

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Lorena Silva Saraiva**

**COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS PARA  
DETERMINAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE  
RUPTURA DE BARRAGENS**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**LORENA SILVA SARAIVA**

**COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS PARA  
DETERMINAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE  
RUPTURA DE BARRAGENS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Marcelo Giulian Marques**  
**Coorientador: Eder Daniel Teixeira**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**LORENA SILVA SARAIVA**

**COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS PARA  
DETERMINAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE  
RUPTURA DE BARRAGENS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 11 de dezembro de 2014

Prof. Marcelo Giulian Marques  
Dr. pela Université Laval  
Orientador

Prof. Eder Daniel Teixeira  
Dr. pelo IPH/UFRGS  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Marcelo Giulian Marques**  
Doutor em Département de Génie Civil pela  
Université Laval

**Profa. Daniela Guzon Sanagiotto**  
Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pelo IPH/UFRGS

**Eng. Civil Alba Mariane Kempka**  
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pelo IPH/UFRGS

**Prof. Eder Daniel Teixeira**  
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pelo IPH/UFRGS

Dedico este trabalho a minha família, em especial ao meu irmão Roberto, pela dedicação, carinho e por sempre estarem ao meu lado, principalmente durante o período do meu Curso de Graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Prof. Marcelo Giulian Marques, pela dedicação, motivação, paciência e ensinamentos durante o tempo em que trabalhamos juntos e desenvolvemos este trabalho. Além de tornar esse trabalho possível, o senhor se mostrou um grande orientador e amigo.

Agradeço ao Prof. Eder Daniel Teixeira, pela coorientação, apoio, oportunidade de aprendizado e grande contribuição na realização deste trabalho.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pelos conselhos e por sempre se mostrar disposta e acessível ao esclarecimento de dúvidas.

Agradeço aos meus amigos de longa data e da graduação, em especial, Roberto, Júlia, Natali, Carol e Fernanda, pela amizade, pela ajuda, pelos conselhos e por sempre estarem ao meu lado, tornando o período acadêmico mais feliz e menos árduo.

Agradeço especialmente à minha família pelo infinito apoio, incentivo e carinho em todos os momentos da minha vida, não somente durante a graduação. Por sempre acreditarem no meu potencial e por estarem sempre presentes e dispostos a me ajudar de todas as formas possíveis. Pela paciência e compreensão em momentos em que eu não pude estar presente por ter que estudar. Vocês são as minhas maiores motivações e uma parte essencial de cada etapa e conquista na minha vida.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

É preciso coragem para crescer e  
tornar-se o que você realmente é.

*E. E. Cummings*

## RESUMO

Este trabalho versa sobre a comparação dos critérios utilizados para a obtenção de hidrogramas de ruptura de barragens de pequeno porte (altura menor que 10 m), por meio da análise de formulações matemáticas encontradas na literatura para a determinação do processo de formação de brechas nas barragens, do hidrograma de ruptura e da vazão de pico. Este estudo visa compreender a relação entre a entrada de dados e o hidrograma de ruptura correspondente, uma vez que esse é sensível a variações de diversos parâmetros, tais como: tipo de barragem, causa de ruptura, cenário de ruptura utilizado, mecanismo e tempo de formação de brecha, etc. O rompimento de uma barragem ou de alguma de suas partes constituintes é um evento raro de pequena probabilidade de ocorrência, mas existe. Nesses casos as consequências podem ser catastróficas, uma vez que a onda de cheia resultante do esvaziamento parcial ou total do reservatório possui grande potencial de destruição devido a sua altura e velocidade elevadas. Entre as consequências estão a perda de vidas humanas, destruição da fauna e da flora locais, diminuição da eficiência ou interrupção da finalidade do aproveitamento (geração de energia, fornecimento de água para abastecimento humano ou irrigação, entre outros) e danos a propriedades, instalações e a outras barragens a jusante que podem gerar um efeito cascata. O objetivo deste trabalho foi verificar quais são as variações nos hidrogramas de ruptura de barragens de pequeno porte, utilizando diferentes critérios para a configuração dos mesmos de maneira a contribuir para o estabelecimento de padrões e procedimentos para a análise da ruptura de barragens de pequeno porte. Neste trabalho foi observado que o método que resultou na maior vazão de pico foi o de Wetmore e Fread (1981) em função do tempo de pico calculado pelo Bureau of Reclamation (1988) e da brecha, proposta por Wahl (1998), e o método que resultou no maior tempo de esvaziamento foi o do Soil Conservation Service (1981).

Palavras-chave: Ruptura de Barragem. Hidrograma de Ruptura.  
Mecanismos de Formação de Brecha em Barragens.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de barragens cuja área do reservatório supera 2 há.....	11
Figura 2 – Diagramas indicativos de como as etapas se relacionam entre si.....	16
Figura 3 – Barragens inauguradas no mundo durante o século XX.....	18
Figura 4 – Porcentagem dos rompimentos de barragem registrados conforme seu tipo...	26
Figura 5 – Estágio da evolução de ruptura de barragem por piping.....	27
Figura 6 – Exemplo de formação de brecha em uma barragem.....	31
Figura 7 – Método de determinação de hidrograma de ruptura segundo Mascarenhas (1990).....	37
Figura 8 – Relação entre $C_b$ e o volume de reservação da barragem para os dados de barragens rompidas estudadas.....	44
Figura 9 – Largura da brecha em função da altura da barragem conforme a literatura para os casos de barragens rompidas estudados.....	47
Figura 10 – Tempo de pico do hidrograma de ruptura em função da altura da barragem para os dados de barragens rompidas estudadas.....	49
Figura 11 – Vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) do hidrograma de ruptura em relação a altura de Barragem ( $H_d$ ) para as barragens rompidas estudadas.....	51
Figura 12 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Bullock Draw Dike.....	53
Figura 13 – Relações entre o volume do reservatório e altura da barragem.....	59
Figura 14 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de pequena reservação estudadas, considerando o caso 1 (maior $Q_{\text{máx}}$ ).....	63
Figura 15 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de pequena reservação estudadas, considerando o caso 2 (maior $T_b$ ).....	64
Figura 16 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de grande reservação estudadas, considerando o caso 1 (maior $Q_{\text{máx}}$ ).....	65
Figura 17 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de pequena reservação estudadas, considerando o caso 1 (maior $T_b$ ).....	65
Figura 18 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Bullock Draw Dike.....	72
Figura 19 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Frankfurt.....	72
Figura 20 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Frenchman Creek.....	73
Figura 21 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Goose Creek.....	73
Figura 22 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Johnston City.....	74
Figura 23 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Kelly Barnes.....	74
Figura 24 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Lake Frances.....	75
Figura 25 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Rito Manzanares.....	75
Figura 26 - Hidrogramas de ruptura para a barragem de Sheep Creek.....	76



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Distribuição das barragens de uso único construídas no mundo, conforme sua finalidade.....	20
Quadro 2 – Critérios para determinação da largura da brecha conforme a literatura.....	32
Quadro 3 – Determinação do $C_b$ em função do volume do reservatório da barragem.....	32
Quadro 4 – Determinação do tempo de formação da brecha de acordo com a literatura.	32
Quadro 5 – Formulações matemáticas para determinação da vazão de pico independentes da brecha.....	34
Quadro 6 – Características gerais e de brecha de dados históricos de ruptura.....	43
Quadro 7 – Valores de $C_b$ para os dados de barragens rompidas estudadas.....	44
Quadro 8 – Caracterização do reservatório das barragens analisadas no momento da ruptura.....	45
Quadro 9 – Valores de largura de brecha ( $B_b$ ), em metros, calculados conforme a literatura para os dados históricos de ruptura de barragens estudados.....	46
Quadro 10 – Tempo de pico ( $T_p$ ) em horas conforme a literatura para os dados históricos de ruptura de barragens estudados.....	48
Quadro 11 – Vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) em $m^3/s$ de acordo com os autores estudados para os dados históricos de ruptura de barragens estudados.....	50
Quadro 12 – Cenários analisados para a barragem de Bullock Draw Dike.....	52
Quadro 13 – Resultados de Vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) e tempo de base ( $T_b$ ) para a barragem de Bullock Draw Dike.....	52
Quadro 14 – Apresentação dos valores de $\beta_\lambda$ para as barragens rompidas estudadas, conforme os mecanismos de formação de brecha analisados.....	54
Quadro 15 – Apresentação dos valores de $\tau_\lambda$ para as barragens rompidas estudadas, conforme os mecanismos de formação de brecha analisados.....	55
Quadro 16 – Valores de $\varepsilon_\lambda$ para as barragens rompidas estudadas, conforme os mecanismos de formação de brecha analisados.....	57
Quadro 17 – Cálculo da brecha, tempo de pico, vazões máximas e tempo de base para as barragens hipotéticas estudadas.....	60
Quadro 18 – Valores de $\beta_\lambda$ para as barragens hipotéticas estudadas.....	60
Quadro 19 – Valores de $\tau_\lambda$ para as barragens hipotéticas estudadas.....	61
Quadro 20 – Valores de $\varepsilon_\lambda$ para as barragens hipotéticas estudadas.....	62

