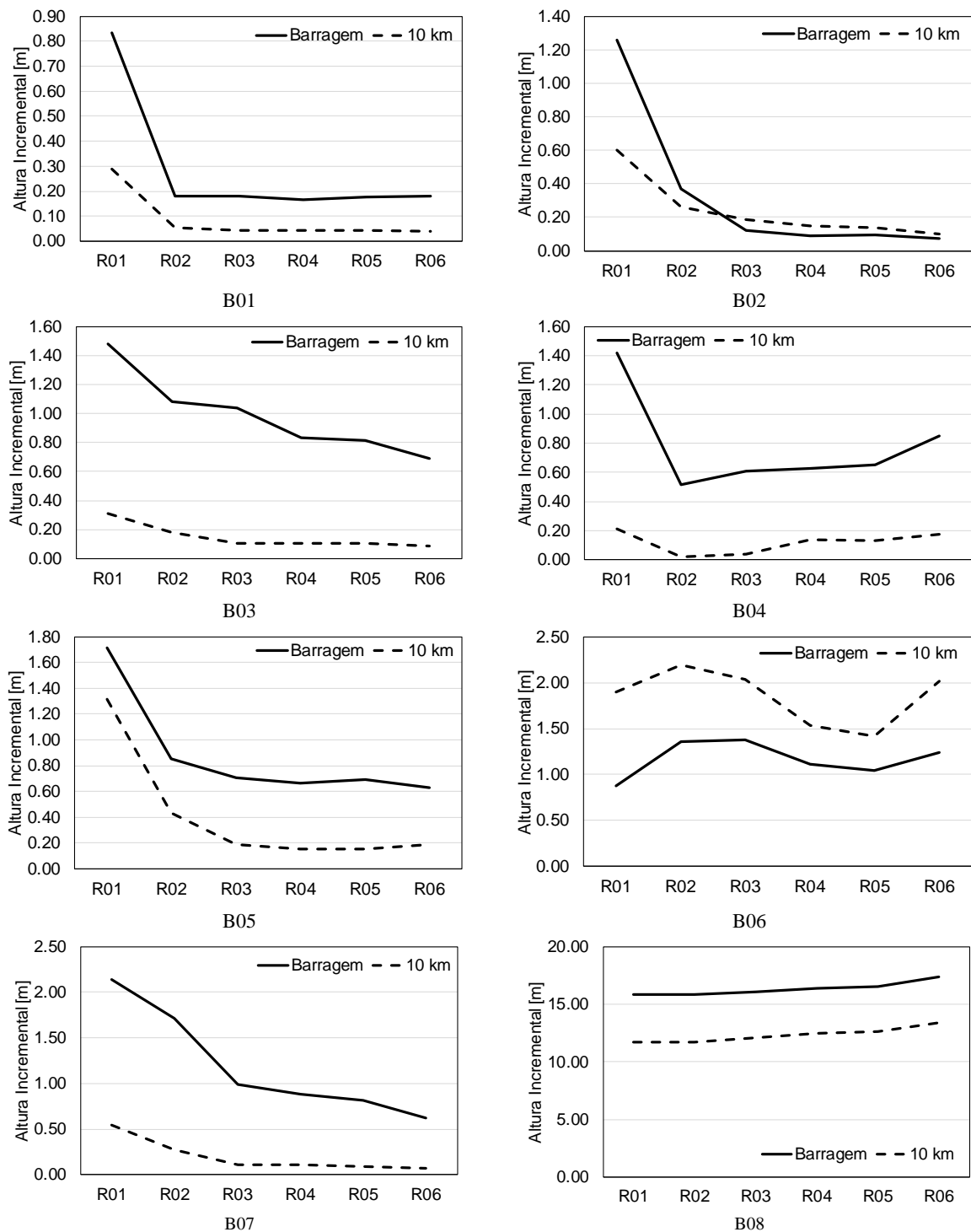


Figura 19. Resultados de altura incremental para as seções da barragem e de delimitação da ZAS para as barragens: B01 a B08.

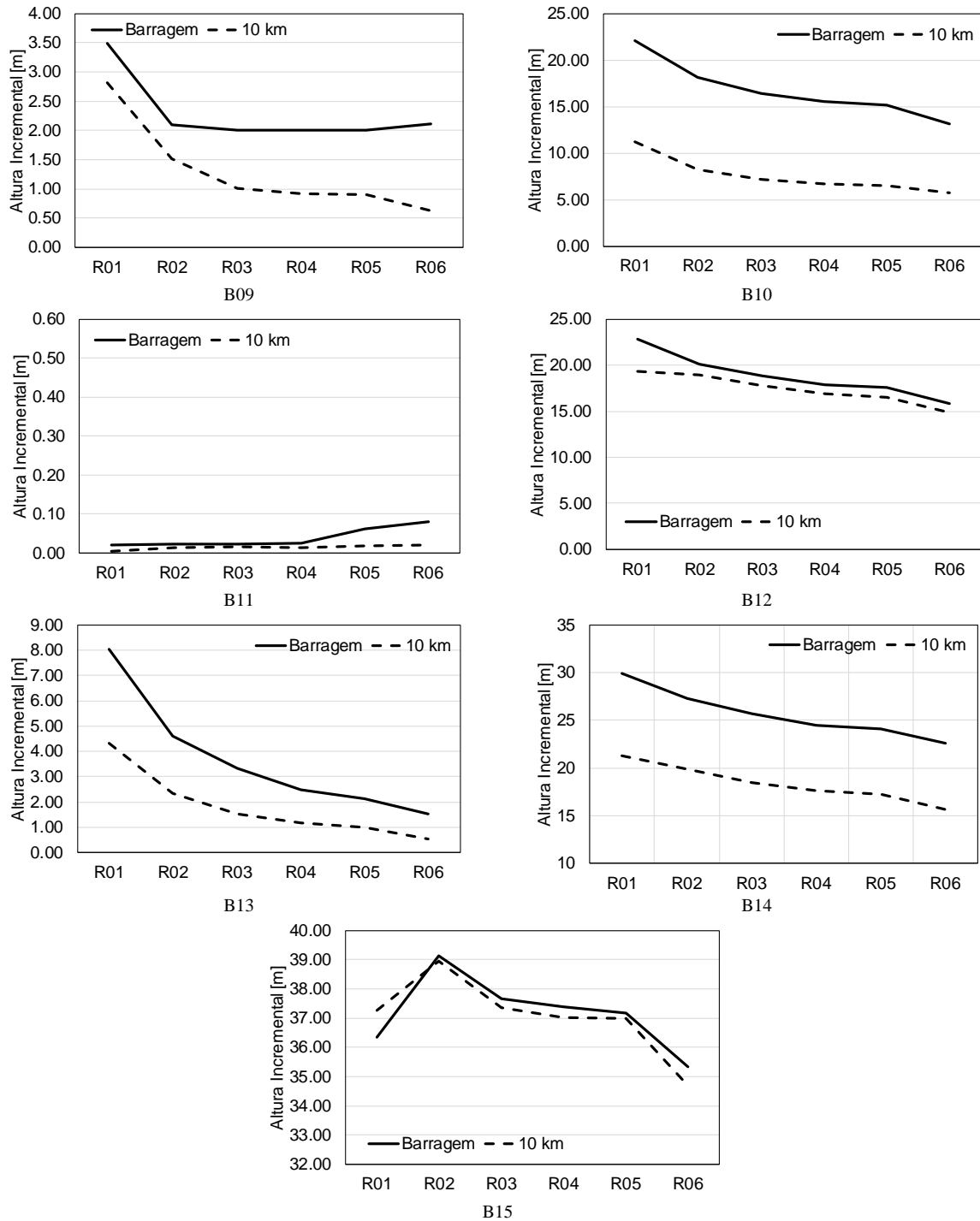


Figura 20. Resultados de altura incremental para as seções da barragem e de delimitação da ZAS para as barragens: B09 a B15.

Conforme o apresentado há uma tendência de diminuição da altura incremental com o aumento da vazão da cheia natural. Esse comportamento era esperado, uma vez que quanto maior a relação $V_{\text{CHEIA NATURAL}}/V_{\text{RESERVATÓRIO}}$ menor é a influência da ruptura da barragem, portanto menor a altura incremental apresentada.

Algumas barragens destoam desse comportamento em razão das características específicas do vale de jusante ou da situação do reservatório do momento da ruptura. É o caso da B15, por exemplo, onde a diferença de comportamento se dá pela condição do reservatório no momento da ruptura. Esta é uma barragem com grande volume de espera, variando o nível do reservatório em 3,50 m da condição normal de operação para condição de carregamento excepcional. Desta forma, dado à grande área do reservatório, a ruptura *Sunny Day* apresenta volume de reservação inferior às demais rupturas, gerando, assim, diferenças entre os resultados.

Já a B11 apresenta um comportamento anômalo, com elevação da altura incremental com o aumento da cheia natural. No entanto, os resultados indicam variações da altura incremental de, aproximadamente, 0,02 m, valores incompatíveis com a precisão do modelo HEC-RAS. Desta forma, pode-se entender o gráfico como constante, com altura incremental máxima de 0,10 cm – indicando a nulidade do efeito de ruptura nesta barragem.

A Figura 21 ilustra a variabilidade dos parâmetros de altura incremental adimensionalizados pela média dos cenários na seção de delimitação da ZAS.

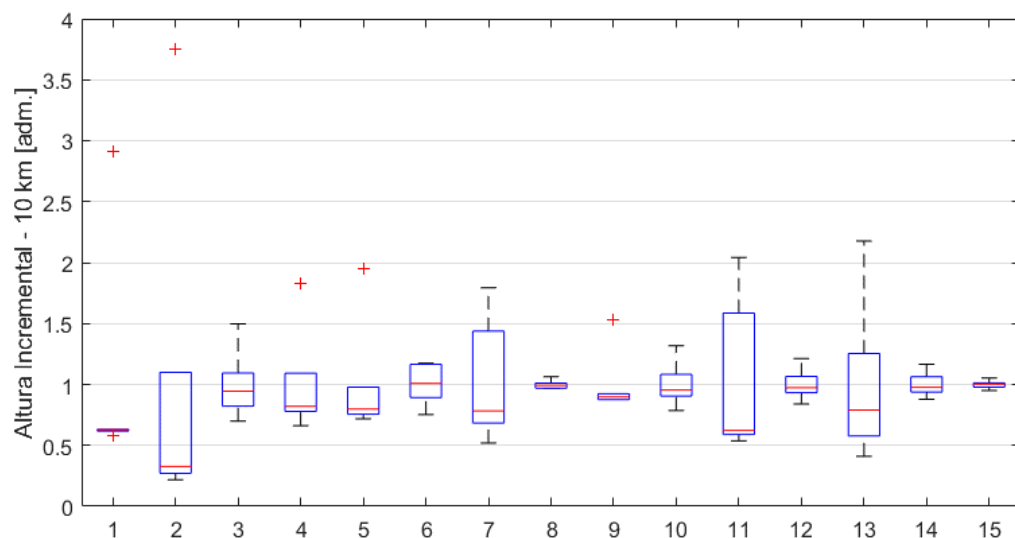


Figura 21. Variabilidade dos resultados de altura incremental na seção de delimitação da ZAS para os 90 cenários avaliados.

De acordo com o ilustrado, o parâmetro de altura incremental não possui comportamento bem definido em função do porte dos empreendimentos. Barragens classificadas como de pequeno porte (B01, B02, B03, B04, B05, B07 e B11) apresentaram variações tanto grandes quanto muito pequenas. O mesmo comportamento foi observado para empreendimentos de grande porte.

Com isso, pôde-se concluir que este parâmetro está mais correlacionado à configuração do vale de jusante e às condições de escoamento do que às características técnicas dos empreendimentos.

Regiões com topografia mais plana, compostas por planícies de inundação tendem a abater os picos dos hidrogramas, reduzindo a altura incremental esperada. Já vales mais encaixados e sistemas de drenagem em fraco processo de entalhamento apresentam menor amortecimento da onda de cheia, induzindo a alturas incrementais maiores.

Ainda, canais com altas declividades condicionam o escoamento a elevadas velocidades e regime supercrítico de escoamento, com lâminas d'água baixas. A superação de controles hidráulicos a partir de determinadas vazões também pode provocar alterações no comportamento em relação à altura incremental.

5.4 Volume Efluente

O comportamento do volume efluente para os 90 cenários de ruptura simulados será analisado somente em relação à variabilidade do parâmetro, uma vez que o comportamento em relação aos cenários é o mesmo para todas as barragens (crescimento do V em função do aumento da cheia natural - Figura 22). A Tabela 13 apresenta os resultados de volume efluente obtidos para as 15 barragens e a Figura 23 ilustra a variabilidade do parâmetro adimensionalizados pela média dos cenários.

Tabela 13. Resultados de altura incremental para a seção da barragem.

MODELO	VOLUME EFLUENTE [hm ³]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	19,8	186,1	342,8	480,3	538,5	727,4
B02	22,0	200,9	370,4	518,7	581,5	786,0
B03	8,3	28,1	43,3	56,7	62,3	99,6
B04	8,8	29,6	45,6	59,7	65,6	104,8
B05	9,2	30,0	46,0	60,0	66,0	105,1
B06	1,8	2,0	2,9	4,7	5,7	10,7
B07	28,6	105,7	260,0	414,3	480,5	701,3
B08	193,8	225,5	292,5	354,2	380,5	433,4
B09	28,0	59,3	135,5	207,2	238,0	312,6
B10	29,2	70,6	111,2	146,9	162,0	261,3
B11	8,8	31,8	52,3	70,2	77,8	102,9
B12	929,9	1221,3	1451,5	1657,5	1745,8	2333,8
B13	202,2	491,9	732,5	947,6	1039,4	1664,0
B14	494,7	506,1	547,1	585,9	605,8	721,2
B15	16335,3	21259,8	21652,0	22011,6	22164,9	23192,8

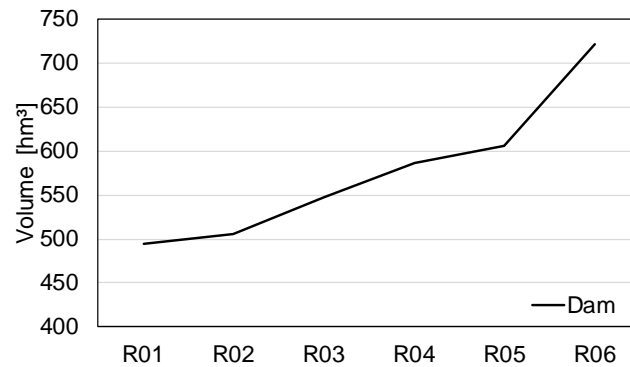


Figura 22. Comportamento padrão do volume efluente em função dos cenários avaliados.

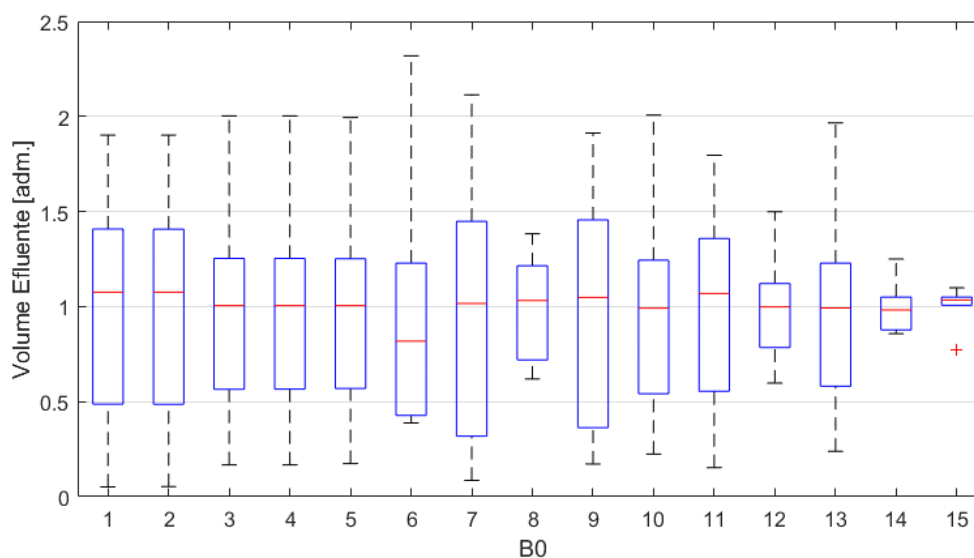


Figura 23. Variabilidade dos resultados de volume efluente na seção do barramento para os 90 cenários avaliados.

De acordo com o ilustrado, reservatórios de pequeno porte, em que a relação $V_{CHEIA NATURAL}/V_{RESERVATÓRIO}$ é maior, apresentam grande variação de volume propagado. Essa variação ocorre devido à maior influência das cheias naturais nos eventos simulados, já que nestes casos, a ruptura acrescenta “pulsos” nos hidrogramas, e não picos bem definidos de volume, como ocorrem em grandes barragens (Figura 24).

Para os empreendimentos de porte intermediário (B06, B09 e B13) a variabilidade do volume efluente ficou mais próxima ao comportamento apresentado por pequenas barragens. Indicando que nestes casos, assim como nos pequenos empreendimentos, as condições do cenário avaliado influenciam nos resultados.

Já para as barragens enquadradas como grande porte, os resultados indicaram uma variabilidade pequena entre os cenários de ruptura. Neste caso, os resultados estão associados

às características técnicas da barragem (H e V) e não ao cenário analisado. Para essas barragens, como já citado anteriormente, a adoção de mais de um cenário de ruptura não apresenta um ganho significativo em termos de resultados, não havendo cenário menos crítico de ruptura – para os mesmos parâmetros de formação de brecha.

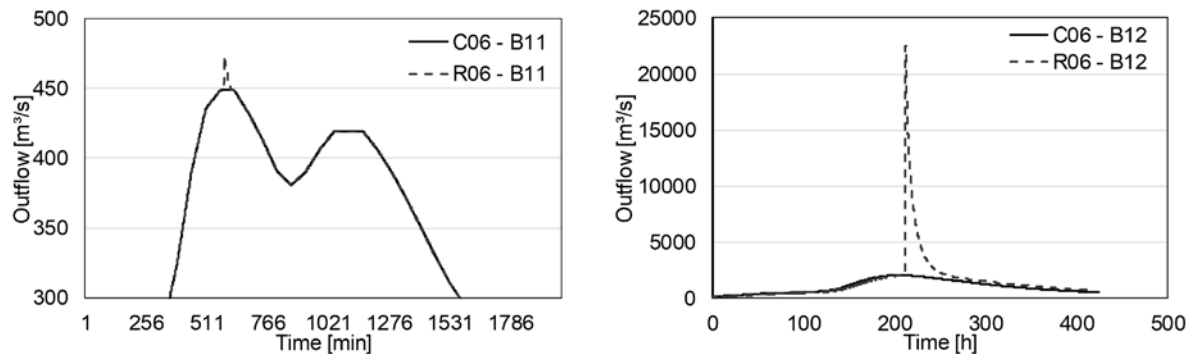


Figura 24. Comparação dos hidrogramas para os cenários naturais (C0) e de ruptura (R0) para as barragens de pequeno porte B11 e de grande porte B12.

5.5 Área Inundada

As áreas de inundação obtidas nas simulações de ruptura hipotética desta dissertação foram comparadas às áreas inundadas pelas cheias naturais utilizadas como condição de contorno dos modelos (ex: Área R01 – Área C01 = Área incremental). A Tabela 14 apresenta as áreas incrementais para os 90 cenários simulados.

Tabela 14. Resultados de área de inundação incremental para a região da ZAS.

MODELO	ÁREA INCREMENTAL [km ²]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	0,059	0,065	0,035	0,025	0,025	0,013
B02	0,032	0,026	0,016	0,008	0,007	0,004
B03	0,622	0,649	0,639	0,642	0,646	0,690
B04	0,626	0,597	0,616	0,631	0,642	0,693
B05	0,703	0,767	0,726	0,672	0,675	0,689
B06	0,043	0,616	0,407	0,266	0,219	0,159
B07	0,125	0,157	0,128	0,036	0,024	0,415
B08	5,965	4,867	3,302	2,993	2,736	2,761
B09	0,652	0,763	0,361	0,293	0,274	0,188
B10	1,468	1,066	0,892	0,831	0,804	0,690
B11	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,011
B12	4,137	3,878	3,670	3,495	3,427	3,055
B13	0,638	0,677	0,657	0,534	0,451	0,280
B14	1,208	1,137	1,067	1,016	0,992	0,908
B15	29,521	31,356	31,411	31,321	29,532	25,768

Ressalta-se que estas áreas fazem referência à inundação delimitada pela Zona de Autossalvamento (ZAS). As manchas dos modelos que se estendem para além da ZAS foram cortadas na seção de delimitação para a obtenção das áreas apresentadas. Sendo assim, todas as áreas incrementais consideram um trecho com 10 km de extensão a partir da seção da barragem.

De acordo com o apresentado, as rupturas das barragens de pequeno porte não ocasionaram inundações incrementais significativas, principalmente para trechos caracterizados por sistemas de drenagem classificados como planícies amplas ou restritivas, como é o caso das barragens B01, B02, B07 e B11.

O comportamento geral em relação às áreas inundadas é o da diminuição da área incremental com o aumento da vazão de cheia natural, assim como ocorre com a altura incremental (Figura 25 e Figura 26). No entanto, algumas barragens apresentaram o cenário R01 como menos crítico em relação à área incremental (B01, B03 B05, B06 e B07). Resultado contra intuitivo, uma vez que este cenário foi o que apresentou a maior altura incremental. Isso ocorre em virtude da não superação da calha do rio para este cenário, dada à baixa vazão de pico decorrente da ruptura em *Sunny Day*. Em resumo, a ruptura da barragem ocasiona uma mudança abrupta no regime de vazões e de velocidades, mas a sobrelevação do nível d'água é insuficiente para que haja o transbordamento da calha.

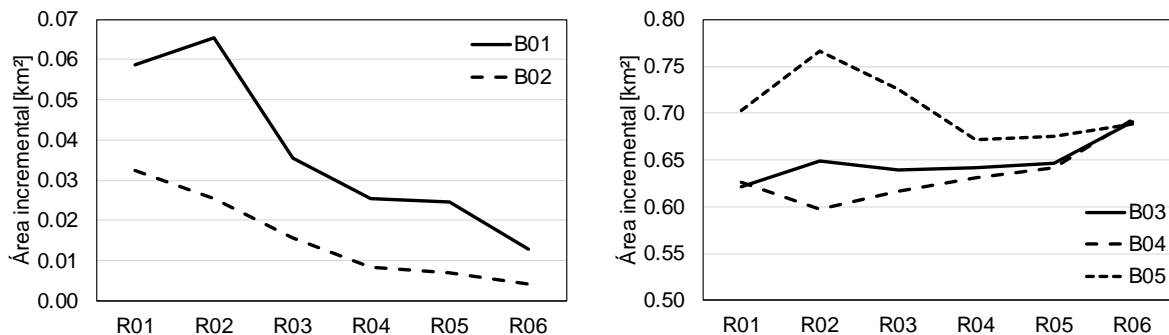


Figura 25. Comparação das áreas de inundação incrementais para as barragens B01 a B05.

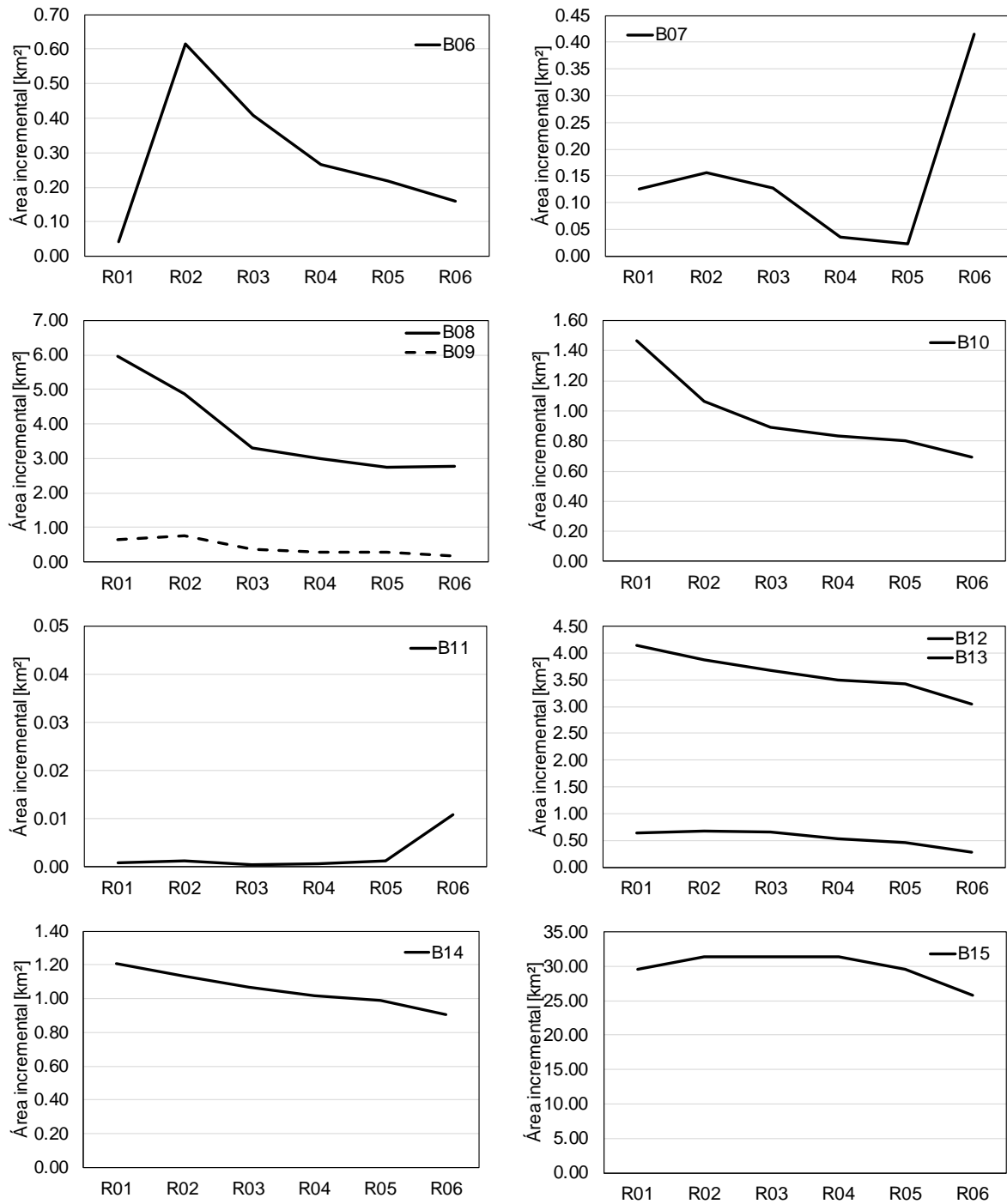


Figura 26. Comparação das áreas de inundação incrementais para as barragens B06 a B15.

A Figura 27 apresenta a inundação incremental para o cenário R01 em uma barragem de pequeno porte e a Figura 28 ilustra a inundação para uma das barragens de grande porte. Os mapas evidenciam a diferença em termos de inundação incremental para grandes e para pequenas barragens.

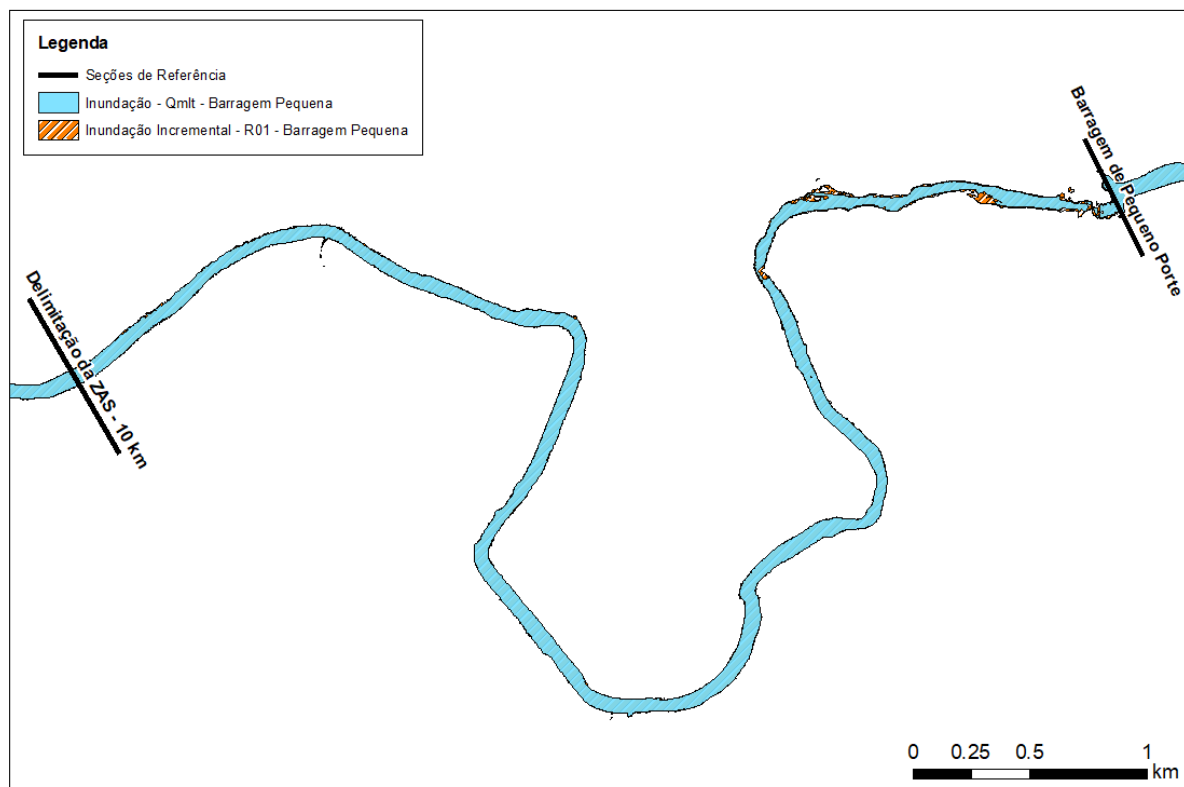


Figura 27. Área de inundação incremental para o cenário R01 para barragem classificada como de pequeno porte.

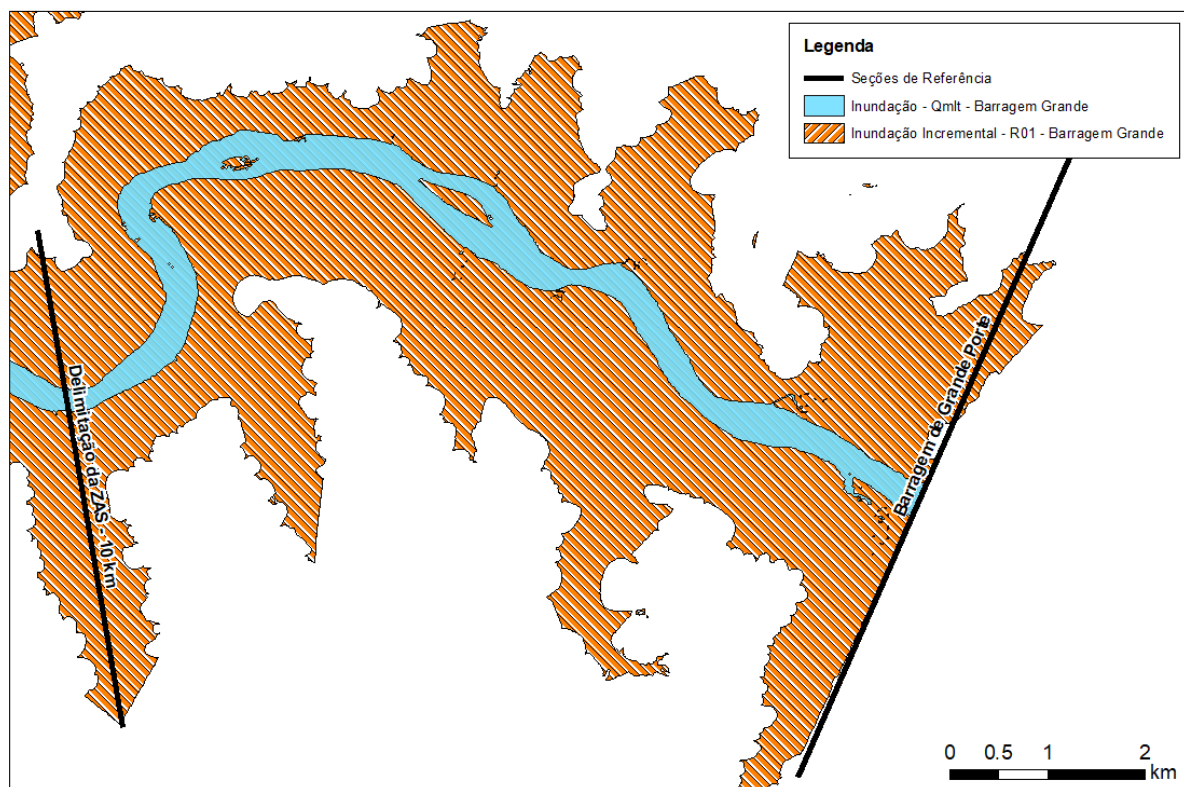


Figura 28. Área de inundação incremental para o cenário R01 para barragem classificada como de grande porte.

5.5.1 Comparação com Cheia Natural de Referência

Os valores de área inundada para cada cenário de ruptura foram comparados à inundação decorrente da cheia natural de referência para o projeto das barragens (TR 1.000 ou TR 10.000 anos – C06). A Tabela 15 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 15. Resultados de área de inundação incremental em relação à cheia de projeto da barragem para a região da ZAS.