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....</b>	<b>14</b>
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	14
<b>2.2.1 Objetivo Principal.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 Objetivo Secundário.....</b>	<b>14</b>
2.3 PREMISSA.....	14
2.4 DELIMITAÇÕES.....	15
2.5 LIMITAÇÕES.....	15
2.6 DELINEAMENTO.....	15
<b>3 BARRAGENS.....</b>	<b>18</b>
3.1 DEFINIÇÃO.....	18
3.2 HISTÓRICO.....	18
3.3 FINALIDADE.....	19
3.4 TIPO.....	20
3.5 CLASSIFICAÇÃO.....	21
<b>4 RUPTURA DE BARRAGENS.....</b>	<b>24</b>
4.1 ANÁLISE DO RISCO.....	24
4.2 CAUSAS DE RUPTURA.....	25
<b>4.2.1 Erosão Interna (<i>piping</i>).....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.2 Galgamento (<i>overtopping</i>).....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.3 Defeitos na Fundação.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.4 Sismos e Terremotos.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.5 Falhas de Projeto, Construção ou Operação.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.6 Ações de Guerra.....</b>	<b>29</b>
4.3 CENÁRIOS DE RUPTURA.....	29
4.4 MECANISMO E TEMPO DE FORMAÇÃO DA BRECHA.....	30
4.5 DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA.....	33
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
5.1 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	40
<b>5.1.1 Levantamento dos critérios de formação de brecha.....</b>	<b>41</b>

<b>5.1.2 Levantamento dos critérios para determinação do hidrograma formado junto a barragem quando da ruptura.....</b>	<b>41</b>
<b>5.1.3 Levantamento de dados de barragens de terra de pequeno porte que romperam.....</b>	<b>41</b>
5.1.3.1 Bullock Draw Dike.....	41
5.1.3.2 Frankfurt.....	41
5.1.3.3 Frenchman Creek.....	42
5.1.3.4 Goose Creek.....	42
5.1.3.5 Johnston City.....	42
5.1.3.6 Kelly Barnes.....	42
5.1.3.7 Lake Frances.....	42
5.1.3.8 Rito Manzanares.....	43
5.1.3.9 Sheep Creek.....	43
<b>5.1.4 Análise da vazão máxima e do tempo de base críticos para as barragens levantadas.....</b>	<b>43</b>
5.2 ADIMENSIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS.....	53
5.3 BARRAGENS HIPOTÉTICAS ESTUDADAS.....	58
<b>5.3.1 Determinação das características das barragens hipotéticas estudadas.....</b>	<b>58</b>
<b>5.3.2 Hidrogramas de ruptura das barragens hipotéticas.....</b>	<b>62</b>
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO A – HIDROGRAMAS DE RUPTURA DE BARRAGENS PARA 9 CASOS HISTÓRICOS DE FALHA DE BARRAGENS DE TERRA.....</b>	<b>72</b>



## 1 INTRODUÇÃO

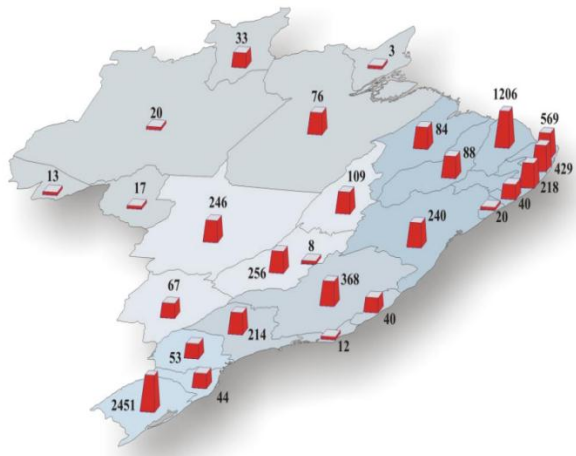
Uma barragem, açude ou represa é uma barreira artificial feita em cursos de água para a retenção de grandes quantidades de água. Uma barragem deve permitir a utilização de maneira racional dos recursos hídricos, adequando a sua disponibilidade à necessidade de quantidade e qualidade no tempo e no espaço. As barragens podem atender diferentes usos e possuir várias finalidades, sendo que a maior parte das barragens, aproximadamente 49%, são implantadas visando a irrigação. (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008).

Hoje, estima-se que existam mais de 50.000 barragens com altura ( $H_d$ ) maior ou igual a 15m e/ou com volume de armazenamento maior ou igual a  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. Vale salientar que a maior parte destas barragens foi construída após 1950, cerca de 45.000 barragens. (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008).

No Brasil, acredita-se que existam mais de:

- a) 3600 barragens com mais de 15 metros de altura;
- b) 6656 barragens com área de reservatório superior a 20 ha (ver figura 1);
- c) 215.000 pequenas barragens ( $H_d > 5$ m).

Figura 1 – Distribuição de barragens cuja área do reservatório supera 2 ha.



(fonte: notas de aula da disciplina IPH 2004 – Obras hidráulicas).

A construção deste tipo de estrutura acarreta elevado potencial de risco para regiões a jusante da mesma em decorrência da possibilidade de uma eventual ruptura da barragem ou estruturas associadas a ela. O rompimento de uma barragem ou de alguma de suas partes constituintes é um evento raro, porém de consequências potencialmente devastadoras. Situações de ruptura podem acarretar elevadas perdas sociais, ambientais, estruturais e econômicas. Entre estas, pode-se citar, principalmente, a perda de vidas humanas, destruição da fauna e da flora locais, diminuição da eficiência ou interrupção na geração de energia e fornecimento de água e danos à propriedades, instalações e outras barragens a jusante. Isto ocorre em decorrência da formação abrupta de uma onda de cheia de grande altura e velocidade no canal de jusante, gerada através da liberação parcial ou total do volume do reservatório. O índice aceitável de risco de ruptura em uma barragem é de aproximadamente 0,01% (1:10.000). Não existe risco nulo.

Segundo Menescal (2007), no Brasil, em média, aconteceram cerca de 400 acidentes com barragens de diversos tamanhos e tipos apenas entre 2001 e 2006. As causas mais frequentes de rompimento de uma barragem são as rupturas por galgamento. Essa causa ocorre em cerca de 60% dos eventos. A maior parte dos acidentes e incidentes ocorre na fase de enchimento e nos primeiros 10 anos de operação, sendo que cerca de 53% dos casos são em barragens de terra, e mais de 60% ocorrem em barragens com menos de 30 m.

Considerando a importância das barragens nos seus diferentes usos e o seu expressivo número, fica evidente a importância desse tipo de estudo, principalmente para as barragens de pequeno porte ( $H_d \leq 10$  m), que possuem projetos mais simples, em que a construção e operação muitas vezes são precárias, o que pode vir a aumentar o risco de ruptura. Dessa forma, é necessário conhecer os efeitos da ruptura para saber quais medidas preventivas devem ser adotadas, tais como sistema de alerta, evacuação, etc.

Em 2010, foi promulgada a Lei nº 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança para Barragem que rege barragens com:

- a) altura  $\geq 15$  m;
- b) volume armazenado  $\geq 3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>;
- c) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- d) categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Existem, na literatura, diversas formulações matemáticas propostas para o estabelecimento de hidrogramas de ruptura de barragens. Esses hidrogramas são sensíveis a variações na entrada de dados que resultam em hidrogramas diversos, com inundações a jusante distintas.

Este trabalho teve como objetivo comparar os critérios para determinação de hidrogramas de ruptura de barragens de terra de pequeno porte em um evento de ruptura, através da análise das diferentes formulações matemáticas para o estabelecimento da vazão de pico e do processo de formação de brecha presentes na literatura.

Essas análises podem contribuir para o estabelecimento de padrões e uniformização de procedimentos. Estes padrões e procedimentos podem, inclusive, vir a ser utilizados como fundamentos técnicos para o embasamento da legislação necessária para regulamentar a construção de barragens de pequeno porte com segurança, evitando todas as consequências negativas acarretadas por uma eventual ruptura.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: quais são as variações nos hidrogramas de ruptura de barragem de pequeno porte, utilizando diferentes critérios de configuração para obtê-los?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a comparação e a análise dos diferentes critérios de configuração de hidrogramas de ruptura de barragem aplicados as de pequeno porte.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

Os objetivos secundários do trabalho são a apresentação de dados de ruptura de pequenas barragens de terra para a definição dos critérios e parâmetros para calcular barragens hipotéticas a serem consideradas na comparação.

### **2.3 PREMISSA**

O trabalho tem por premissa que os hidrogramas de ruptura de barragem são influenciados pelos parâmetros de formação de brecha e as características de altura e reservação da barragem. Sendo assim, a influência desses parâmetros deve ser estudada.



## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a realizar uma análise dos hidrogramas de ruptura de barragens hipotéticas com características variáveis de altura do barramento e volume do reservatório.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

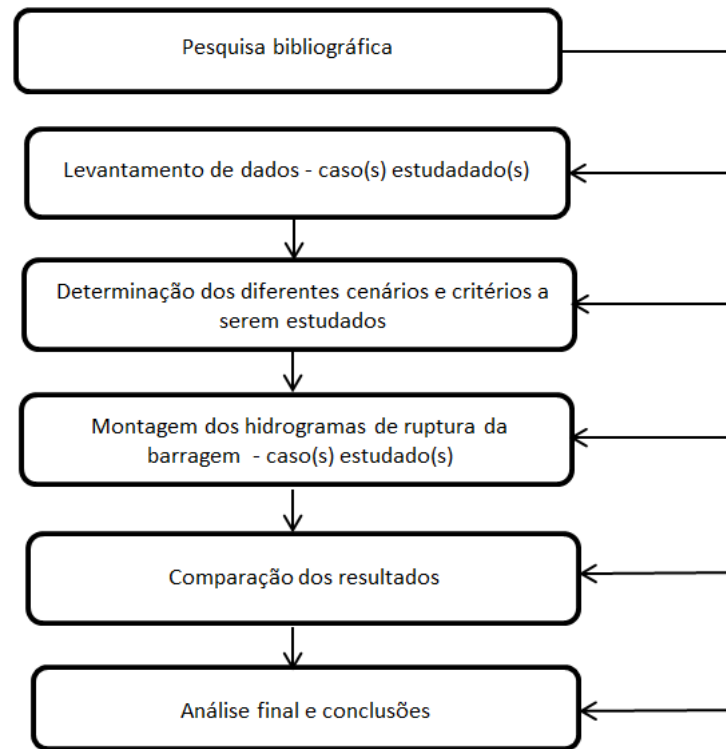
- a) barragens de terra de pequeno porte;
- b) número limitado de dados de ruptura de barragens e de critérios de configuração de hidrogramas utilizados.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 2, e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) levantamento de dados – caso (s) estudado(s);
- c) determinação dos diferentes cenários e critérios a serem estudados;
- d) montagem dos hidrogramas de ruptura de barragem – caso (s) estudado(s);
- e) comparação dos resultados;
- f) análise final e conclusões.

Figura 2 – Diagramas indicativos de como as etapas se relacionam entre si.



(fonte: elaborada pela autora)

Ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho foi realizada pesquisa bibliográfica visando sempre aprimorar e atualizar o embasamento teórico do trabalho. Na etapa de levantamento de dados, foram coletadas informações necessárias para determinação de critérios que foram aplicados nos casos estudados. Para tanto foram utilizados dados históricos, tais como altura da barragem, volume de reservação, largura do coroamento, inclinação dos taludes a montante e a jusante, forma e tempo de formação da brecha, tempo de duração da falha, etc.

Para cada barragem existe um grande número de cenários hipotéticos de ruptura possíveis, que acarretam vazões de pico e hidrogramas de ruptura distintos. Em decorrência do grande número de incertezas presentes neste tipo de estudo, na prática é necessário considerar diferentes cenários para fins de validação, portanto, na etapa de determinação dos diferentes cenários e critérios a serem estudados, foram definidos as condições a serem simuladas, bem como os diferentes critérios que podem vir a influenciar os hidrogramas de ruptura e suas respectivas propagações.

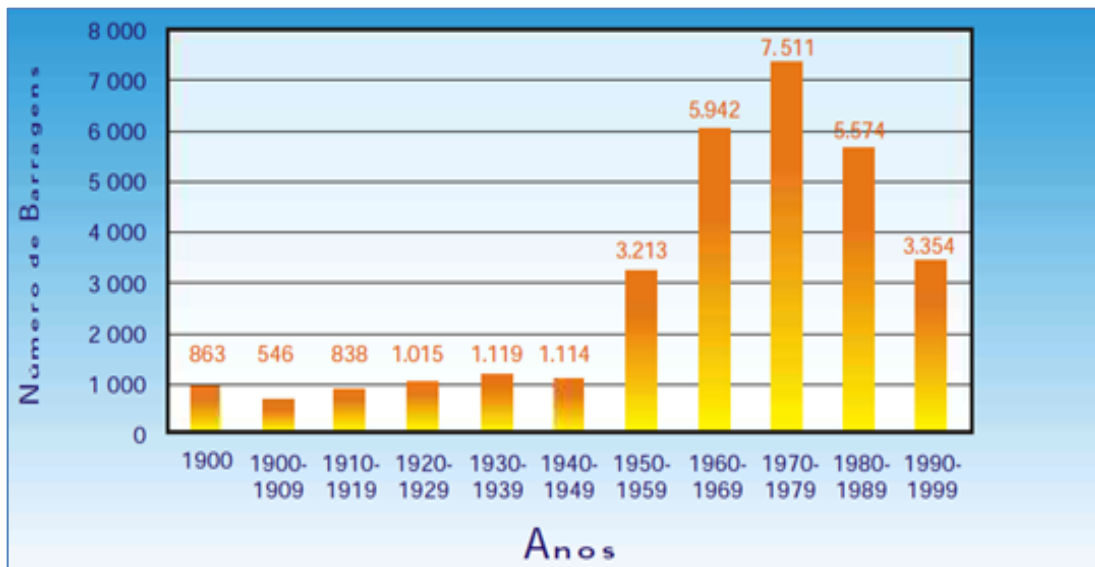
Na etapa de montagem dos hidrogramas de ruptura de barragem – caso(s) estudado(s) – foram utilizadas diversas abordagens e formulações matemáticas para estabelecer a vazão de pico defluente em decorrência de ruptura a partir das características da barragem e da brecha de ruptura. Por fim, nas etapas de comparação dos resultados e análise final e conclusões, foi determinado de que forma os diferentes critérios analisados afetam o hidrograma de ruptura da barragem. Além disso, foram determinadas relações adimensionais para uma estimativa inicial da vazão máxima oriunda de um evento de ruptura de barragem, da largura da brecha e de seu tempo de formação.

### 3. BARRAGENS

#### 3.1 DEFINIÇÃO

O termo barragem é utilizado para descrever estruturas que cruzam e confinam corpos de água com o intuito de armazenar água e controlar o seu fluxo. Barragens podem variar entre pequenos maciços de terra a grandes estruturas de concreto e têm a finalidade de fornecer água ou gerar energia, ou ainda, viabilizar a irrigação de uma determinada região. A figura 3 apresenta a evolução do número de barragens construídas no mundo durante o século XX. (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008).

Figura 3 – Barragens inauguradas no mundo durante o século XX.



(fonte: COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008)

#### 3.2 HISTÓRICO

Conforme a Comissão Internacional de Grandes Barragens (2008), historicamente as barragens representaram uma grande evolução para a civilização, pois permitiram que a água fosse coletada e armazenada em períodos de abundância e utilizada em períodos de seca. Estudos recentes indicam que barragens já eram utilizadas em 2000 A.C.

Entre o período romano e o século XVI as técnicas para a construção de barragens não se modificaram significativamente. Apenas no século XIX engenheiros europeus modernizaram e ampliaram os conhecimentos a respeito da construção de barragens, permitindo a construção de estruturas maiores. Neste período as funções tradicionais das barragens também sofreram uma ampliação sendo, a partir de então, utilizadas também para navegação, fornecimento de energia elétrica e lazer. (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008).

### 3.3 FINALIDADE

A finalidade de uma barragem pode variar entre o simples armazenamento de água para lazer até finalidades de grande relevância social, econômica e ambiental, como em casos de barragens utilizadas para irrigação ou para geração energia, ou ainda, utilizadas para navegação, controle de sedimentação e controle de enchentes. As barragens podem possuir apenas uma finalidade ou várias, sendo classificadas nesse sentido em barragens de função única ou barragens de usos múltiplos. (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008).

Com relação à evolução histórica de barragens de função única para barragens de usos múltiplos, a mesma organização comenta:

Assim como é o caso de todas as grandes estruturas públicas e privadas, as barragens são construídas para um fim específico. No passado, as barragens eram construídas com o único propósito de fornecimento de água ou irrigação. À medida que as civilizações se desenvolveram, cresceram as necessidades de fornecimento de água, irrigação, controle de enchentes, navegação, controle de qualidade da água, controle de sedimentos e energia. As barragens são, portanto, construídas para um fim específico tal como fornecimento de água, controle de enchentes, irrigação, navegação, controle de sedimentos e energia hidrelétrica. A recreação é às vezes incluída em benefício da população. As barragens são as bases do desenvolvimento e da gestão dos recursos hídricos das bacias fluviais. As barragens de usos múltiplos são projetos muito importantes para países em desenvolvimento, pois as populações recebem benefícios domésticos e econômicos de um único investimento.

Conforme a Comissão Internacional de Grandes Barragens (2008), o número de barragens de usos múltiplos esteja aumentando nos últimos anos, representando em torno de 28,3% das barragens do mundo. No entanto, a predominância de barragens de função única é evidente, representando cerca de 71,7% das barragens construídas no mundo. No quadro 1 a seguir apresenta a distribuição das barragens de uso único, conforme sua finalidade.

Quadro 1 – Distribuição das barragens de uso único construídas no mundo, conforme sua finalidade.

Finalidade	Distribuição (%)
Irrigação	48,6
Hidreletricidade	17,4
Suprimento de água	12,7
Controle de enchentes	10,0
Recreação	5,3
Navegação e piscicultura	0,6
Outras	5,4

(fonte: COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008)

### 3.4 TIPO

As barragens são classificadas também pelo material utilizado na sua construção. Nessa classificação podemos observar barragens construídas com concreto, alvenaria ou ainda com pedras, que são denominadas barragens em arco, barragens de gravidade ou barragens de contraforte, e as barragens construídas com terra ou com terra e rochas, denominadas barragens de aterro. (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2008).

Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens (2008), cada tipo de barragem possui características que o distingue dos demais e essas características influem na quantidade de material necessário para a sua construção, por exemplo, as barragens de gravidade exigem muito mais concreto na sua construção que as barragens em arco do mesmo comprimento.

Os principais tipos de barragens no mundo são as de terra, gravidade e enrocamento. O tipo mais predominante de barragens é o de terra, constituindo 43,7% do número total de barragens construídas no mundo. As barragens de gravidade representam em torno de 10,6% e as de enrocamento são responsáveis por cerca de 5,3% do número total mundial.