MODELO	ÁREA INCREMENTAL (C06) [km ²]					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
B01	-4,04	-2,52	-1,38	-0,79	-0,57	0,01
B02	-4,07	-2,56	-1,40	-0,81	-0,59	0,00
B03	-1,91	-1,29	-0,64	-0,18	-0,05	0,69
B04	-1,90	-1,34	-0,66	-0,19	-0,05	0,69
B05	-1,83	-1,17	-0,55	-0,15	-0,02	0,69
B06	-0,21	0,15	0,04	0,07	0,09	0,16
B07	-12,46	-10,83	-5,21	-2,55	-1,78	0,42
B08	2,26	2,27	2,36	2,46	2,50	2,76
B09	-1,75	-1,13	-0,52	-0,26	-0,13	0,19
B10	0,18	0,36	0,45	0,53	0,55	0,69
B11	-0,39	-0,28	-0,21	-0,14	-0,10	0,01
B12	3,02	3,02	3,03	3,04	3,04	3,05
B13	-0,90	-0,58	-0,36	-0,19	-0,12	0,28
B14	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,91
B15	23,11	25,58	25,61	25,65	25,68	25,77

Com base nos resultados, pode-se concluir que todas as barragens classificadas como de pequeno porte apresentaram inundações decorrentes da ruptura da barragem inferiores às inundações de cheia natural (Figura 29). Isso corrobora com a hipótese da não existência de dano potencial associado a estes empreendimentos.

O mesmo não se verifica para barragens de médio e grande porte, que apresentaram inundações superiores à cheia natural, inclusive para o cenário R01, referente à ruptura em *Sunny Day*.

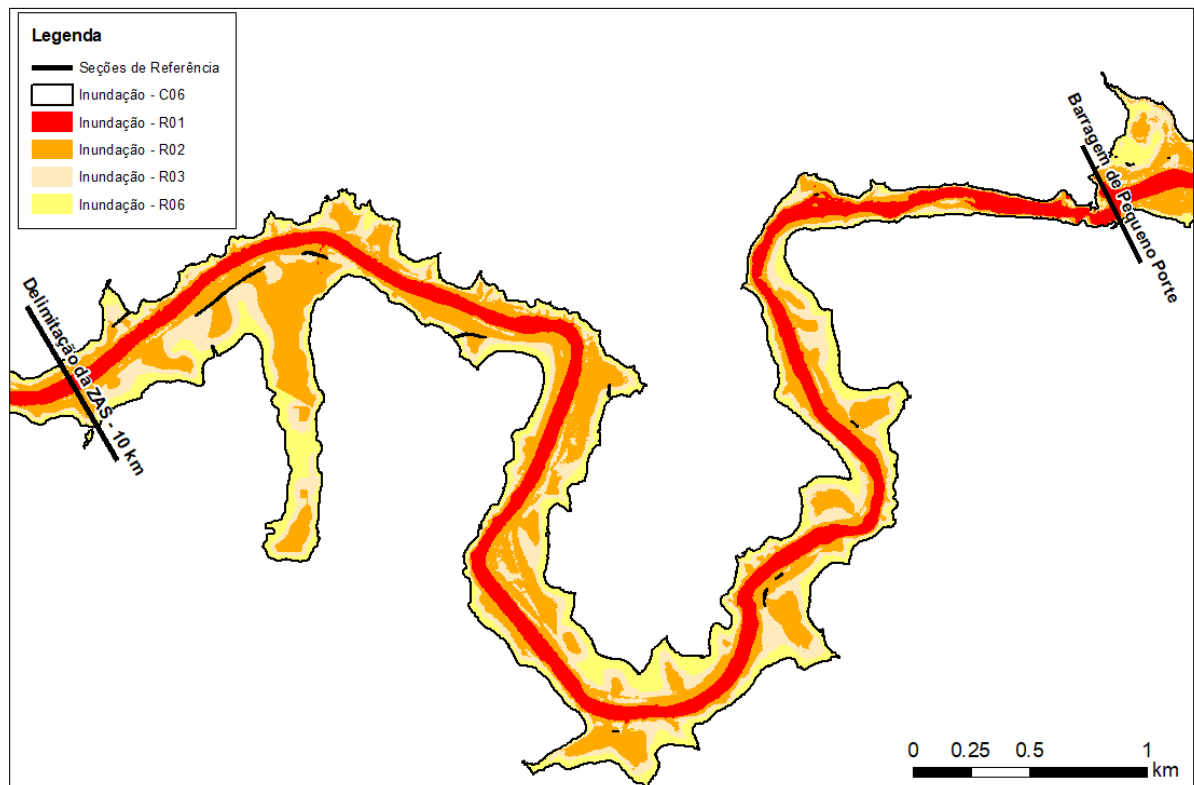


Figura 29. Área de inundação para os cenários C06, R01, R02 e R06 para barragem classificada como de pequeno porte.

5.6 Discussões e Correlações

Conforme exposto nos itens anteriores, o comportamento dos resultados em termos de vazão de pico, volume efluente, altura incremental e área de inundação incremental variam de acordo com o porte do empreendimento e com a geomorfologia do vale de jusante.

Para pequenas barragens foi observado que os resultados apresentam maior relação com as condições de contorno da simulação, sendo dependentes do hidrograma utilizado como entrada nas modelagens. Em outras palavras, os resultados variam de acordo com a cheia natural que ocasionaria a ruptura. O mesmo não foi observado para grandes e médios empreendimentos, em que os resultados apresentaram pequena variabilidade, não havendo cenário menos crítico de ruptura.

A altura incremental máxima para pequenas barragens ocorre sempre no cenário R01, simulado com a entrada de uma vazão média de longo termo. Para os demais cenários, as alturas incrementais obtidas foram da ordem de 0,60 m, próximas ao valor de referência utilizado como critério de chegada da inundação, que classificada as consequências da ruptura como “aceitáveis” segundo a FERC. As vazões de pico para o cenário R01 foram inferiores às

cheias naturais recorrentes nas bacias (TR 2 ou TR 10 anos). Ainda, a inundação decorrente destes cenários, em muitos casos, não ocasiona o transbordamento do leito menor.

Em suma, os resultados indicaram que a ruptura de barragens classificadas como de pequeno porte ocasiona mudanas no regime de vazões e de velocidades, adicionando pulsos aos hidrogramas, mas a sobreelevao do nível d'água   baixa e as vazões e volumes acrescidos são de baixa proporo. Desta forma, é evidente que o dano potencial associado aos pequenos empreendimentos não é decorrente da ruptura da barragem e sim das cheias naturais que ocasionariam sua ruptura.

Para grandes e médios empreendimentos este cenário não se verifica, uma vez que para estas barragens foram apresentadas alturas incrementais superiores ao valor de referência e picos bem definidos nos hidrogramas de saída. Nestes casos, o dano potencial associado à barragem está associado à sua ruptura e independe do cenário analisado.

Esta conclusão é de suma importância para a obteno das correlaes entre os comportamentos de vazão de pico, volume propagado, área e altura incremental em funo das características técnicas dos empreendimentos. Barragens de pequeno porte não devem apresentar um comportamento padrão em funo destas características, uma vez que os resultados para estas barragens variam conforme o cenário analisado, enquanto empreendimentos classificados como de médio e grande porte devem apresentar uma boa correlao com as características técnicas das barragens.

5.6.1 Correlaes

Com base nos resultados dos 90 cenários simulados nesta dissertao, foram plotados gráficos a fim de analisar as possíveis correlaes entre os parâmetros de altura incremental, vazão de pico, volume propagado e área de inundao com as características técnicas das barragens e do vale de jusante (altura e volume acumulado).

A variável vazão de pico apresentou melhores resultados quando correlacionada   relao $H^2 \cdot \sqrt{V}$, conforme ilustrado nos gráficos das Figura 30 (seo da barragem) e Figura 31 (seo de delimitao da ZAS). Esta relao ($H^2 \cdot \sqrt{V}$) não possui nenhum significado físico, sendo um fator definido por ICOLD (2011) para avaliar o risco potencial na área de inundao de barragens. Em ambos os ajustes o ponto referente à barragem B15 foi considerado um *outlier*, visto que seu comportamento mascarava a tendência das curvas.

Apesar de a aderência se mostrar satisfatória ($R^2 \sim 0,7$ para ambos os ajustes), para os pontos com relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ menor do que 200, o ajuste se mostrou incoerente. Isso decorre da falta de relação entre os parâmetros de vazão de pico com as características técnicas das barragens classificadas como de pequeno porte, em virtude da maior influência das cheias naturais nos resultados.

Para valores de $H^2 \cdot \sqrt{V}$ maiores que 200 a tendência não pôde ser determinada corretamente, uma vez que o número de barragens de grande porte analisadas neste estudo é pequeno.

O mesmo foi observado em relação à variável volume máximo efluente, conforme o ilustrado na Figura 32.

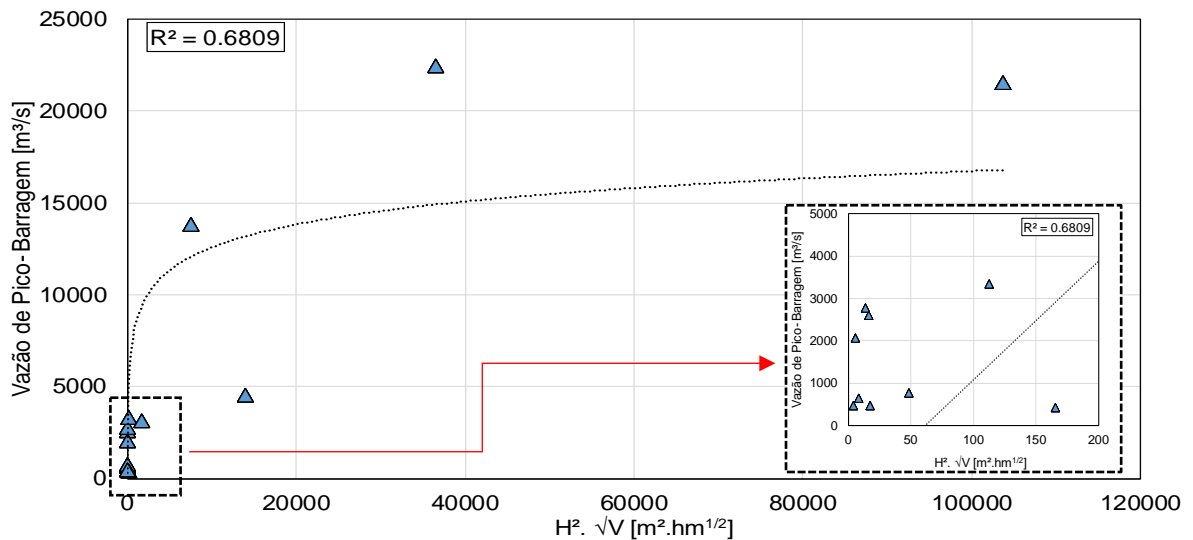


Figura 30. Correlação entre a relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ e a vazão máxima na seção da barragem.

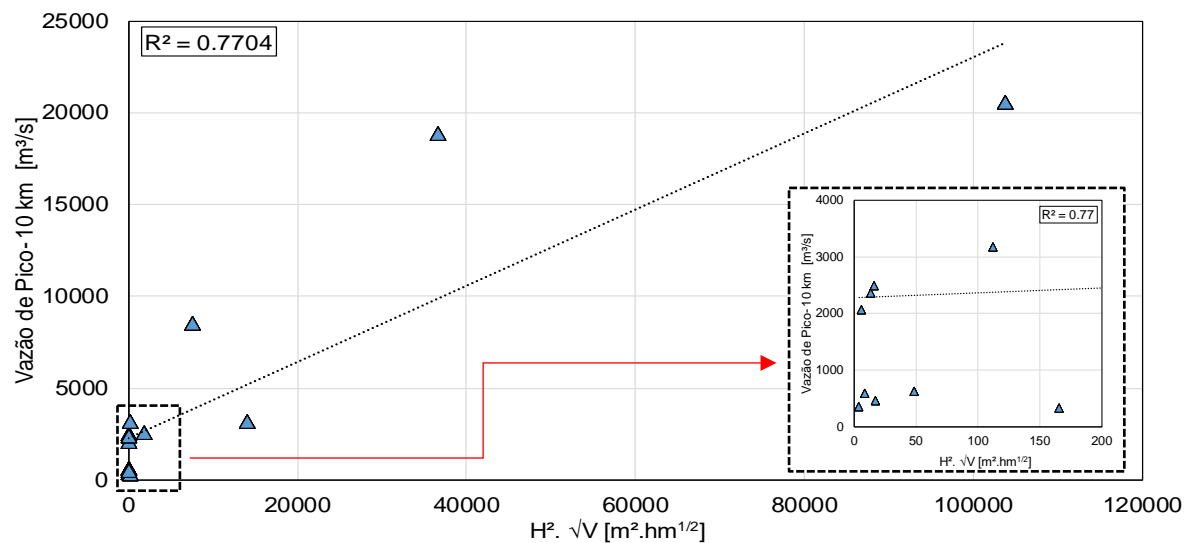


Figura 31. Correlação entre a relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ e a vazão máxima na seção de 10 km.

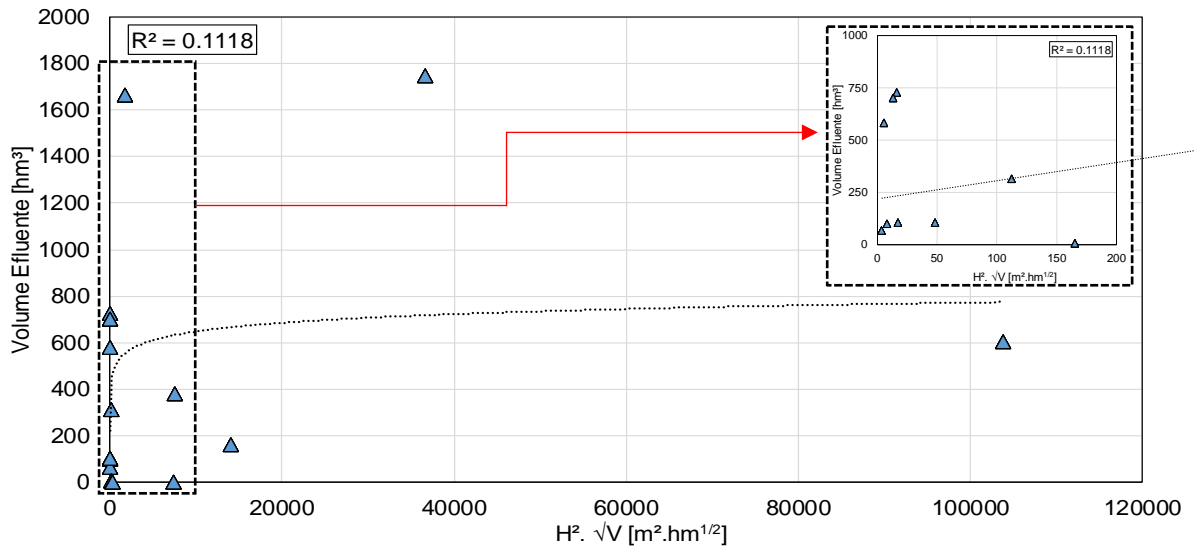


Figura 32. Correlação entre a relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$ e o volume efluente máximo.

Foi observada uma correlação satisfatória entre os parâmetros de altura incremental e altura da barragem, na seção que delimita a ZAS (Figura 33). O comportamento do gráfico indica que a quanto maior a altura da barragem, maior será a altura incremental máxima esperada na seção da ZAS. A dispersão apresentada por alguns pontos no gráfico (B03 e B11) está relacionada às condições de jusante e de volume de reservatório.

A barragem B11, como já exposto anteriormente, não apresenta influência da ruptura de sua estrutura, dado o baixo volume armazenado em seu reservatório. Já a barragem B03 apresenta reservatório da B04 a jusante, que amortece o pico de ruptura e diminui a altura incremental máxima esperada.

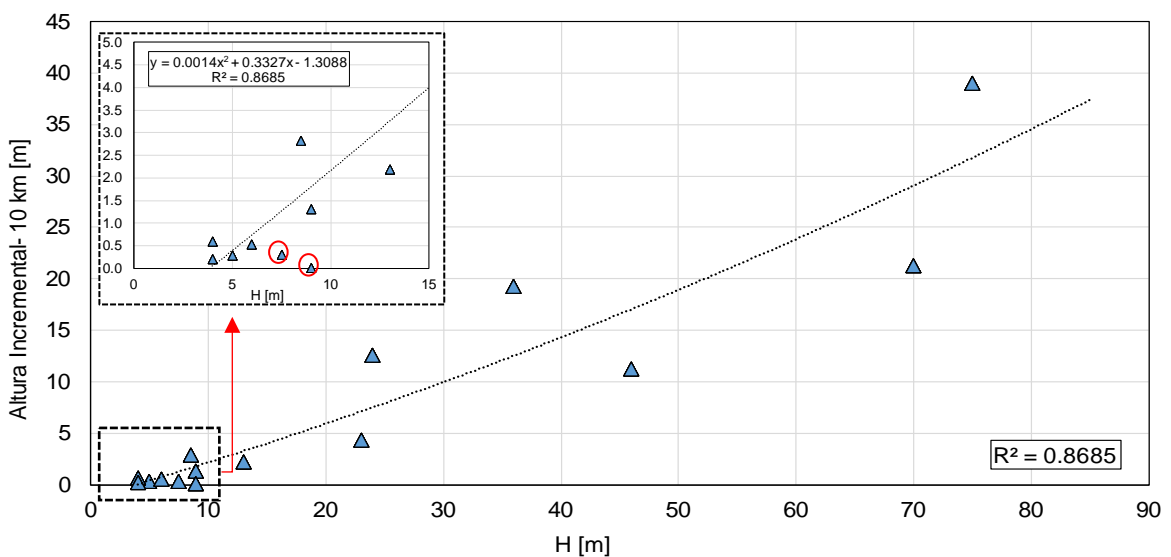


Figura 33. Correlação entre a altura do barramento e a altura incremental máxima na seção de delimitação da ZAS (10km).

A relação entre a área de inundação incremental e as características técnicas das barragens não se mostrou satisfatória. O comportamento já era esperado, uma vez que esta variável está mais relacionada à conformação do vale de jusante do que com as variáveis de altura e volume de reservatório. O melhor ajuste obtido segue apresentado na Figura 34.

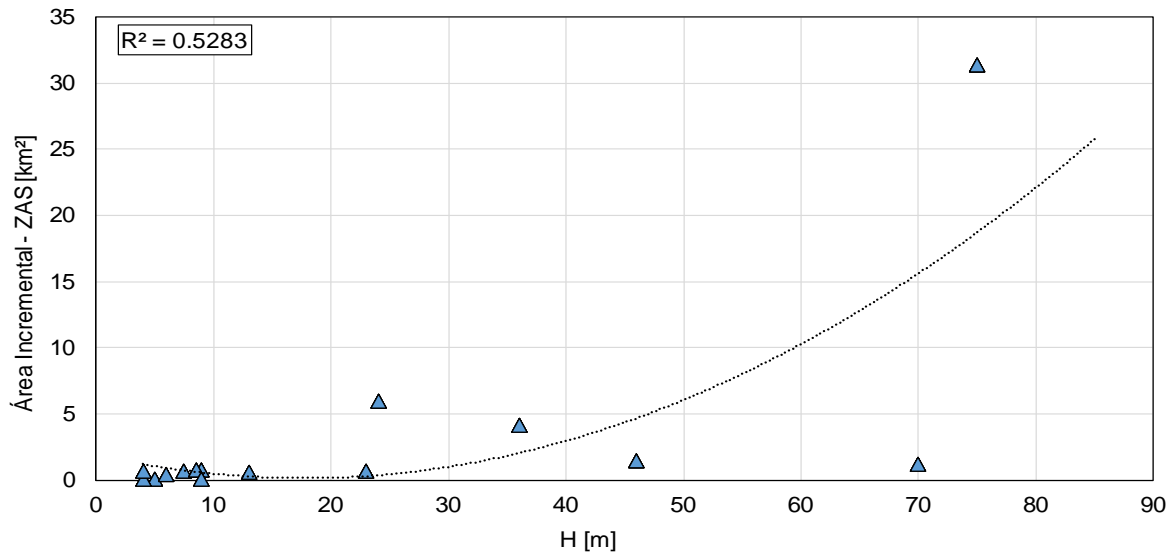


Figura 34. Correlação entre a altura da barragem H e a área incremental máxima inundada.

Apesar de algumas correlações terem apresentado aderência satisfatória, não foram propostas equações para cálculo de variáveis em virtude do restrito número de barragens analisadas neste estudo. Assim, as análises apresentadas neste capítulo têm o objetivo de observar o comportamento geral das variáveis em função das características técnicas das barragens. Para estudos futuros, recomenda-se a análise com um espaço amostral maior, contendo, principalmente, um maior número de barragens de grande e médio porte, uma vez que estas se mostraram mais dependentes da altura e volume dos reservatórios.

6. ANÁLISES EM RELAÇÃO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO

Com base no exposto no capítulo 2 desta dissertação, a classificação quanto ao dano potencial associado de barragens, segundo as especificações legais de diversos países, se dá pela presença ou não de habitações permanentes na região de jusante das barragens. Este critério também é o utilizado pela legislação em vigor no Brasil e pelos órgãos fiscalizadores de barragens brasileiras.

Conforme os resultados obtidos nas simulações de ruptura hipotética das 15 barragens analisadas neste estudo, foi observado que a classificação do dano potencial associado como “alto” só caberia a empreendimentos de médio e de grande porte, mesmo que a região a jusante das barragens classificadas como de pequeno porte seja habitada.

Essa afirmação se comprova com a comparação dos resultados do cenário de ruptura em *Sunny Day* (R01) com as cheias naturais da bacia. Essa ruptura não apresenta nenhuma influência de cheia natural, e pode ser considerada a ruptura “pura” da barragem. Nestes casos, as vazões de pico de ruptura não superaram as vazões de cheia natural para nenhuma barragem de pequeno porte, sendo inferiores as vazões com 10 anos de recorrência para todos os casos. As inundações para o R01 dificilmente extrapolam a calha do rio, tendo impactos insignificantes em relação à área incremental de inundação. A ruptura, nesses casos, ocasionaria uma mudança no regime fluvial, com elevação de nível d’água, vazões e velocidades, mas não teria, em nenhuma barragem analisada, impacto suficiente para ser classificada como de alto dano potencial associado.

Nos demais cenários de ruptura analisados, para barragens classificadas como de pequeno porte, nota-se que o impacto da ruptura varia com a cheia natural. Os resultados indicaram um comportamento padrão, de diminuição do impacto esperado pela ruptura conforme a relação $V_{CHEIA\ NATURAL}/V_{RESERVATÓRIO}$ aumenta. Para os casos de rupturas considerando a cheia excepcional como condição de contorno (R06), observaram-se impactos mínimos em relação à altura e à inundação incremental da ruptura. Para estes casos, foi observado que o dano potencial associado é relacionado à cheia que ocasionaria a ruptura e não à ruptura em si.

Este cenário não se confirma para médios e grandes empreendimentos, que apresentam grande alteração do regime fluvial, bem como inundação e altura incremental significativas. Para estas barragens, a classificação como dano potencial associado “alto” se verifica.

Ainda, comparando os resultados de inundação com eventos naturais das bacias, foi observado que nenhuma barragem classificada como de pequeno porte apresentou inundações superiores à inundação do cenário C06 – referente à cheia de projeto das barragens. Indicando que, cheias excepcionais ocasionariam danos superiores aos esperados pela ruptura das barragens de pequeno porte.

Esta conclusão é de suma importância para o cenário em que se encontra a classificação de barragens e as exigências impostas aos empreendedores no Brasil. Após os acidentes de Mariana e Brumadinho, os órgãos fiscalizadores tem exigido Planos de Ações Emergências à empreendimentos que apresentam baixo dano potencial associado, como é o caso das barragens de pequeno porte analisadas neste estudo. Essa exigência demonstra a preocupação das agências fiscalizadoras com a segurança dos possíveis afetados pela ruptura, mas não se mostra pertinente, uma vez que pequenas barragens não apresentam dano potencial associado à sua ruptura e sim a cheias naturais da bacia.

A exigência da apresentação do PAE é onerosa e condiciona o empreendedor a adotar medidas, muitas vezes, desproporcionais. Principalmente se considerarmos barragens localizados em regiões remotas. A verba destinada a esses estudos e às medidas mitigatórias, como o uso de sirenes de alerta, por exemplo, seria melhor empregada se direcionada a manutenção da segurança dessas barragens, através de monitoramento de auscultação e melhorias nos sistemas extravasores.

Para pequenas barragens com região de jusante habitada, o Plano de Ações Emergenciais poderia ser substituído pela implantação de Planos de Contingência (PLACON), em conjunto com os órgãos de defesa civil estadual. Assim, as medidas de proteção civil no caso de cheias naturais seriam de responsabilidade tanto do estado, quanto dos proprietários das barragens de montante.

6.1 DPA – Barragens Analisadas

Em relação à classificação de dano potencial associado, dentre todos os sistemas apresentados no capítulo 2, o único que se mostra representativo aos resultados obtidos nos estudos de Dam-Break foi o proposto por ICOLD em 2011. Ainda assim, o método citado só se mostra coerente se analisado somente pela ótica de porte da barragem, através da relação $H^2 \cdot \sqrt{V}$, desconsiderando os demais critérios. A Tabela 16 apresenta a classificação considerando somente este parâmetro e a proposta deste estudo.

A classificação proposta enquadró o DPA como “baixo” ou “alto” em virtude da insuficiência de dados para uma subdivisão em três níveis, como é de praxe nos sistemas de classificação. A proposição foi embasada na classificação quanto ao porte apresentada por USACE (1979) e pressupõe que, qualquer barragem enquadrada como de pequeno porte deve apresentar baixo dano potencial associado à sua ruptura. Para as demais barragens, o dano potencial associado à ruptura foi classificado como alto.

Tabela 16. Classificação quanto ao porte dos empreendimentos analisados.

SIGLA	PORTE DO EMPREENHIMENTO USACE 1979	CLASSE DPA ICOLD 2011	CLASSE DPA ESTUDOS DAM-BREAK
B01	Pequeno	BAIXO	BAIXO
B02	Pequeno	BAIXO	BAIXO
B03	Pequeno	BAIXO	BAIXO
B04	Pequeno	BAIXO	BAIXO
B05	Pequeno	MÉDIO	BAIXO
B06	Intermediário	MÉDIO	ALTO
B07	Pequeno	BAIXO	BAIXO
B08	Grande	ALTO	ALTO
B09	Intermediário	MÉDIO	ALTO
B10	Grande	ALTO	ALTO
B11	Pequeno	BAIXO	BAIXO
B12	Grande	ALTO	ALTO
B13	Intermediário	ALTO	ALTO
B14	Grande	ALTO	ALTO
B15	Grande	ALTO	ALTO

Os demais sistemas de classificação apresentados no capítulo 2 indicaram dano potencial associado como alto para todos os empreendimentos, em virtude da ocupação da região a jusante das barragens.

7. CONCLUSÃO

Nesta dissertação foram analisados os resultados de ruptura hipotética de 15 barragens brasileiras, sob a ótica de 90 cenários de rompimento distintos. Foram realizadas análises em relação à vazão de pico, altura incremental, volume propagado e inundação incremental, com a finalidade de analisar o dano potencial associado aos empreendimentos.

A partir dos resultados discutidos, foi observado que o comportamento dos parâmetros de vazão de pico, volume efluente, altura incremental e área de inundação incremental variam de acordo com o porte dos empreendimentos e com a geomorfologia do vale de jusante.

Para pequenas barragens foi observada grande variabilidade dos parâmetros em relação aos cenários analisados. Isso ocorre em virtude da maior dependência dos resultados às condições de contorno da simulação. Em outras palavras, os resultados variam conforme a cheia natural que ocasionaria a ruptura.

As rupturas de empreendimentos classificados como de pequeno porte não apresentaram vazões, alturas incrementais ou inundações incrementais que pudessem ser classificadas como de alto dano potencial associado. Os resultados indicaram que a ruptura dessas barragens ocasionaria mudanças no regime de vazões e de velocidades, adicionando pulsos aos hidrogramas, mas a sobrelevação do nível d'água seria pequena e as vazões e volumes acrescidos seriam de baixa proporção.

Ainda, comparando os resultados de inundação com eventos naturais das bacias, foi observado que nenhuma barragem classificada como de pequeno porte apresentou inundações superiores à inundação do cenário C06 – referente à cheia de projeto das barragens. Indicando que cheias excepcionais ocasionariam danos superiores aos esperados pela ruptura das barragens de pequeno porte. Desta forma, conclui-se que o dano potencial associado aos pequenos empreendimentos não é decorrente da ruptura da barragem e sim das cheias naturais que ocasionariam sua ruptura.

Este cenário não se verifica para médios e grandes empreendimentos, que apresentam grande alteração do regime fluvial, bem como inundação e altura incremental significativas nos eventos de ruptura. Nestes casos, os resultados não apresentam grande variabilidade, uma vez que as variáveis possuem maior influência das características técnicas da barragem (altura e volume do reservatório) do que das condições de contorno dos modelos.

Para grandes e médios reservatórios a adoção de mais de um cenário de ruptura não apresenta um ganho significativo em termos de resultados, não existindo, portanto, um cenário menos crítico de ruptura – para os mesmos parâmetros de brecha. Para estas barragens, a classificação como dano potencial associado “alto” se verifica.

Em suma, as análises indicaram que a classificação de dano potencial associado como “alto” só cabe aos empreendimentos de médio e de grande porte analisados, mesmo que a região a jusante das barragens classificadas como de pequeno porte seja habitada.

A exigência da elaboração de PAE para estes empreendimentos se mostra, portanto, desproporcional, visto que a possível área atingida pela ruptura seria equivalente à área atingida pela cheia natural. Nestes casos, a verba destinada aos estudos e à implementação do PAE seria melhor empregada se direcionada à manutenção da segurança da barragem, através de monitoramento de auscultação, melhorias nos sistemas extravasores e nas estruturas da barragem.

Ainda, para pequenas barragens situadas a montante de regiões habitadas, a implantação de planos de contingência (PLACONS) em conjunto com os órgãos de defesa civil deve ser considerada. Assim, as medidas de proteção civil no caso de cheias naturais seriam de responsabilidade tanto do estado, quanto dos proprietários das barragens de montante.

7.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

Os resultados apresentados nesta dissertação estão limitados à um número restrito de barragens que apresentam volume de cheia elevado. Estudos que envolvam um espaço amostral maior, principalmente de barragens de pequeno porte situadas em regiões áridas, nos quais os hidrogramas de projeto se apresentam com baixo volume, poderiam ser realizados para validar a hipótese de que empreendimentos de pequeno porte não apresentam dano potencial associado à sua ruptura.

Ainda, estudos com maior número de barragens poderiam auxiliar na elaboração das equações que correlacionam variáveis de volume propagado, altura incremental e vazão de pico pelo vale de jusante.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, C. T.; BRUNNER, G. W. **Dam failure analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS**. In: THIRD FEDERAL INTERAGENCY HYDROLOGIC MODELING CONFERENCE IN RENO, NV, 2006.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Resolução nº 91 de 02 de abril de 2012**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2012/91-2012.pdf>, 2012.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Resolução nº 236 de 30 de janeiro de 2017**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/236-2017.pdf>, 2017.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens 2016**. Brasília-DF, 2017.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 696 de 15 de dezembro de 2015**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015696.pdf>, 2015.
- ASNAASHARI, A.; MEREDITH, D.; SCRUTON, M. **Dam Breach Inundation Analysis Using HEC-RAS and GIS Two Case Studies in British Columbia, Canada**. In: CDA 2014 ANNUAL CONFERENCE BANFF, Alberta October 4 – October 9, 2014.
- BAIMA, S. K. **Uma metodologia multicritério construtivista para a avaliação da vulnerabilidade de barragens e regiões de jusante**. Tese de Doutorado, UFC, Fortaleza, 2015.
- BRASIL. **Lei nº12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 20 setembro de. 2010. Seção 1, p. 1.
- CALÇADA, M. C.; PORTELA, M. M.; MATOS, J. Análise de cheias e delimitação de zonas inundáveis no Timor Leste. In: **ANAIS DO 7º CONGRESSO DA ÁGUA**. Lisboa: 2004.
- CDA. CANADIAN DAM ASSOCIATION. **Regulation of Dams in Canada**. Disponível em: https://www.cda.ca/EN/Dams_in_Canada/Regulation/EN/Dams_In_Canada_Pages/Regulation.aspx?hkey=9f7a09f5-19be-4c40-8e4e-7eee628a7f50, 2019.
- CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012**. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Análise de Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 2, n.2, pp. 191-206, 1997.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapas de Geodiversidade Estaduais**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>, 2019.
- DEWEY, R.; GILLETTE, D. **Prediction of Embankment Dam Breaching for Hazard Assessment**. In: ASCE SPECIALTY CONFERENCE ON GEOTECHNICAL PRACTICE IN DAM REHABILITATION, Raleigh, North Carolina, 25-28, APRIL 1993.

ESPAÑA. **Norma Técnica de Seguridad para la Clasificación de las Presas y para la Elaboración e Implantación de los Planes de Emergencia de Presas y Embalses**. Disponible em: https://www.miteco.gob.es/images/es/pp-proyecto-rd-normas-tecnicas-seguridad-grandes-presas-y-sus-embalses-1-clasificacion_tcm30-452742.pdf, 2019.

ESPAÑA. **Proyecto de Real Decreto – 2019. Maio de 2019**. Disponible em: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/participacion-publica/PP-Proyecto-RD-Normas-Tecnicas-Seguridad-Presas-septbre-2019.aspx>, 2019.

ELY Centre (Håme Centre for Economic Development, Transport and the Environment). **Dam Safety Guide – Reports 89**. 2012.

FEMA. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification Systems for Dams**. FEMA 333, 2004.

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

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Safety Performance Monitoring Program**. 2005.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Breach Analysis – DRAFT**, 2014.

FREAD, D. L.; JIN, M.; LEWIS, J. M. An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation. In: **PROCEEDINGS OF NORTH AMERICAN WATER AND ENVIRONMENT CONGRESS '96**, ASCE, Anaheim, California, June, 1996, pp. 22-28.

FROEHLICH, D. Embankment-Dam Breach Parameters. In: **HYDRAULIC ENGINEERING, PROCEEDINGS OF THE 1987 NATIONAL CONFERENCE**, ASCE, Williams Burg, VA, pp. 570-575, 1987.

FROEHLICH, D. Embankment-Dam Breach Parameters Revisited. In: **FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE, WATER RESOURCES ENGINEERING, ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES INSTITUTE (EWRI)**, ASCE, Water RESOURCES ENGINEERING **PROCEEDING**, pp. 887-891, 1995.

FROEHLICH, D. **Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties**. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 12. Pp. 1708-1721. 2008.

GEE, M. **Use of Breach Process Models to Estimate HEC-RAS Dam Breach Parameters**. In: **2ND JOINT FEDERAL INTERAGENCY CONFERENCE**, Las Vegas, NV, June 27 – July 1, 2010.