As barragens de terra são comparativamente mais baratas e tecnicamente menos complexas que outros tipos de barragens, motivo pelo qual esse é o tipo de barragem que foi utilizado primeiro por civilizações antigas para armazenar e desviar água e permanece em uso até os dias de hoje em situações em que outros tipos de barragens não são economicamente vantajosos ou em que há escassez de recursos tecnológicos. São raras as circunstâncias em que o cultivo de terra gera riqueza suficiente para justificar um grande investimento como a

construção de uma barragem de tipo mais complexo. (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA, 2011).

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, barragens de aterro construídas em local adequado, bem projetadas e com bons materiais provenientes de terraplanagem podem ser construídas com equipamentos e projetos pouco sofisticados.

Afirma a organização:

As barragens de terras têm sido usadas, desde os tempos mais remotos, para aprisionar e desviar água. São simplesmente estruturas compactadas que dependem da sua massa para resistir ao deslizamento e tombamento e são o tipo de barragem mais comum encontrado em todo o Mundo.(...) Tratores agrícolas (equipados com pá carregadora, pá de arrasto e rolo compactador) são normalmente adequados para a construção de barragens de terra que, uma vez completadas, deverão ter custado menos do que uma parede de betão, com o seu projeto e procedimentos de construção mais complexos. Barragens de terra menores necessitam de manutenção mínima (a não ser em locais difíceis ou em condições extraordinárias de clima) e são mais capazes de suportar movimentos da fundação e das ombreiras do que estruturas mais rígidas em pedra ou betão. Podem ser obtidas vantagens adicionais construindo o aterro com materiais provenientes da escavação da área do reservatório. Isto dá um pequeno aumento da capacidade de armazenamento e redução de custos. A construção na base de camada permite uma boa compactação e estabilidade e, se os parâmetros do descarregador/vertedor permitirem, a programação de um calendário de construção flexível.

No âmbito deste trabalho serão analisados apenas casos de rupturas de barragens de terra de altura menor ou igual a 10 metros, de tal forma que não seja necessário calcular sua estabilidade. Este tipo de barragem, em função das suas características, geralmente é utilizado para irrigação, finalidade predominante dentre todas as barragens construídas no mundo.

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO

Para fins de classificação de barragens de rejeito, no que se refere ao volume do reservatório, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (2012), no seu Art. 6, define:

- I - muito pequena: reservatório com volume total inferior ou igual a 500 mil metros cúbicos;
- II - pequena: reservatório com volume total superior a 500 mil metros cúbicos e inferior ou igual a 5 milhões de metros cúbicos;
- III - média: reservatório com volume total superior a 5 milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a 25 milhões de metros cúbicos;

IV - grande: reservatório com volume total superior a 25 milhões e inferior ou igual a 50 milhões de metros cúbicos; e

V - muito grande: reservatório com volume total superior a 50 milhões de metros cúbicos.

Quanto à classificação de barragens para acumulação de água, no que se refere ao volume do reservatório, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (2012), no seu Art. 7, considera:

I - pequena: reservatório com volume inferior ou igual a 5 milhões de metros cúbicos;

II - média: reservatório com volume superior a 5 milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a 75 milhões de metros cúbicos;

III - grande: reservatório com volume superior a 75 milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a 200 milhões de metros cúbicos; e

IV - muito grande: reservatório com volume superior a 200 milhões de metros cúbicos.

No que diz respeito às categorias de risco, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (2012), no seu Art. 4., classifica as barragens quanto a suas características que podem vir a impactar a eventualidade de ocorrência de acidente, de acordo com os seguintes critérios gerais:

I - características técnicas:

a) altura do barramento;

b) comprimento do coroamento da barragem;

c) tipo de barragem quanto ao material de construção;

d) tipo de fundação da barragem;

e) idade da barragem;

f) tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro;

II - estado de conservação da barragem:

a) confiabilidade das estruturas extravasoras;

b) confiabilidade das estruturas de captação;

c) eclusa;

d) percolação;

e) deformações e recalques;



f) deterioração dos taludes.

III - plano de segurança da barragem:

- a) existência de documentação de projeto;
- b) estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem;
- c) procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento;
- d) regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; e
- e) relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.

No que diz respeito ao dano potencial associado na área afetada, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (2012), no seu Art. 5, adota os seguintes critérios gerais para classificação de barragens:

- a) existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- b) existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- c) existência de infraestrutura ou serviços;
- d) existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- e) existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- f) natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e
- g) volume.

## 4 RUPTURA DE BARRAGENS

O fenômeno de ruptura de barragens está associado aos seguintes fatores determinantes: risco, causas da ruptura, cenários, mecanismo e tempo de formação da brecha, levantamento de dados, coeficiente de rugosidade adotado, determinação do hidrograma de ruptura, modelagem da onda de ruptura, etc. Esses fatores são descritos mais detalhadamente nos próximos itens.

### 4.1 ANÁLISE DO RISCO

Desde o início da civilização, a natureza vem sendo adaptada para sobrevivência e o desenvolvimento humano, buscando suprir suas necessidades e aprimorar as condições de vida das populações que habitam cada região. Nesse processo, novas tecnologias foram surgindo, sendo responsáveis pelo sucesso ou desaparecimento de civilizações inteiras.

Dentre essas tecnologias, a capacidade de dominar o meio ambiente através da construção civil, desde os tempos antigos, se sobressai como um fator decisivo para a evolução e o desenvolvimento da sociedade. Entretanto, até mesmo nas construções, criadas também com o objetivo de reduzir os riscos de viver na natureza, estão intrínsecos outros novos riscos, mas estes são mais facilmente previstos e/ou controlados.

Quanto maior a magnitude da obra e das alterações do meio ambiente realizadas, maiores são os riscos inerentes a sua execução. Desde o seu surgimento até os dias atuais, uma das estruturas que melhor representam essa situação são as barragens.

Por se tratar de uma estrutura tão impactante ao meio ambiente e à sociedade, muitos riscos estão envolvidos na construção de barragens, tornando imperiosa a busca constante pela segurança. São exemplos desses riscos que devem ser considerados em um evento de ruptura da barragem propriamente dita e/ou de alguma de suas estruturas constituintes, a vulnerabilidade da população que vive nas proximidades da barragem e a jusante da mesma, da flora e da fauna locais, dos trabalhadores que realizam a obra, entre outros.

Nesse sentido, ensina Balbi (2008) que a engenharia deve sempre visar à segurança como seu objetivo principal nas fases de projeto, construção e operação de qualquer obra, especialmente no caso de barragens. Apesar da preocupação constante com a segurança e zelo, o autor reconhece que nunca é possível extinguir totalmente os riscos, devendo estes ser monitorados e contidos por meio de mecanismos e procedimentos que identifiquem possíveis situações de risco antes que essas se manifestem, além de meios para reduzi-las.

Viseu e Almeida (2011, p. 34) afirmam que:

A frequência dos acidentes associados a grandes barragens tem diminuído ao longo do tempo em resultado da melhoria nos conhecimentos científicos e tecnológicos e do controle da qualidade e da segurança respectivamente nas fases de projeto, construção e de exploração. Como ordem de grandeza pode indicar-se o valor de  $10^{-4}$  para a frequência anual média de rotura de grandes barragens. No caso de uma barragem nova, a probabilidade estimada é tipicamente da ordem de  $10^{-6}$ . É de salientar que cada barragem pode ser considerada como um caso isolado com fatores de risco e características próprias que a diferenciam de outras situações.

## 4.2 CAUSAS DE RUPTURA

De acordo com Mascarenhas (1990), o evento de ruptura de barragens é, em geral, resultante da ocorrência simultânea, ou não, de causas materiais, naturais ou em decorrência de intervenção humana. Conforme Collischonn (1997), o tipo de barragem é um fator determinante para a causa da ruptura, sendo as barragens de concreto mais sensíveis a problemas estruturais ou de fundação, e as barragens de terra mais vulneráveis a galgamentos e a erosão interna.

No caso de galgamento em barragens de terra, há a ocorrência de erosão do talude de jusante da barragem, formando uma brecha que atua de forma regressiva. Quando infiltrações e entupimentos dos sistemas de drenagem internos da barragem são responsáveis pelo evento de ruptura, as brechas são iniciadas nos pontos de vazamento e crescem a partir dos mesmos para todas as direções. (COLLISCHONN, 1997).