GOODELL, C. R. A Probabilistic Approach to Dam Breach Modeling. In: **PROCEEDINGS, FLOODRISK 2012 CONFERENCE**, ROTTERDAM, THE NETHERLANDS, NOVEMBER, 2012.

GOODELL, C. R. **Moving Towards Risk-Informed Dam Breach Modeling**. In: **DAM SAFETY 2013 CONFERENCE**, AT PROVIDENCE, RI USA. 2013.

GOODELL, C. R.; FROEHLICH, D. C. **Comparison of Dam Breach Flood Uncertainty Calculations**. In: PRESENTATION, UNITED STATES SOCIETY ON DAMS 2012, New Orleans, Louisiana, April, 2012.

HEC - HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. **HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 4.1**. US Army Corps of Engineers, Davis, USA, 2010, 747p.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Lessons from dam incidents**. Paris, 1974, 1069 p.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam failures statistical analysis**. Bulletin 99. Paris, 1995, 63 p.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation**. Brasil, 2011, 149 p.

ICOLD EUROPEAN CLUB. **Dam Legislation Report**, March 2013.

ICOLD EUROPEAN CLUB. **Dam Legislation Report**, December 2017.

LARA, P. G. **Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2016.

LAURIANO, A. W.; MONTE-MOR, R. C. A.; BRASIL, L. S. S.; PALMIER, L. R.; NASCIMENTO, N. O.; SOUZA, N.; CANELLAS, A. V. B. **Propagação da onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem e mapeamento de áreas inundáveis – Estudo de caso: Usina Hidrelétrica de Funil – RJ**. In: I SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, RESENDE, Rio de Janeiro, 2008

LAURIANO, A. W.; BRASIL, L. S. S.; MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R.; NASCIMENTO, N. O.; SOUZA, N.; CANELLAS, A. V. B. **Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Campo Grande/MS, 2009.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. **Breaching characteristics of dam failure**. Journal of Hydraulic Engineering. 110(5), pp. 567-586. 1984.

MENESCAL, R. A. **Risco e Segurança em Engenharia – Problemas Enfrentados pelo Ministério da Integração com Obras de Infra-estrutura Hídrica**. In: DEBATE: O MOMENTO ATUAL DA ENGENHARIA BRASILEIRA. INSTITUTO DE ENGENHARIA. São Paulo, 7 mar. 2007.

MIROSLAW-SWIATEK, D. **Unsteady 1D Flow Model of Natural Rivers with Vegetated Floodplain – An Application to Analysis of Influence of Land Use on Flood Wave Propagation in the Lower Biebrza Basin**. Water Resources Management and Modeling. Purna Nayak (Ed.), InTech. 2012.

PORTUGAL. **Decreto-Lei 344/2007**. Diário da República, 1ª série – No. 198 – 15 de outubro de 2007.

QUÉBEC. **Dam Safety Regulations**. Gazette officielle du Québec, January 2019. Disponível em: <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/ShowDoc/cr/S-3.1.01,%20r.%201>, 2019.

QUÉBEC. **Dam Safety Act**. Gazette officielle du Québec, October 2019. Disponível em: <http://legisquebec.gouv.qc.ca/en/ShowDoc/cs/S-3.1.01>, 2019.

REPUBLICA DA ÁFRICA DO SUL. **Dam Safety Regulations R.139**. 2012. Disponível em: <http://www.dwaf.gov.za>.

SCHAEFER, M. G. **Dam Safety Guidelines, Technical Note 1: Dam Breach Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification**. Washington State Department of Ecology Publication No. 92-55E, July 1992.

SEO. STATE OF COLORADO DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES - Division of Water Resources Office of the State Engineer. **Guidelines for Dam Breach Analysis**, February 2010.

SINGH, V. P.; SCARLATOS, P. D.; COLLINS, J. G.; JOURDAN, M. R. **Breach Erosion of Earthfill Dams (BEED) Model**. Natural Hazards, Volume 1, pp. 161-180. 1988.

SINGH, K. P.; SNORRASON, A. **Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam parameters and simulation models**. Journal of Hydrology, Vol 68, pp. 295-310. 1984.

USACE (U.S. Army Corps of Engineers). **Recommended Guidelines for the Safety Inspection of Dams**. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, Washington D.C., 1979.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design Dam Safety Assurance Program (ER 1110-2-1155)**, 1997.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center. **Training Documents – Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. TD-39, August 2014.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. **Downstream hazard classification guidelines**. ACER Technical Memorandum. No. 11, Denver. 1988.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. **A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure DSO-99-06**. Sedimentation & River Hydraulics, Dam Safety Office, September 1999.

VON THUN J. L.; GILLETE, D. R. **Guidance on breach parameters**. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, 1990, p. 17.

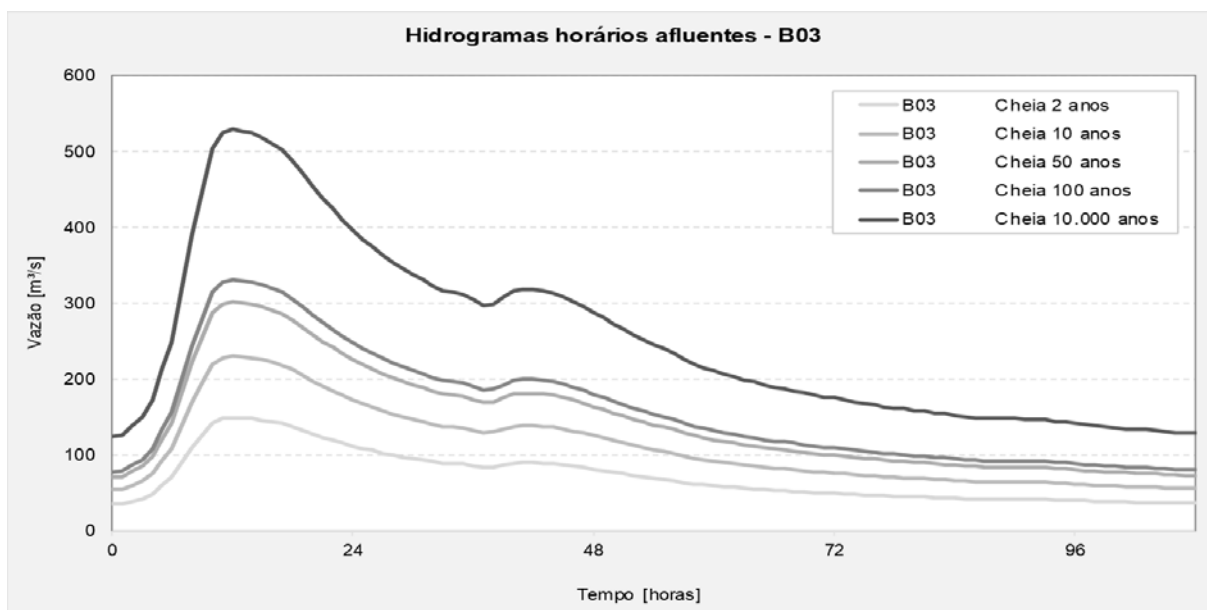
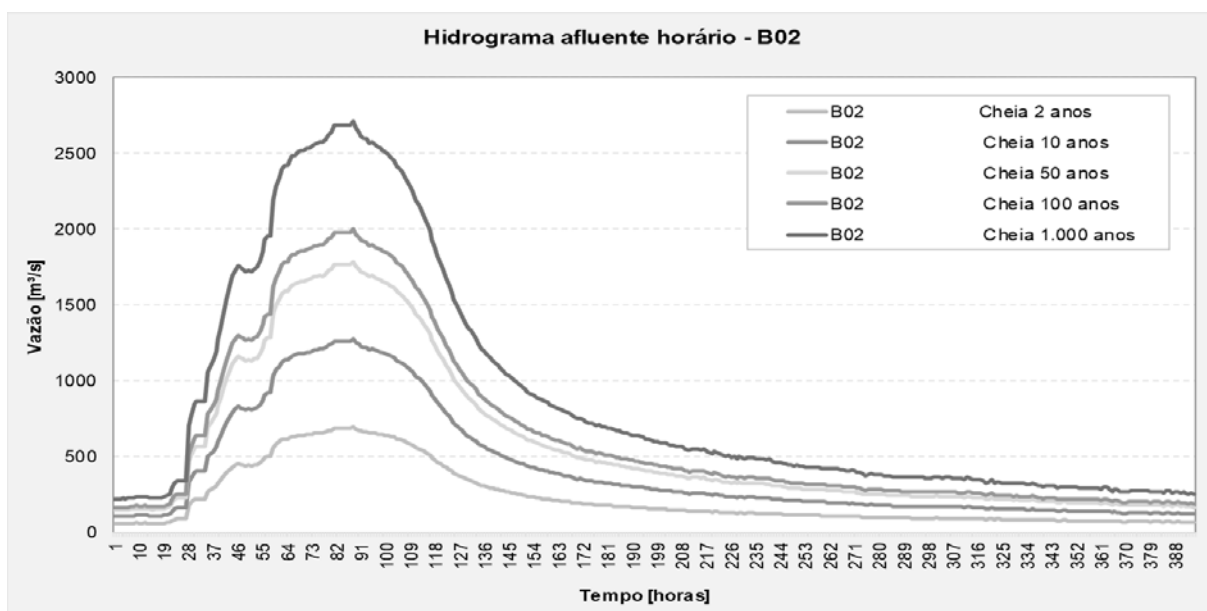
WAHL, T. L. **Uncertainty of Prediction of Embankment Dam Breach Parameters**, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol 130, No. 5, pp 389-397. 2004.

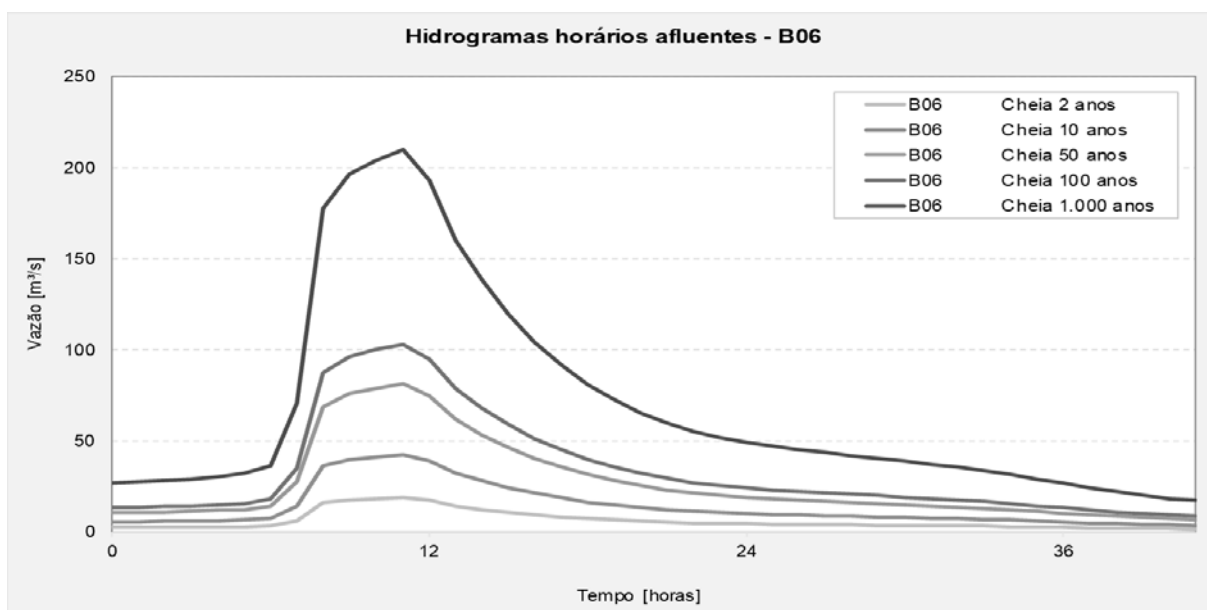
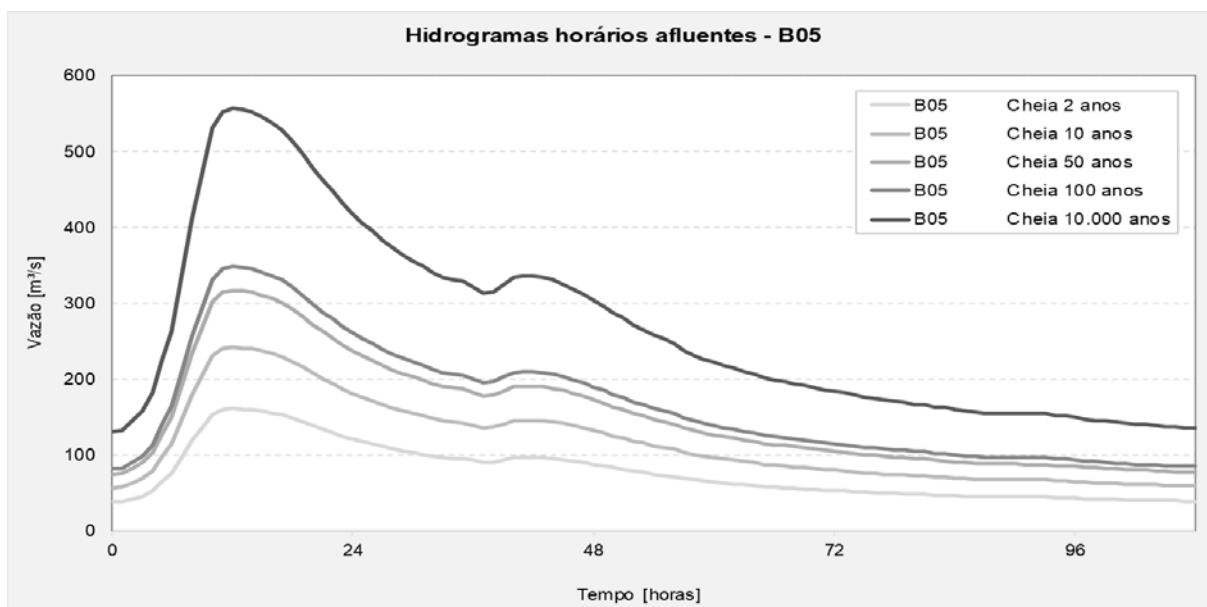
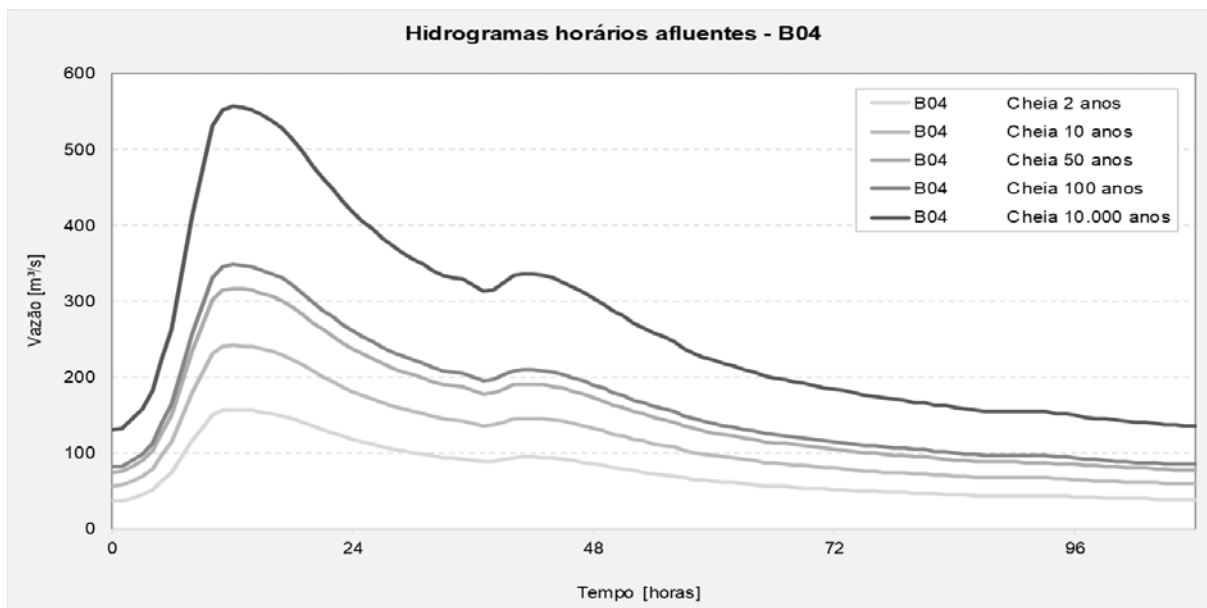
WAHL, T. L. **Dam Breach Modeling – An Overview of Analysis Methods**. In: JOINT FEDERAL INTERAGENCY CONFERENCE ON SEDIMENTATION AND HYDROLOGIC MODELING, June 27 - July 1, Las Vegas, NV, 2010.

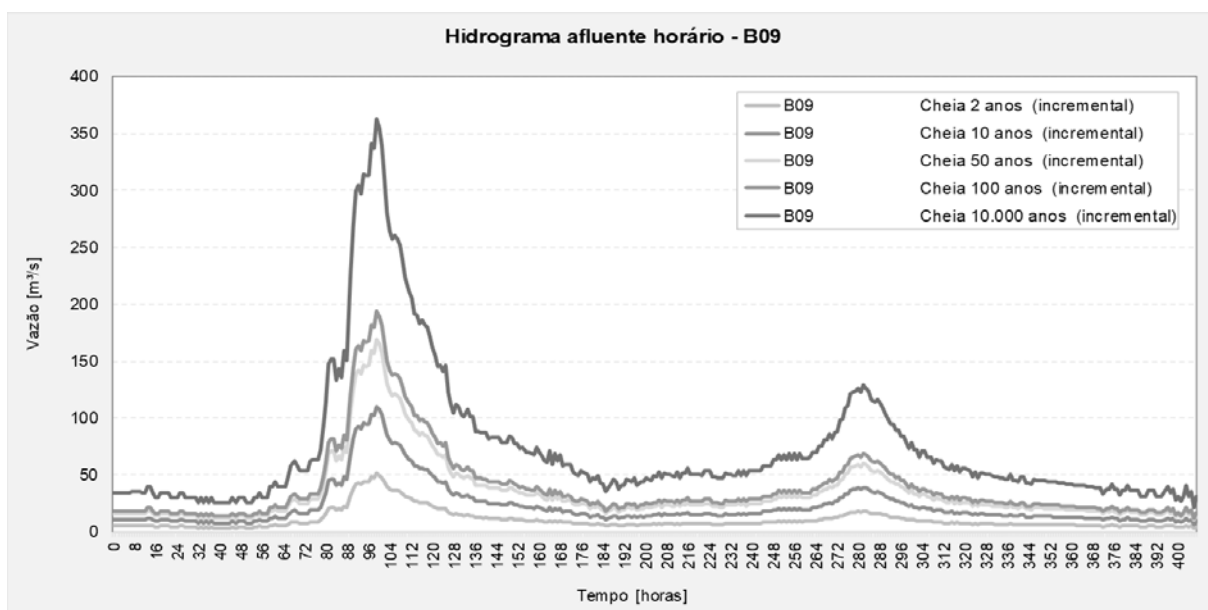
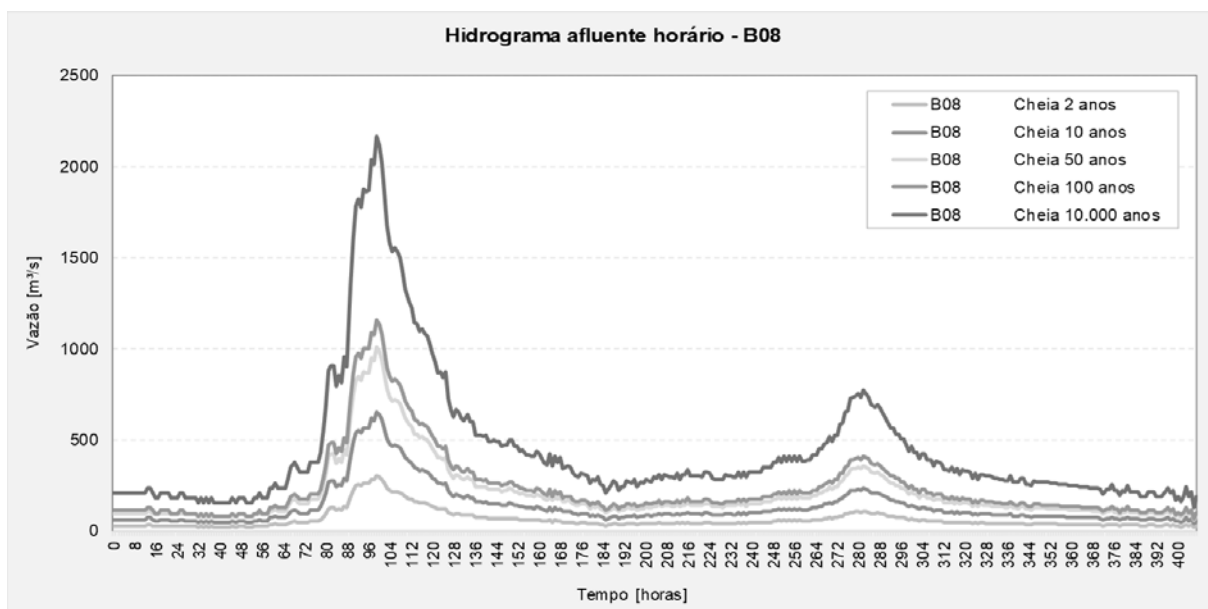
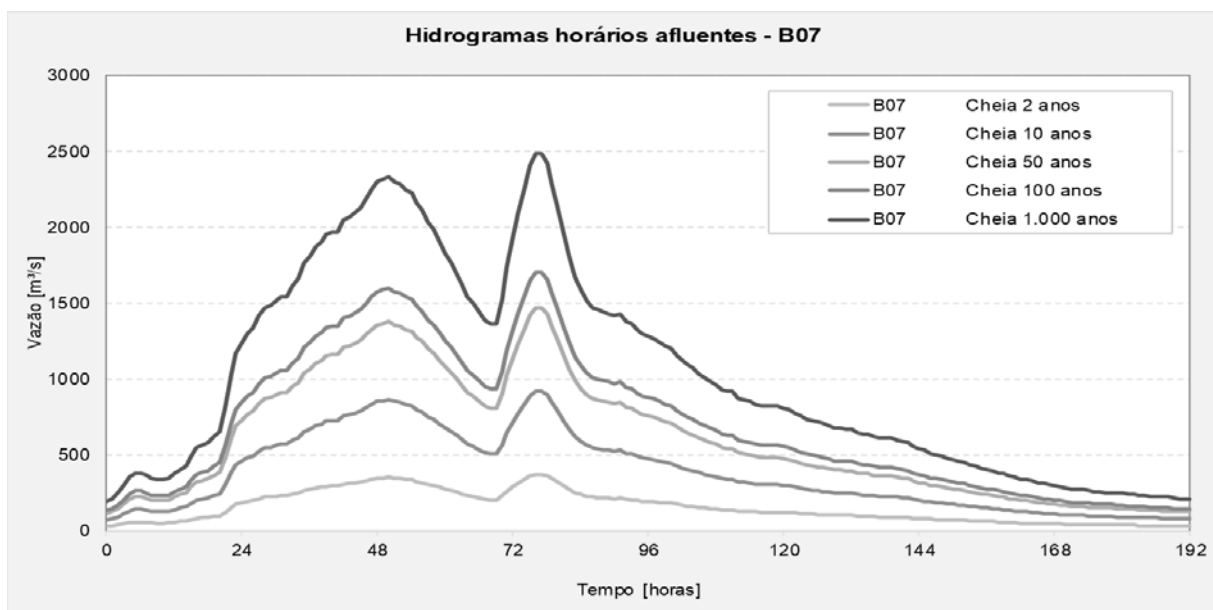
XIONG, Y. **A Dam Break analysis using HEC-RAS**. Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3, pp. 370-379, 2011.

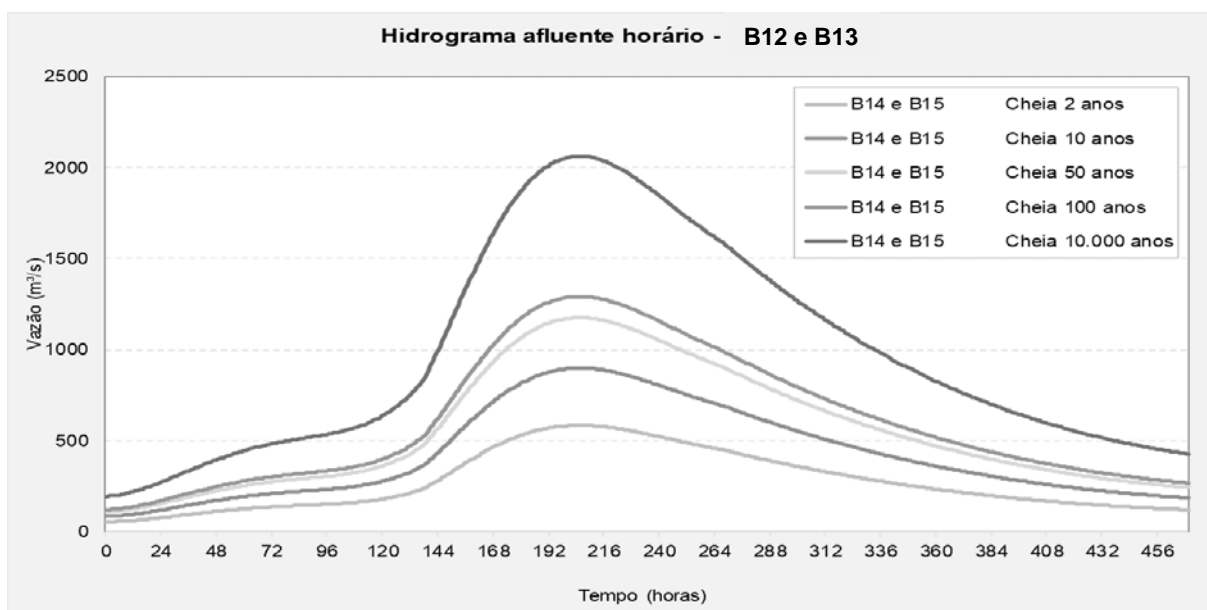
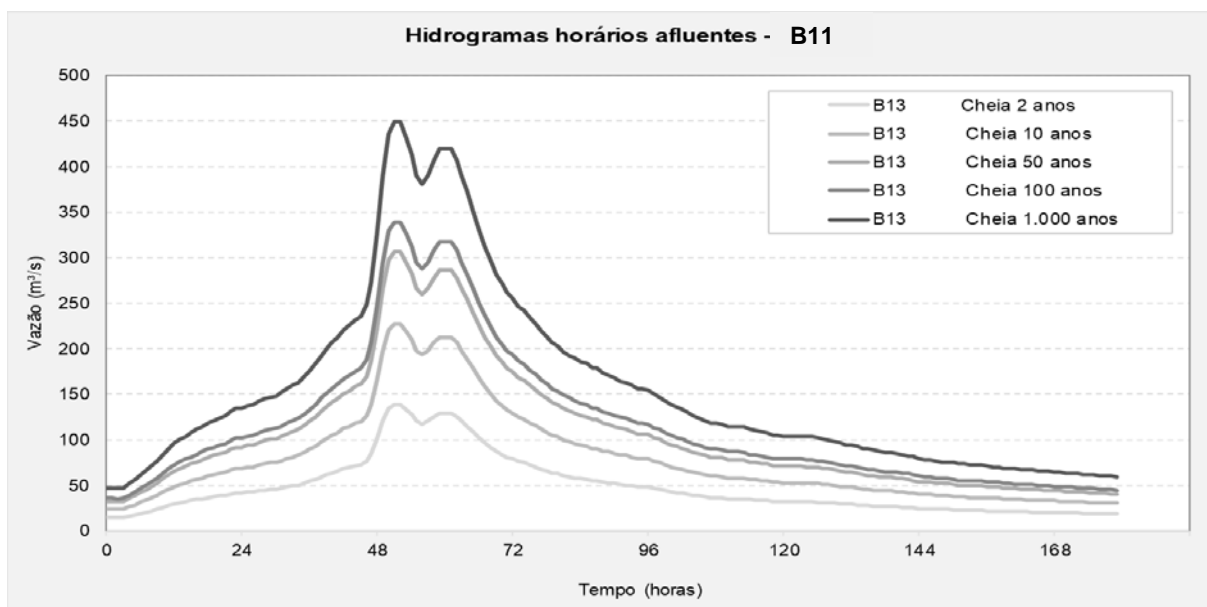
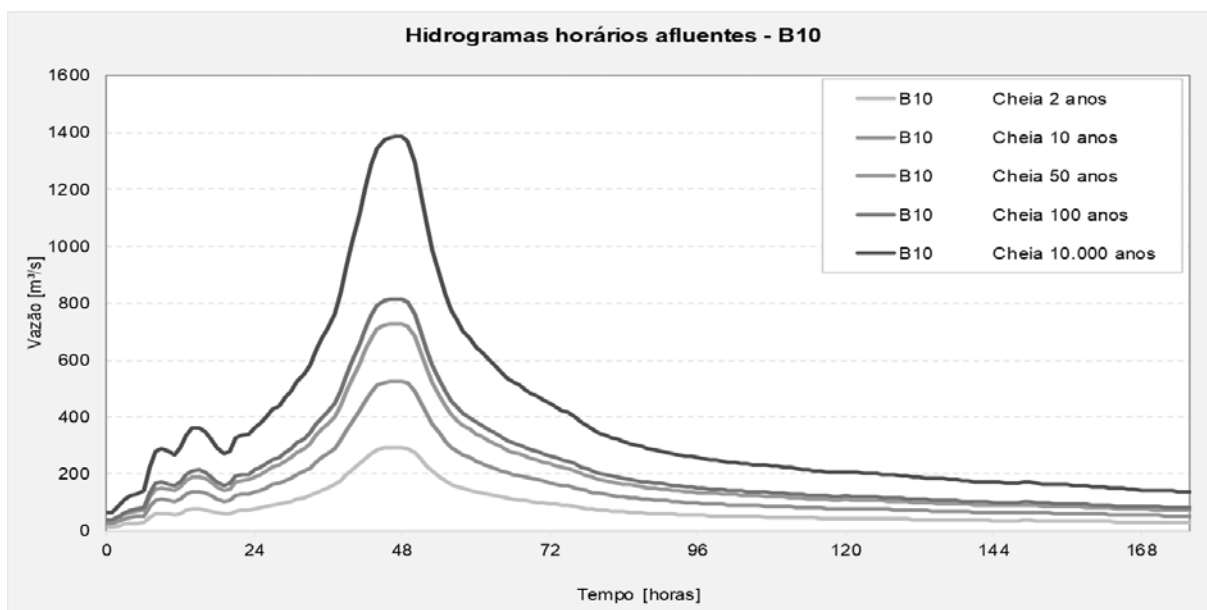
ANEXOS

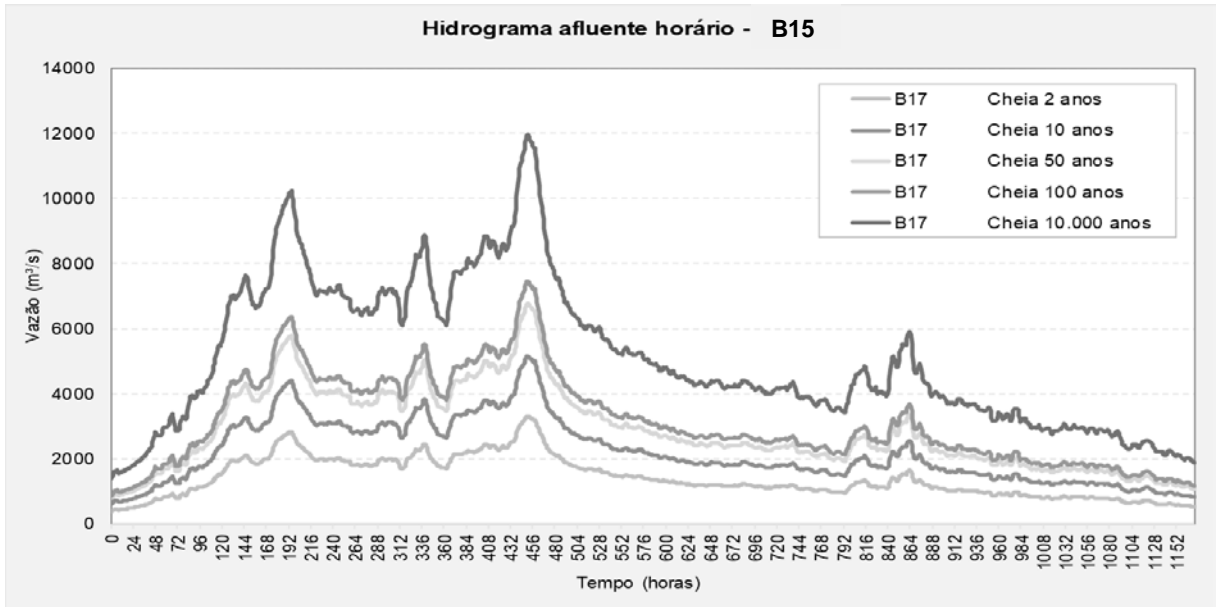
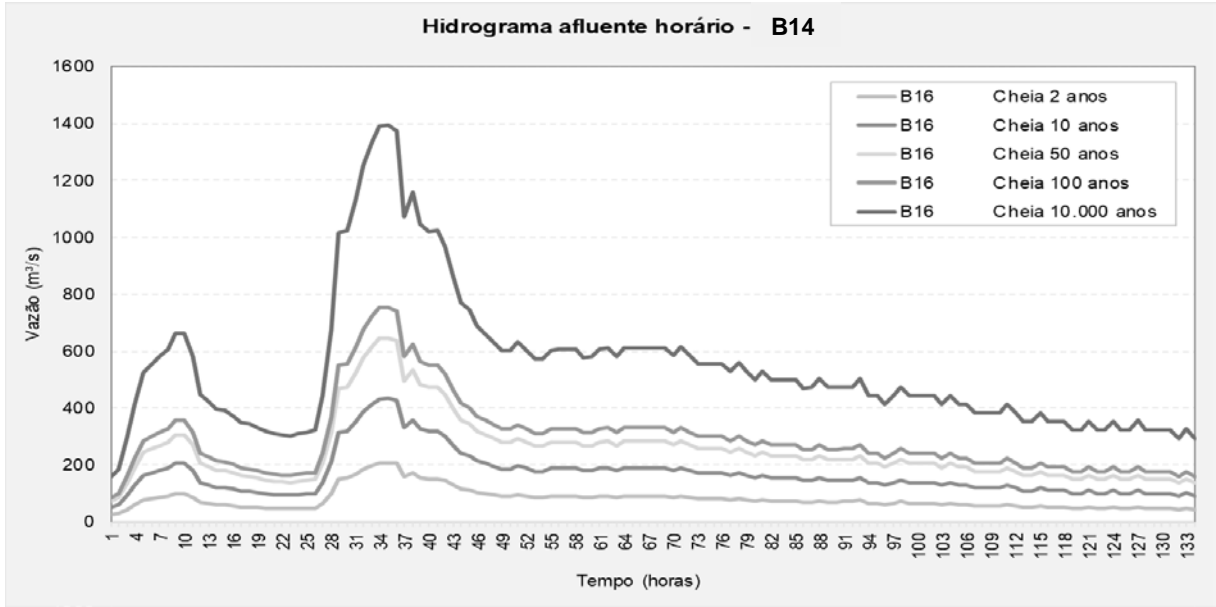
ANEXO A – HIDROGRAMAS DE CHEIA