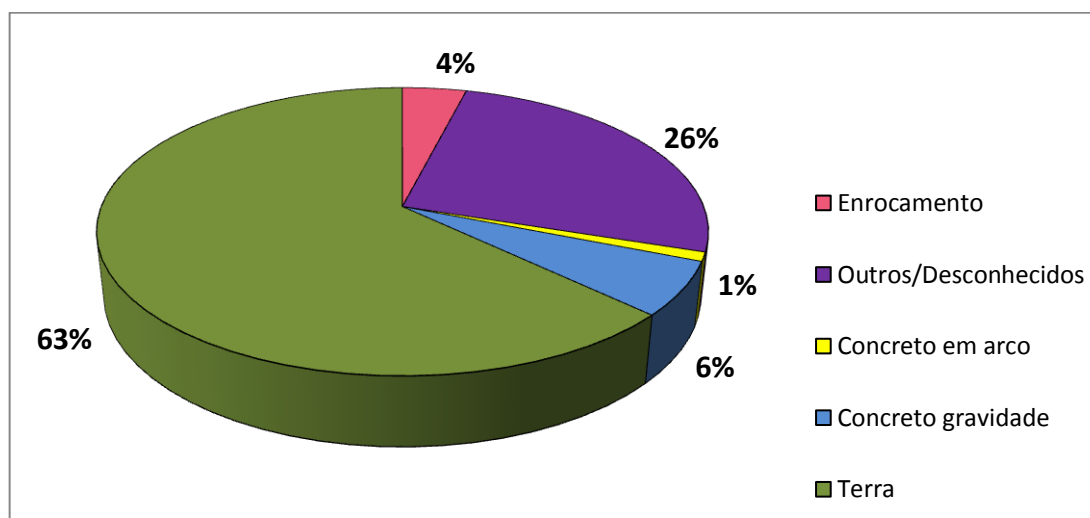
Na figura 4 apresentada a seguir, é possível observar o maior número de rompimento de barragens de terra em comparação com outros tipos. Segundo Serafim (1981)<sup>1</sup> apud Collischonn (1997), esse fato é parcialmente consequência do maior número de barragens de terra existentes. Ainda conforme o autor, quando é feita uma análise do número de

---

<sup>1</sup>SERAFIM, J. L. Safety of dams judged from failures. **Water Power And Dam Construction**, Sutton, v. 33, n. 12, p.32-35, dez. 1981. Mensal

rompimentos relativa ao número de barragens de concreto existentes, os resultados são similares aos de barragens de terra.

Figura 4 – Porcentagem dos rompimentos de barragem registrados conforme seu tipo.



(fonte: FRANZINI E MCCANN<sup>2</sup> 1988 apud COLLISCHONN 1997)

Existem diversas causas que podem resultar em ruptura de uma barragem: erosão interna ou *piping*, galgamento ou *overtopping*, defeitos na fundação, sismos e terremotos, falhas de projeto, construção ou operação e ações de guerra. Essas causas estão descritas a seguir.

#### 4.2.1 Erosão Interna (*piping*)

Segundo Ladeira (2007, p.6):

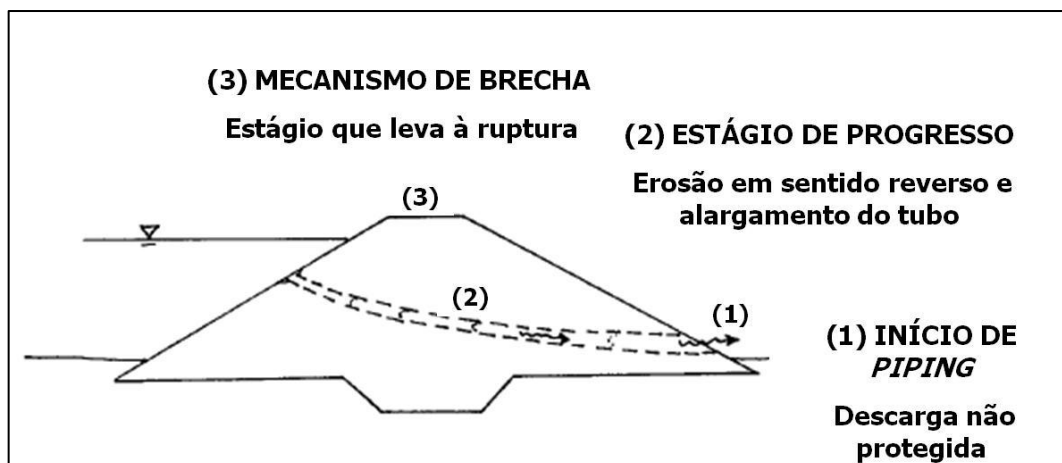
A falha por *piping* é um fenômeno que ocorre por erosão regressiva, onde há formação de um tubo, originado do carreamento de grumos de silte e argila, de jusante para montante no maciço de terra compactada em uma barragem. Esse tubo tende a aumentar seu diâmetro à medida que a água percola pelo solo compactado.

Na figura 5, é apresentado um esquema de como se desenvolve o fenômeno de erosão interna ou *piping*. Conforme Ladeira (2007, p. 7), a figura “[...] mostra o mecanismo de progresso da erosão regressiva, passando à formação de entubamento concentrado no maciço até o

<sup>2</sup>FRANZINI, J B; MCCAN, M. **Análise de risco na segurança de barragens**. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), 1988. 4 volumes.

progresso e o alargamento na forma de brecha, com conseqüente ruptura da crista e vertimento de toda a água do reservatório.”.

Figura 5 – Estágio da evolução de ruptura de barragem por piping.



(fonte: FOSTER et al<sup>3</sup>., 1998 apud LADEIRA, 2007)

#### 4.2.2 Galgamento (*overtopping*)

O galgamento ou *overtopping* ocorre quando o vertedouro da barragem não consegue extravasar completamente grandes volumes de água afluentes do reservatório. Sendo assim, parte dessa vazão, que não pôde ser liberada pelo vertedor, acaba escoando por outras partes da barragem que não foram projetadas para suportar esse tipo de esforço. Dessa forma, esse tipo de falha pode acarretar deslizamentos em barragens de gravidade e destruição parcial ou total no caso de barragens de terra ou de enrocamento, mais suscetíveis a esse tipo de falha devido à presença de material constituinte solto (MASCARENHAS, 1990).

De acordo com Collischonn (1997), o galgamento pode ser causado por:

- a) má operação do reservatório durante a cheia;
- b) ocasião de uma cheia extraordinária, para a qual o vertedouro seja incapaz de verter essa cheia afluyente;
- c) formação de uma onda dentro do reservatório, de origem sísmica ou provocada pelo deslizamento de uma grande quantidade de terra de encostas.

<sup>3</sup>FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents**. Sydney, 1998. UNICIV Reportn.R-374 – UNSW

Collischonn (1997, p. 14) também constata que “Se o tempo e a intensidade do galgamento são suficientes, inicia-se uma brecha em um ponto qualquer mais fraco na crista da barragem, e essa brecha cresce com o tempo, por erosão, em uma velocidade que depende do material da barragem e das características do reservatório.”.

### **4.2.3 Defeitos na Fundação**

As barragens, na extensão de suas fundações e ombreiras, devem ter estabilidade tal que sejam capazes de resistir a condições de carregamentos normais de projeto, bem como carregamentos extremos, sendo a escolha do critério de segurança para este fator dada em função das consequências de ruptura das barragens. Para tanto, é essencial avaliar a natureza do contato rocha-barragem, bem como sua forma e característica da fundação, sendo necessária a realização de impermeabilizações e vedações em função do tempo para os casos em que houver exposição de fundações ou contato direto desta com o maciço de terra (BRASIL, 2002),

Conforme Mascarenhas (1990, p. 21-22):

As características da deformação dos materiais constituintes das fundações da barragem são de difícil previsão e a avaliação dos efeitos climáticos e de construção não muito criteriosa torna-se incerta com respeito ao deslizamento das fundações e/ou enrocamento. Em geral, fundações com resistência não satisfatória a tensões ou que apresentem ligações compostas de materiais como argila, por exemplo, são vulneráveis ao deslizamento. A utilização de materiais impermeáveis em juntas de ligação pode também contribuir no deslizamento, se a infiltração por meio desses materiais não for monitorada para controle.

### **4.2.4 Sismos e Terremotos**

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (Brasil, 2002), barragens devem ser projetadas, construídas e operadas de modo que sejam capazes de resistir, sem perda da capacidade do reservatório de serviço, a movimentações de suas fundações em decorrência do Sismo Máximo de Projeto (SMP), escolhido de acordo com as consequências de ruptura das barragens, ou em casos excepcionais com base em carregamentos sísmicos artificiais oriundos de ação humana ou induzidos pelo reservatório. O SMP é determinado em função do local de acordo com as condições tectônicas do mesmo e sua distância ao epicentro do sismo e levando em consideração características sísmicas específicas, tais como velocidade, aceleração, espectros de resposta, etc.

#### **4.2.5 Falhas de Projeto, Construção ou Operação**

As barragens, assim como as demais obras de engenharia, estão sujeitas a falhas por causas humanas, ainda que sejam aplicados em seu projeto e construção critérios especialmente rigorosos e cuidadosos devido à complexidade do funcionamento desse tipo de estrutura. Dentre as falhas dessa natureza que podem ocorrer, ressaltam-se projetos ineficientes de vertedouros e análise dos materiais constituintes da obra com nível aquém do necessário (MASCARENHAS, 1990).

#### **4.2.6 Ações de Guerra**

Em um evento de guerra, as barragens tornam-se pontos estratégicos para ataque em decorrência de sua grande importância econômica e energética para o país, bem como seu grande potencial destrutivo em caso de ruptura, podendo acarretar danos até da mesma ordem que um bombardeio bélico. Vale ressaltar que ainda que seja necessário levar em consideração a ocorrência desse tipo de acidente de acordo com a região em que a barragem está localizada e as questões políticas envolvidas, não há muito que possa ser feito para impedir ou contornar situações dessa natureza (MASCARENHAS, 1990).

### **4.3 CENÁRIOS DE RUPTURA**

O cenário de ruptura de uma barragem pode ser definido como um arranjo único de circunstâncias distintas que são de interesse para fins de avaliação de riscos e podem ou não influenciar uma ruptura hipotética. Entre essas circunstâncias, pode-se citar, entre outros: evento iniciador, velocidade do vento, nível de água no reservatório, disposição das comportas, mecanismo de ruptura, onda de cheia oriunda de ruptura, parâmetros que determinam a presença de pessoas a jusante da barragem no momento da ruptura (BALBI, 2008).