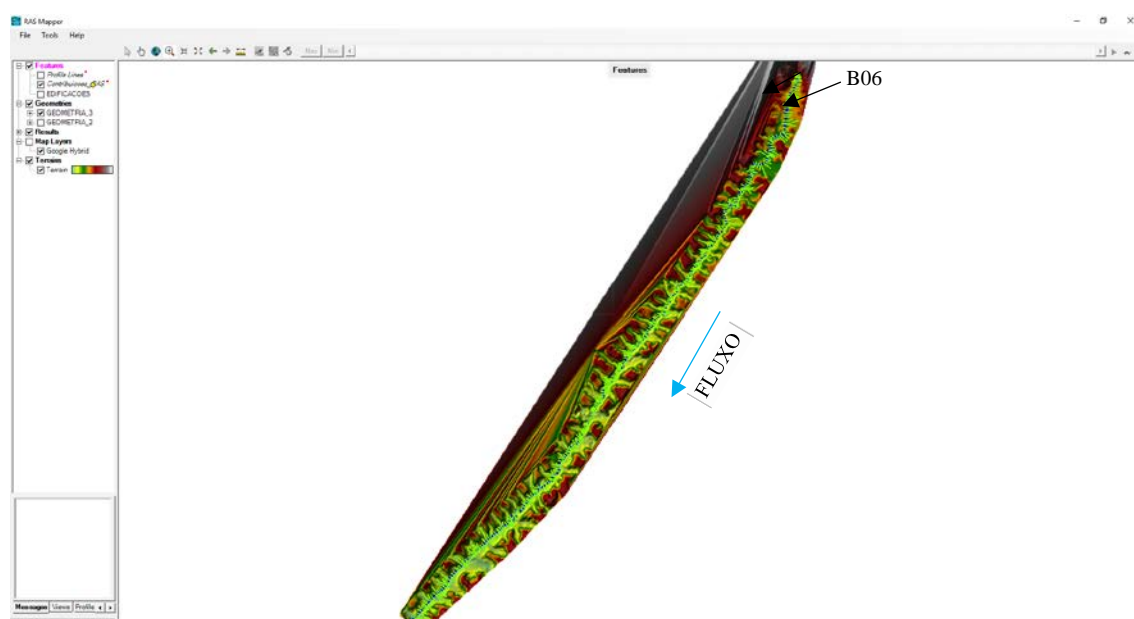
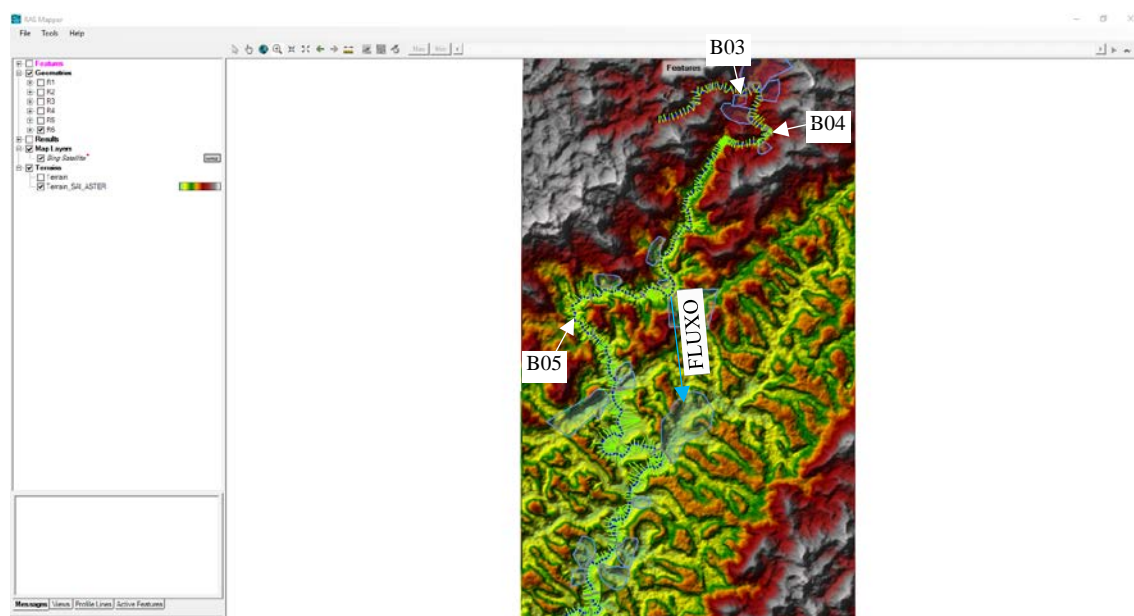


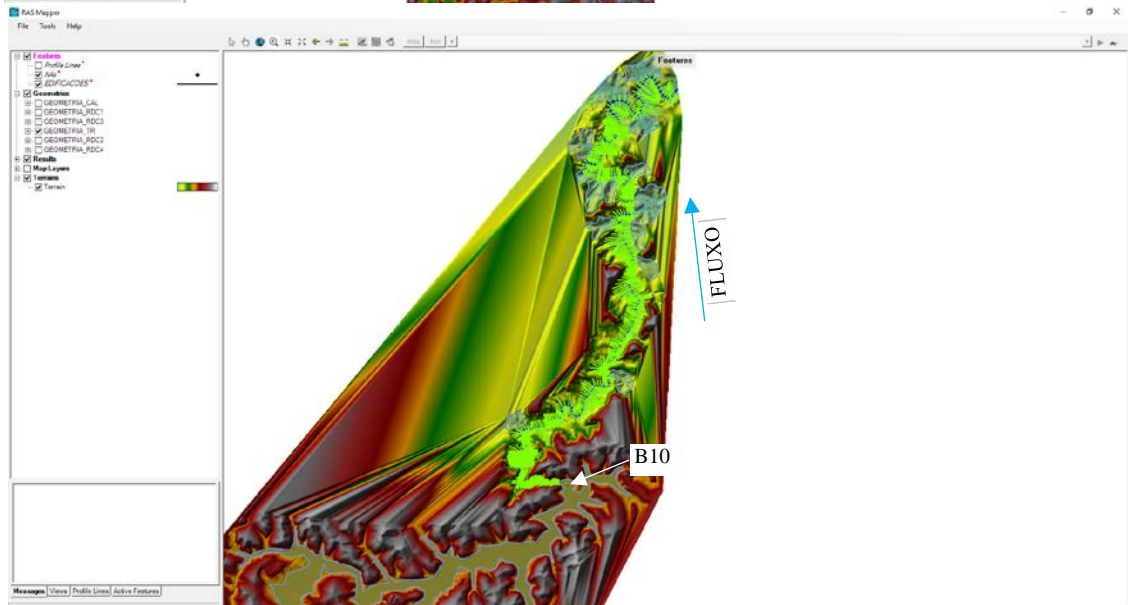
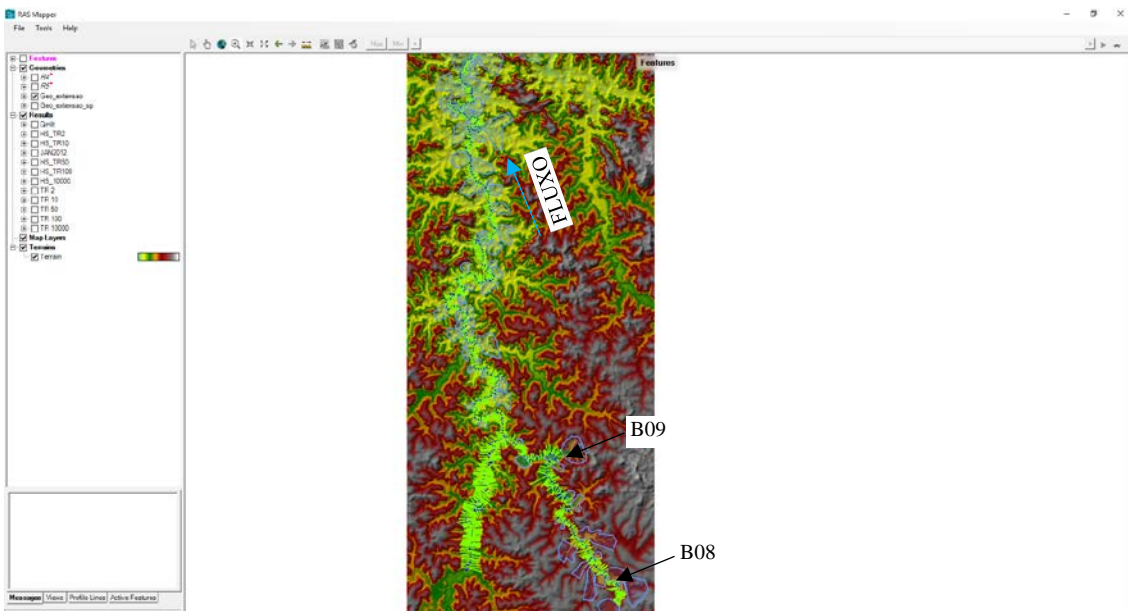
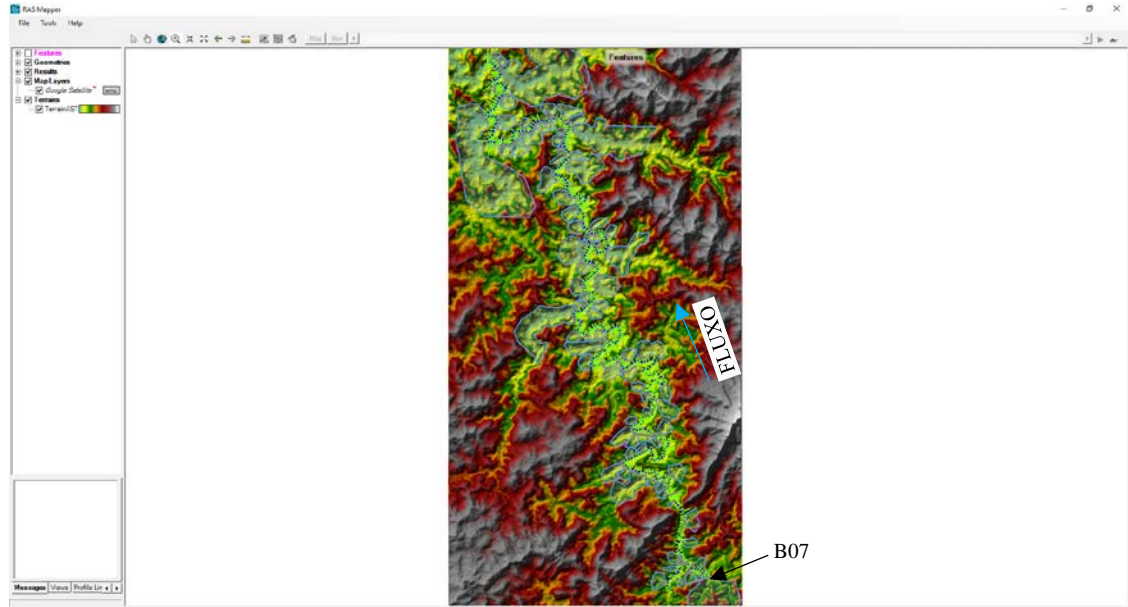


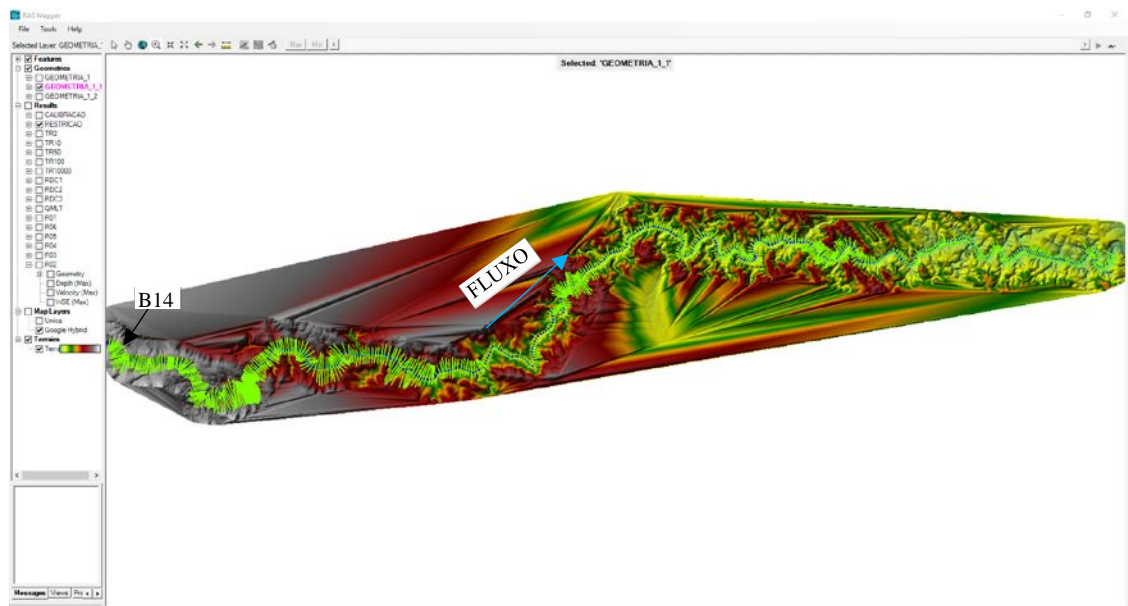
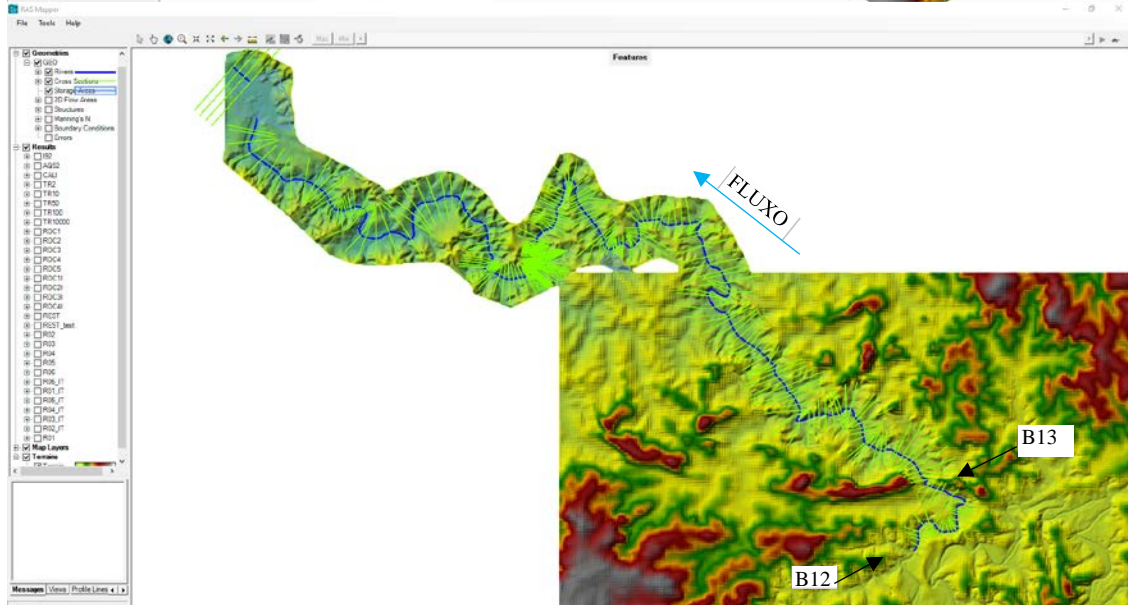
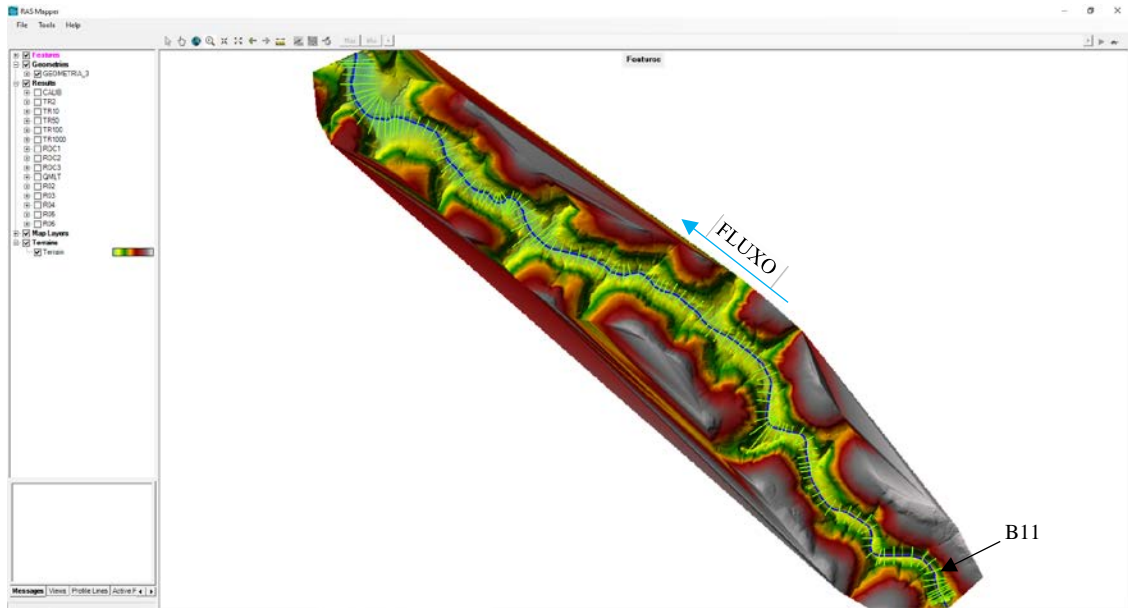