Segundo o autor, existem diferentes tipos de cenários, tais como cenários de ações, de ruptura, de inundação a jusante, entre outros. Além disso, devido ao grande número de singularidades que podem ocorrer no projeto de barragens e da complexidade do funcionamento desse tipo de estrutura, muitas vezes não é possível generalizar partes de conclusões e resultados obtidos em estudos, tornando cada barragem quase um caso a parte em alguns quesitos. Sendo assim,

para cada barragem, é possível compor um altíssimo número de cenários diferentes, tornando necessário, para fins de viabilidade do estudo, determinar um grupo restrito de cenários a serem analisados que represente as circunstâncias com maior potencial de danos ao vale localizado a jusante da barragem em um evento de ruptura.

Conforme Brasil (2005), na maior parte dos casos, não é possível validar os resultados e conclusões encontrados em um estudo de ruptura de barragem quando é analisado apenas um cenário devido ao grande número de incertezas presentes nesse tipo de estudo. Dessa forma, é preciso ponderar diferentes cenários de ruptura.

#### 4.4 MECANISMO E TEMPO DE FORMAÇÃO DA BRECHA

Collischonn e Tucci (1997) definem brecha como uma abertura na barragem, causada por falha, através da qual a água do reservatório pode passar, alargando e aprofundando a brecha inicial. De acordo com Fread e Lewis (1998), o processo de ruptura e geração da brecha afeta diretamente o hidrograma de saída da barragem quanto a sua magnitude, forma e duração.

Segundo Monte-Mor (2004), o fenômeno de ruptura pode ser dividido nos seguintes componentes: localização da brecha, tempo/taxa de desenvolvimento da brecha e predição do escoamento através da brecha. Conforme o autor, os fatores mais importantes que influenciam a formação de brecha em uma barragem, independente se esta é de concreto ou de terra, são:

- a) forma;
- b) tempo de formação;
- c) profundidade;
- d) largura final;
- e) taxa de crescimento.

O tipo de barragem interfere significativamente no processo de formação de brecha, ainda que para nenhum dos casos, os verdadeiros mecanismos de ruptura de barragem sejam completamente esclarecidos. No caso de barragens de concreto em arco, a brecha se forma de maneira rápida e instantânea, ao contrário de barragens de terra e de concreto por gravidade (FREAD; LEWIS, 1998).

De acordo com Uemura (2009), no caso de uma ruptura de barragem por galgamento, o tempo de ruptura é função de diversos parâmetros: altura, tipo de material empregado na construção,



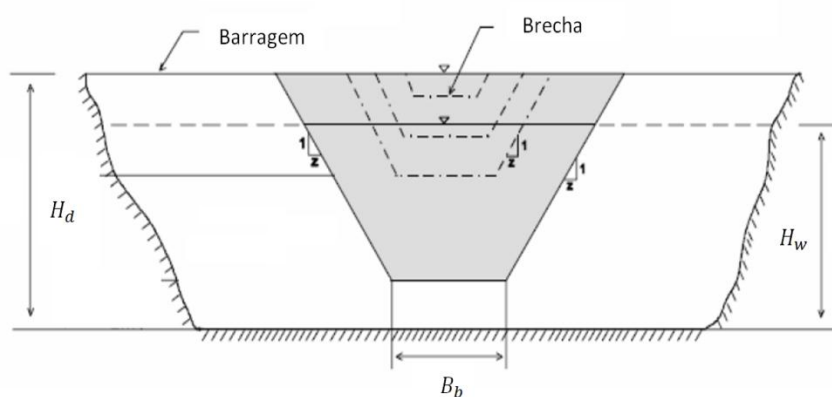
medida de compactação de grãos, magnitude e duração do processo de escoamento da água. Já a ruptura de barragens ocasionada por erosão interna em algum ponto de sua estrutura se dá de forma rápida, sendo o tempo de formação de brecha geralmente menor em relação às rupturas por galgamento.

Quanto aos métodos de determinação da formação de brechas, Collischonn e Tucci (1997, p. 192) afirmam:

Os modelos de formação de brecha que incorporam conceitos de erosão e transporte de material sólido necessitam uma grande quantidade de dados sobre o material da barragem e o hidrograma calculado é tão sensível à incerteza que existe nestes dados, que a utilização destes modelos pode não se justificar frente a um modelo de formação de brecha mais simples. Além disso, os conceitos de erosão e transporte não se aplicam à barragem de concreto. Os métodos mais simples, como o de evolução pré-determinada da brecha, ainda são os mais utilizados.

A figura 6 apresenta um exemplo do processo de geração de brecha em uma barragem, na qual a brecha tem formato trapezoidal, dependente da sua inclinação (parâmetro  $z$ ), e seu tamanho final varia em função da largura do fundo ( $B_b$ ). Nos quadros 2 e 4, são apresentados, respectivamente, critérios para a determinação da largura da brecha e do seu tempo de formação, segundo diferentes autores. Vale salientar que para fins de cálculo, a altura da água acima do fundo brecha no momento de ruptura ( $H_w$ ) foi considerada como equivalente a altura da barragem ( $H_d$ ) visando ficar a favor da segurança, tendo em vista que este caso representa a situação mais crítica.

Figura 6 – Exemplo de formação de brecha em uma barragem.



(fonte: FREAD e LEWIS 1998 apud UEMURA 2009)

Para que seja possível utilizar a equação de Von Thun e Gillette (1990) para a determinação da largura de brecha, é necessário primeiramente encontrar o valor de  $C_b$ . Conforme Wahl

(1998),  $C_b$  é um fator compensatório que varia em função do volume do reservatório da barragem. No quadro 3, é descrito como esse coeficiente é obtido.

Quadro 2 – Critérios para determinação da largura da brecha conforme a literatura.

Autor	Largura média da brecha	Fórmula
Bureau of Reclamation (1988) <sup>4</sup>	$Bb = 3 Hw$	1
Von Thun e Gillette (1990)	$Bb = 2,5 Hw + Cb$	2
Wahl (1998) <sup>5</sup> apud Grimaldi et al (2010)	$Bb = 4 Hd$	3
Froehlich (1995) apud Uemura (2009)	$Bb = 9,5 K_o (Vr Hd)^{0,25}$	4

(fontes: WAHL 2004; GRIMALDI et al 2010)

Onde:

$Bb$  – largura da brecha [m];

$Hd$  – altura da barragem [m];

$H$ , [m];

$C_b$  – fator compensatório da equação de Von Thun e Gillette (1990) para o cálculo da largura da brecha;

$K_o$  – fator multiplicador =0,1 para galgamento (*overtopping*) ou =0,7 para erosão interna (*piping*);

$Vr$  – volume do reservatório [m<sup>3</sup>].

Quadro 3 – Determinação do  $C_b$  em função do volume do reservatório da barragem.

Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	$C_b$ (m)
$< 1,23 \times 10^6$	6,1
$1,23 \times 10^6 - 6,17 \times 10^6$	18,3
$6,17 \times 10^6 - 1,23 \times 10^7$	42,7
$> 1,23 \times 10^7$	54,9

(fonte: adaptado de VON THUN e GILLETTE 1990)

Quadro 4 – Determinação do tempo de formação da brecha de acordo com literatura.

Autor	Tempo de formação da brecha	Fórmula
MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	$tf = 0,017 Ver^{0,364}$	5
Bureau of Reclamation (1988)	$tf = 0,011 Bb$	6
Von Thun e Gillette (1990)	$tf = 0,015 Hw$	7

(fonte: WAHL, 2004)

Onde:

$Bb$  – largura da brecha [m];

<sup>4</sup>BUREAU OF RECLAMATION U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Guidelines for defining inundated areas downstream from Bureau of Reclamation dams**. Denver, Colorado, 1982.

<sup>5</sup>WAHL, T. L. **Prediction of embankment dam breach parameters**: A literature review and needs assessments Dam Safety Rep. No. DSO-98-004, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 1998.

Ver – volume de material erodido [m<sup>3</sup>];

Hw – altura da água no momento de ruptura, acima do fundo da brecha [m];

tf– tempo de formação da brecha [h].

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA

Segundo Brasil (2005, p. 52), não é possível realizar a simulação do evento de ruptura sem que antes seja determinada a vazão de pico e realizado o hidrograma da vazão defluente no momento da ruptura. Afirma o autor:

Para simular o evento de ruptura, é necessário, primeiramente, determinar a vazão de pico e elaborar o hidrograma da vazão defluente no momento da ruptura. As características principais a serem determinadas referem-se à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma.

É possível, então, aferir que a forma da brecha e o seu tempo de formação são as informações mais relevantes a serem obtidas. Conforme Palmier et al. (2007), muitas incertezas ainda estão presentes na determinação da descarga de pico defluente, apesar das muitas proposições matemáticas de vários autores, que tentam relacionar as características da barragem com a vazão máxima da descarga referida, até o presente momento ainda não existe uma fórmula matemática que se possa afirmar verdadeira, apesar das regulamentações que determinam o cálculo a ser adotado.

No entanto, existem formulações matemáticas deduzidas de modo empírico que tornam possível estimar a vazão de pico defluente devido à ruptura em função das características da barragem, como por exemplo, altura, comprimento da crista, volume do reservatório. Em sua maioria, as fórmulas analisadas neste trabalho foram obtidas baseadas em casos já ocorridos de ruptura de barragem com naturezas diversas. A única formulação matemática para o cálculo da vazão máxima estudada não obtida através de observação de casos históricos é a de Saint-Venant (-) apud Verol et al (2013), a qual supõe a remoção total e instantânea do barramento, situação de pequena probabilidade de ocorrência, mas que ainda assim deve ser estudada, tendo em vista que resulta nas condições mais críticas de inundação a jusante provocada por ruptura de barragem.

São apresentadas a seguir as formulações empíricas utilizadas para a determinação da vazão de pico presentes na literatura. No quadro 5 constam formulações independentes da brecha formada.

Quadro 5 – Formulações matemáticas para a determinação da vazão de pico independentes da brecha.

Autor	Vazão de Pico	Fórmula
Kirkpatrick (1977) <sup>6</sup>	$Q \text{ máx} = 1,268 (Hw + 0,3)^{2,5}$	8
Lou (1981 <sup>7</sup> apud Mascarenhas, 1990)	$Q \text{ máx} = 7,683 Hd^{1,909}$	9
SCS (1981) <sup>8</sup>	$Q \text{ máx} = 16,6 Hw^{1,85}$	10
Hagen (1982) <sup>9</sup>	$Q \text{ máx} = 0,54 (Vr Hd)^{0,5}$	11
Bureau of Reclamation (1982) <sup>10</sup>	$Q \text{ máx} = 19,1 Hw^{1,85}$	12
Singh e Snorrason (1984) <sup>11</sup>	$Q \text{ máx} = 13,4 Hd^{1,89}$	13
Saint Venant (-) apud Verol et al, 2013)	$Q \text{ máx} = \frac{8}{27} Bd\sqrt{g} Y_{méd}^{3/2}$	14

(fontes: BRASIL 2005; WAHL 2004 e VEROL et al 2013)

Onde:

$Q \text{ máx}$  – descarga máxima defluente da barragem em ruptura [ $m^3/s$ ];

$Hd$  – altura da barragem [m];

$Hw$  – altura da água no momento de ruptura, acima do fundo da brecha [m];

$Vr$  – volume do reservatório [ $m^3$ ];

$Bd$  – largura da barragem [m];

$Y_{méd}$  – profundidade média do reservatório no momento da ruptura [m].

<sup>6</sup>KIRKPATRICK, G. W. **Evaluation guidelines for spillway adequacy**: The evaluation of dam safety, Engineering Foundation Conf., ASCE, New York, p. 395–414, 1977.

<sup>7</sup>LOU, W. C. **Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches**.1981.Thesis (Ph.D in Engineering) – Colorado State University, Fort Collins

<sup>8</sup>SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Simplified dam-breach routing procedure**. 1981.Technical. Release n. 66, Rev.39.

<sup>9</sup>HAGEN, V. K. Re-evaluation of design floods and dam safety. XIV Congress of International Commission on Large Dams, International Commission on Large Dams, Paris. **Proceedings**, 1982.

<sup>10</sup>BUREAU OF RECLAMATION U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Guidelines for defining inundated areas downstream from bureau of reclamation dams**. Denver, Colorado, 1982.

<sup>11</sup>SINGH, K. P., AND SNORRASON, A. 1984.Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models. **Journal of Hydraulic Engineering**, n. 68, p. 295–310.

É possível também calcular a vazão máxima oriunda de um evento de ruptura de barragens em função da brecha formada, considerando características como largura e tempo de formação. Para tanto, Wetmore e Fread (1984) propuseram a fórmula 15 apresentada a seguir.

$$Q \text{ máx} = 3,1 Bb Hw^{1,5} \left( \frac{C}{C + tf Hw^{0,5}} \right)^3 \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

Q máx – descarga máxima defluente da barragem em ruptura [pés<sup>3</sup>/s];

Bb – largura final da brecha [pés];

Hw – altura da água no momento de ruptura, acima do fundo da brecha [pés];

tf – tempo de formação da brecha [h];

C – fator de redução instantâneo do fluxo [pés];

Sendo:

$$C = 23,4 \frac{As}{Bb}$$

Onde:

As – área do reservatório para o nível de água máximo [acres].

French (1985)<sup>12</sup> apud Brasil (2005) adaptou a fórmula de Wetmore e Fread, convertendo-a para o sistema internacional de unidades (fórmula 16). Para fins de cálculo, a altura d'água no momento de ruptura, acima do fundo da brecha, foi considerada como equivalente a altura da barragem. A área do reservatório correspondente a esse nível de água máximo foi determinada conforme a fórmula 17.

$$Q \text{ máx} = 1,7 Bb \left( \frac{1,94 \frac{As}{Bb}}{tf + \frac{1,94 As}{Bb \sqrt{Hd}}} \right)^3 \quad (\text{fórmula 16})$$

Onde:

---

<sup>12</sup>FRENCH, R. H. **Open-Channel Hydraulics**. McGRAW-HILL International Editions, 1985.

Q máx – descarga máxima defluente da barragem em ruptura [m<sup>3</sup>/s];

Hd – altura da barragem [m];

Bb – largura final da brecha [m].

$$A_s = \frac{1,5 V_r}{H_w} \quad (\text{fórmula 17})$$

Onde:

As – área do reservatório para o nível de água máximo [m<sup>2</sup>];

Vr – volume do reservatório [m<sup>3</sup>];

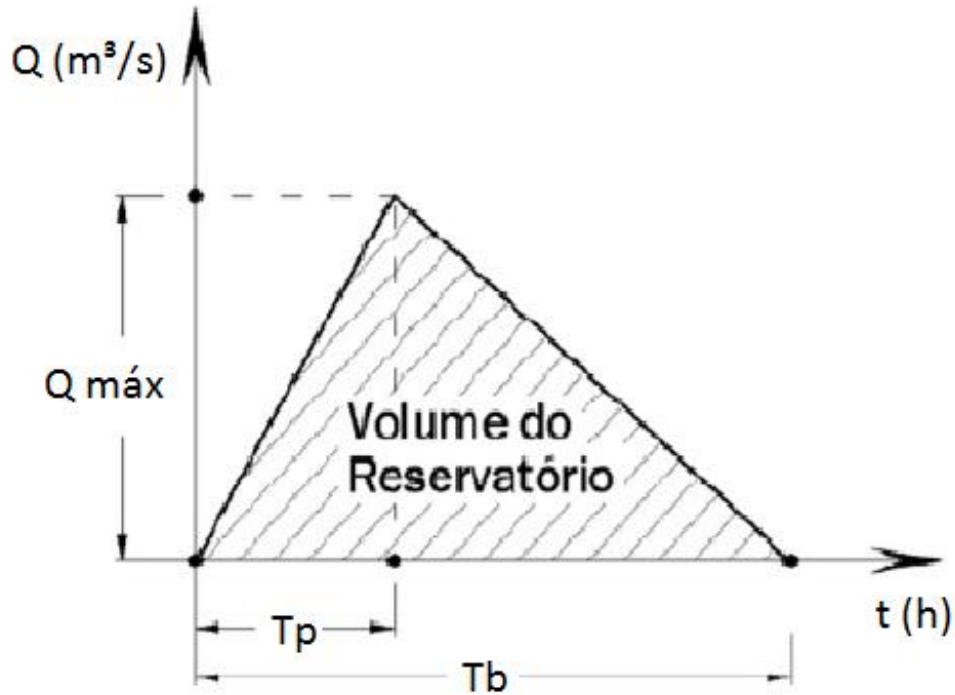
Hw – altura da água no momento de ruptura, acima do fundo da brecha [m].

Ensina Marcarenhas (1990), que o critério de segurança a ser adotado, bem como a natureza do caso estudado são fatores que devem fazer parte da escolha da equação para o cálculo da vazão de pico, ou vazão máxima. Dessa forma, os resultados obtidos representam os possíveis cenários em uma situação real de ruptura de barragem.

Segundo Brasil (2005), o hidrograma inicial de ruptura é obtido pela defluência do reservatório no caso de colapso parcial ou total de uma estrutura de uma barragem e pode ser calculado separadamente ou dentro da rotina da propagação da onda de cheia. O hidrograma inicial de ruptura pode ser obtido segundo diferentes métodos presentes na literatura.

Um desses métodos é o do Hidrograma Triangular Simplificado proposto por Mascarenhas (1990), apresentado na figura 7 e calculado conforme as fórmulas 18, 19 e 20. Tendo em vista que o objetivo era determinar o hidrograma referente à vazão defluente de ruptura de uma barragem, o tempo de pico (Tp) desse hidrograma foi estimado como equivalente ao tempo de formação da brecha (tf) responsável pelo evento de ruptura.

Figura 7 – Método de determinação de hidrograma de ruptura segundo Mascarenhas (1990).



(fonte: BRASIL2005)

Onde:

$Q \text{ máx}$  – vazão máxima defluente da barragem em ruptura [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$T_p$  – tempo de pico [s];

$T_b$  – tempo de base [s].

Sendo:

$$Q_p = 2 \frac{V_r}{T_b}, \text{ Para } T_p = 0 \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

$V$  – volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [ $\text{m}^3$ ];

$$Qp(t) = Qp \left( \frac{t}{Tp} \right), \text{Para } 0 \leq t \leq Tp \quad (\text{f\u00f3rmula 19})$$

$$Qp(t) = Qp - Qp \left( \frac{t - Tp}{Tb - Tp} \right), \text{Para } t \geq Tp \quad (\text{f\u00f3rmula 20})$$

Onde:

$Qp$  – vaz\u00e3o m\u00e1xima defluente da barragem em ruptura [ $m^3/s$ ];

$Tp$  – tempo de pico [s];

$Tb$  – tempo de base [s].