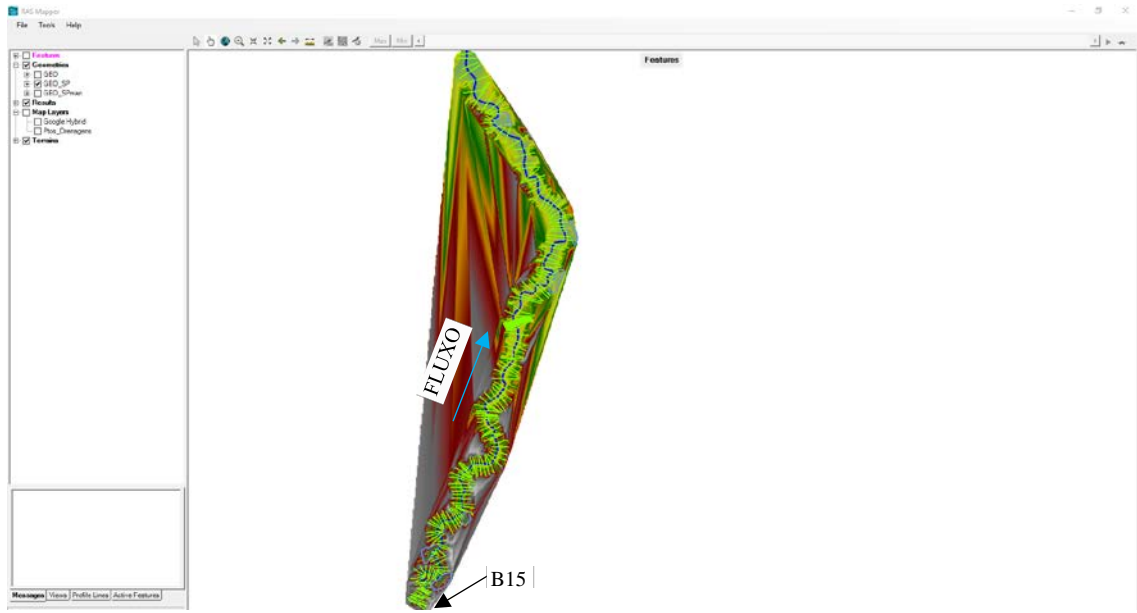
APÊNDICES

APÊNDICE A – MODELOS CONCEITUAIS

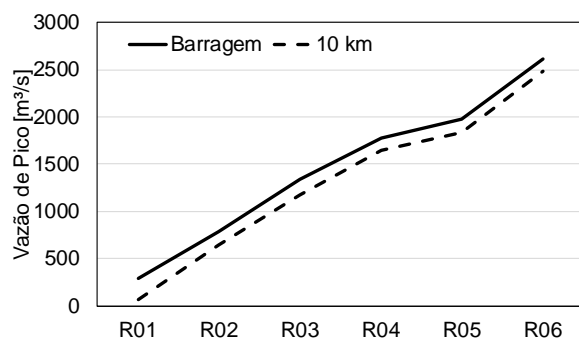




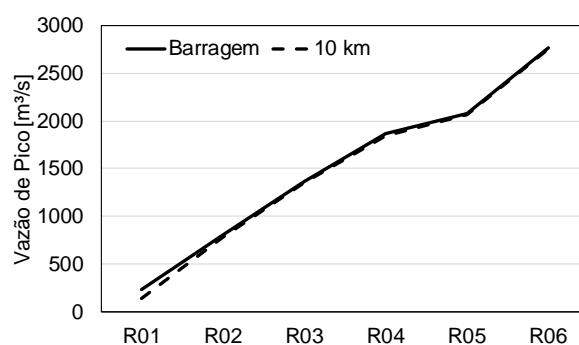




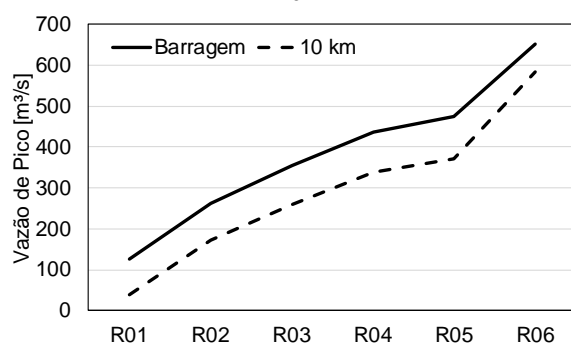
APÊNDICE B – VAZÃO DE PICO PARA OS 90 CENÁRIOS ANALISADOS



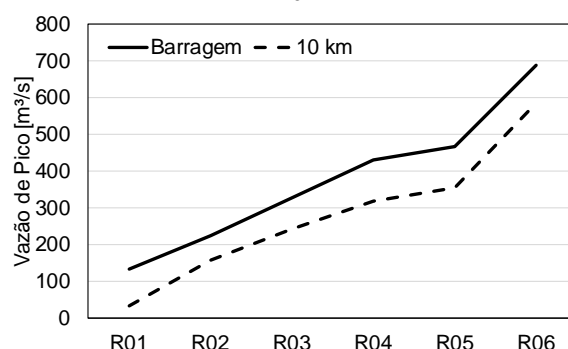
B01



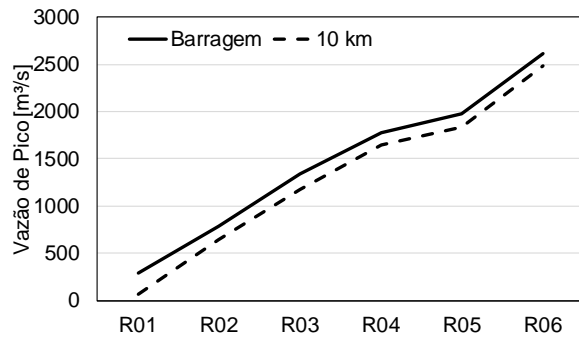
B02



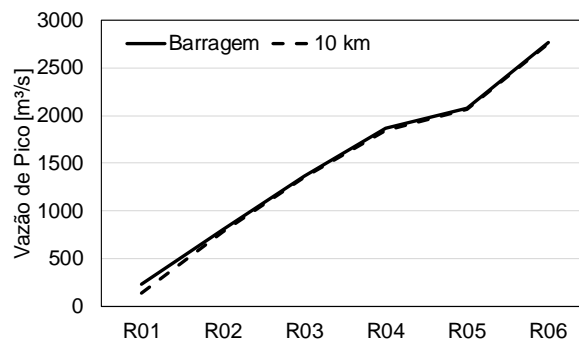
B03



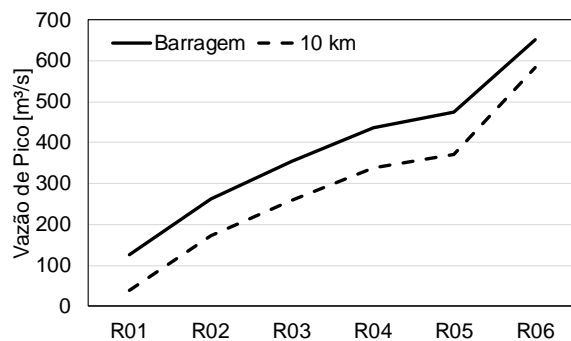
B04



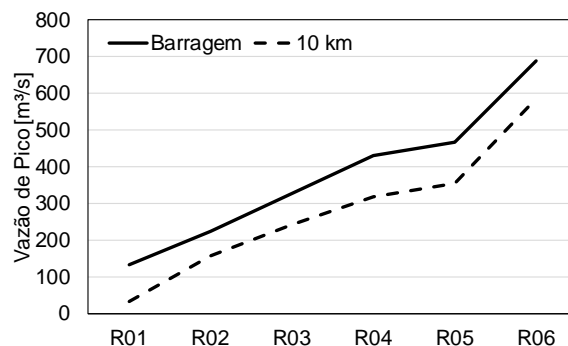
B01



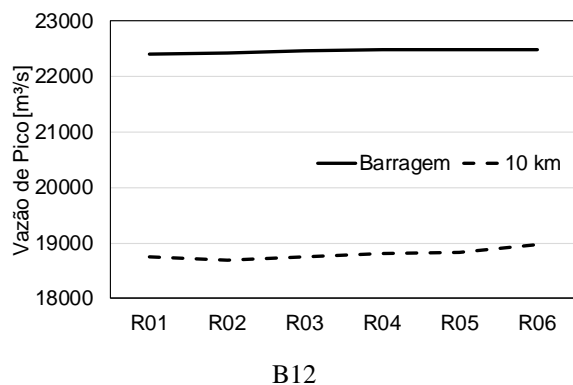
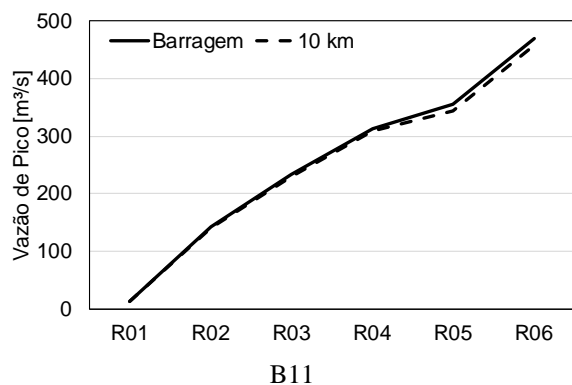
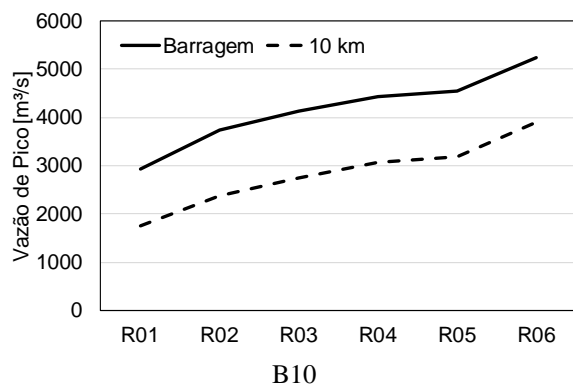
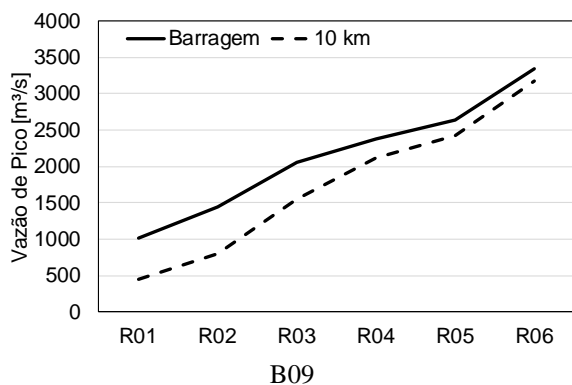
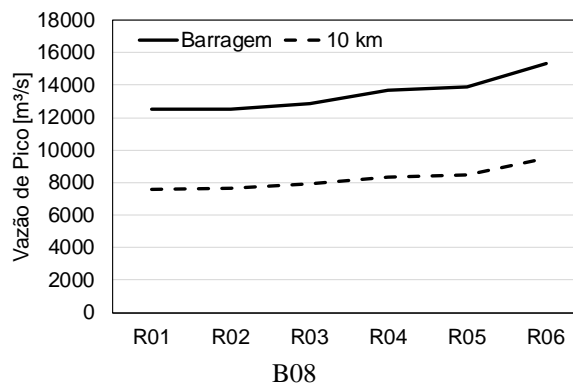
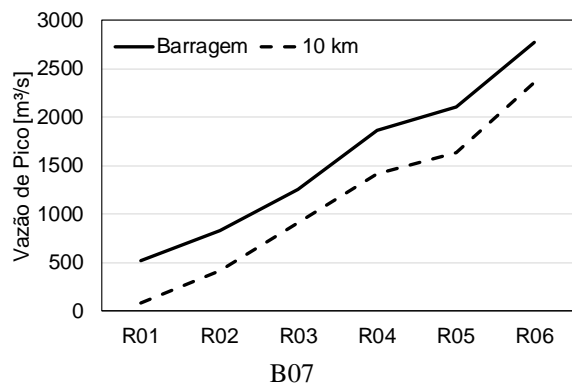
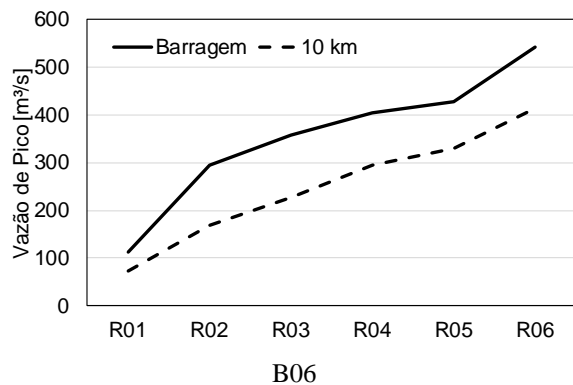
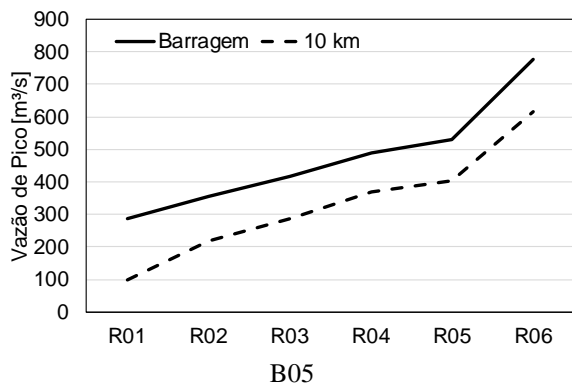
B02

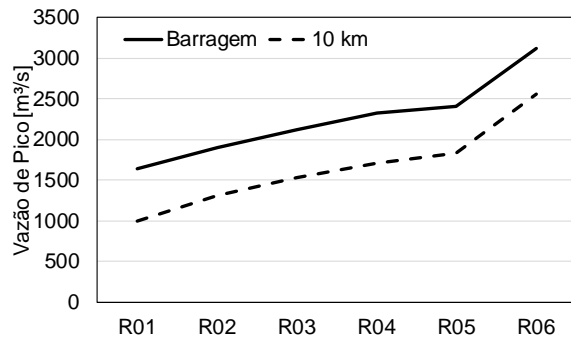


B03

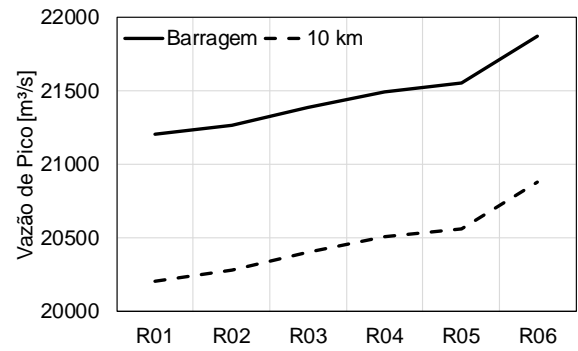


B04

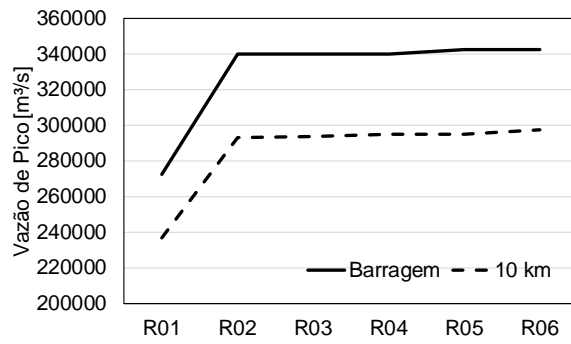




B13



B14



B15