## 5 METODOLOGIA

Para responder a questão de pesquisa proposta, foi necessário comparar e analisar diferentes critérios de configuração de hidrogramas de ruptura de barragem. Para tanto, primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica para selecionar quais os critérios para formação de brecha seriam estudados.

Após examinada a literatura existente no assunto, foi determinado que o tempo de formação de brecha seria calculado através das formulações matemáticas propostas por MacDonald e Langdrige-Monopolis (1984), Bureau of Reclamation (1988), Von Thun e Gillette (1990) e conforme descritas no item 4.4 (Mecanismo e tempo de formação da brecha). Estas formulações foram escolhidas por serem as mais recentes presentes na literatura analisada que não são baseadas na altura da brecha, tendo em vista a dificuldade de estimar esse parâmetro a priori. A largura da brecha foi estimada de acordo com as formulações matemáticas também apresentadas no item 4.4, sendo Wahl (1998 apud Grimaldi et al., 2010) o autor utilizado para as análises das barragens hipotéticas em decorrência de acarretar brechas mais críticas.

Analogamente ao procedimento adotado para o mecanismo de formação de brecha, foi realizado um estudo da bibliografia sobre determinação da vazão máxima gerada por um evento de ruptura de barragens. Foram selecionadas 7 formulações matemáticas propostas por diferentes autores para a determinação da vazão máxima oriunda de ruptura de barragem, conforme apresentado no item 4.5 (Determinação do hidrograma de ruptura). Estes autores foram escolhidos por terem obtidos suas expressões matemáticas baseadas em observações de casos reais de ruptura de diversas naturezas e/ou por acarretarem os resultados mais críticos.

Para cada formulação matemática de vazão máxima e tempo de formação de brecha (nesse caso equivalente ao tempo de pico do hidrograma), foi determinado um hidrograma de ruptura pelo Hidrograma Triangular Simplificado proposto por Mascarenhas (1990), escolhido por ser um método simples e expedito que gera resultados confiáveis. Para tanto, também foi calculado o tempo de base (ou tempo de esvaziamento) de cada hidrograma de ruptura através do mesmo método, conforme explicitado ainda no item 4.5 (Determinação do hidrograma de ruptura).

O próximo passo do trabalho foi determinar quais, dentre as formulações matemáticas estudadas, acarretariam resultados mais críticos de vazão máxima e tempo de base. Para tanto, foi feito um levantamento de dados históricos de ruptura de barragens de terra de pequeno porte, sendo selecionados 9 casos distintos. Os casos estudados, apresentados em MacDonald e Monopolis (1984), foram selecionados por se tratarem de rupturas reais de barragens de terra com alturas aproximadamente dentro do intervalo desejado de análise (entre 5 e 10 metros) com a qualidade de dados necessária para a realização do estudo proposto. Vale salientar que, infelizmente, não são encontrados na literatura dados de ruptura de barragens brasileiras de pequeno porte com o detalhamento requerido para estimar o processo de formação de brecha e da vazão de pico.

Por meio do estudo desses 9 casos foi possível determinar as duas formulações matemáticas para cálculo da vazão máxima proveniente de um evento de ruptura que resultam maior vazão máxima e maior tempo de base, respectivamente. Durante essa análise, foram constatadas tendências lineares distintas entre o volume do reservatório e a altura da barragem, portanto, foram ajustadas duas relações entre estes dois parâmetros, uma para valores grandes de reservação e outra para valores pequenos. Essas duas relações permitiram a caracterização das geometrias de barragens hipotéticas a serem utilizadas. Dessa forma, foram estudadas 3 barragens hipotéticas com alturas de 5, 7,5 e 10 metros de altura (de forma que não foi necessário realizar estudos de estabilidade) para pequena e grande reservações, totalizando 6 barragens hipotéticas analisadas.

Os resultados obtidos foram comparados com o intuito de determinar de que maneira os hidrogramas de ruptura são afetados, conforme o cenário analisado. Além disso, foram propostas relações adimensionais que permitem realizar uma estimativa inicial da largura da brecha, da vazão máxima e do tempo de pico em função apenas da altura da barragem, considerando os casos críticos analisados.

## 5.1 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos conforme a metodologia descrita anteriormente, estão apresentados nos itens a seguir. Além disso, também é feita uma breve discussão dos mesmos.

### **5.1.1 Levantamento dos critérios de formação de brecha**

Os critérios utilizados para determinação do processo de formação de brecha estão apresentados na revisão bibliográfica no item 4.4 (Mecanismo e tempo de formação da brecha).

### **5.1.2 Levantamento dos critérios para a determinação do hidrograma formado junto a barragem quando da ruptura**

Os critérios analisados para a determinação do hidrograma de ruptura formado junto a barragem descritos na revisão bibliográfica no item 4.5 (Determinação do hidrograma de ruptura).

### **5.1.3 Levantamento de dados de barragens de terra de pequeno porte que romperam**

Para fins de determinação de critérios a serem analisados, foram estudados 9 casos históricos de falhas de barragens com causas de ruptura distintas e alturas variando em torno de 5 a 17 metros. Estes dados foram obtidos em MacDonald e Monopolis (1984). Todas as barragens em questão eram constituídas de maciço de terra e apresentaram formação de brecha trapezoidal. Nos itens a seguir está apresentado um breve histórico de cada evento de ruptura.

#### **5.1.3.1 Bullock Drew Dike**

A barragem Bullock Drew Dike foi construída nos Estados Unidos, no ano de 1971, utilizando terra, com 5,8 metros de altura e volume do reservatório de 1,13 hm<sup>3</sup>. A barragem Bullock Drew Dike rompeu ainda no ano de 1971 por erosão interna.

#### **5.1.3.2 Frankfurt**

A barragem Frankfurt foi construída na Alemanha em 1975, utilizando terra, com 10 metros de altura e volume do reservatório de 0,35 hm<sup>3</sup>. A barragem Frankfurt rompeu em 1977 por percolação lateral. O tempo para a formação da brecha foi de 15 minutos, e o tempo da ruptura foi de 2h30.

#### 5.1.3.3 Frenchman Creek

A barragem Frenchman Creek foi construída em Philips County, nos Estados Unidos, em 1952, utilizando terra, com 12,5 metros de altura e volume do reservatório de 21 hm<sup>3</sup>. A barragem rompeu em 1952 por percolação lateral e causou a maior vazão de pico registrada no Milk River abaixo da sua confluência com o Frenchman Creek. O prejuízo causado foi de 150 mil dólares.

#### 5.1.3.4 Goose Creek

A barragem Goose Creek foi construída nos Estados Unidos em 1903, utilizando terra, com 6 metros de altura e volume do reservatório de 10,6 hm<sup>3</sup>. A barragem rompeu em 1916 por galgamento e o tempo para a formação da brecha foi de 30 minutos.

#### 5.1.3.5 Johnston City

A barragem Johnston City foi construída nos Estados Unidos em 1921, utilizando terra, com 4,3 metros de altura e volume do reservatório de 0,575 hm<sup>3</sup>. A barragem rompeu em 1981 por percolação lateral.

#### 5.1.3.6 Kelly Barnes

A barragem Kelly Barnes foi construída nos Estado Unidos em 1948, utilizando terra, com 11,5 metros de altura e volume do reservatório de 0,505 hm<sup>3</sup>. A barragem rompeu em 6 de novembro 1977 por erosão interna, aproximadamente às 1h30 a.m. após um período de chuvas intensas. O tempo da ruptura foi de 30 minutos e 39 pessoas morreram na tragédia. O prejuízo causado foi de 2,8 milhões de dólares.

#### 5.1.3.7 Lake Frances

A barragem Lake Frances foi construída nos Estados Unidos em 1899, utilizando terra, com 15 metros de altura e volume do reservatório de 0,865 hm<sup>3</sup>. A barragem rompeu dias após o término da sua construção, em 21 de outubro de 1899, por erosão interna após a área ser inundada com 228,6 mm de chuva em apenas 36 horas. O tempo para a formação da brecha foi de 1 hora, e o tempo da ruptura também foi de 1 hora.

#### 5.1.3.8 Rito Manzanares

A barragem Rito Manzanares foi construída nos Estados Unidos, utilizando terra, com 7,3 metros de altura e volume do reservatório de 246 m<sup>3</sup>. A barragem rompeu em 1975 por percolação lateral.

#### 5.1.3.9 Sheep Creek

A barragem Sheep Creek foi construída nos Estados Unidos em 1969, utilizando terra, com 17 metros de altura e volume do reservatório de 1,43hm<sup>3</sup>. A barragem rompeu em 1970 por percolação lateral.

### 5.1.4 Análises da vazão máxima e do tempo de base críticos para as barragens levantadas

No quadro 6 apresentado abaixo consta um resumo das características gerais das barragens e das brechas formadas nas mesmas para os casos históricos de ruptura estudados. No quadro 7 constam os valores de C<sub>b</sub>, fator compensatório da equação de Von Thun e Gillette (1990) para o cálculo da largura da brecha, determinado conforme descrito no item 4.4 (Mecanismo e tempo de formação da brecha). Na figura 8 podemos observar que o valor de C<sub>b</sub> é diretamente proporcional ao volume do reservatório da barragem.

Quadro 6 – Características gerais e de brecha de dados históricos de ruptura.

Barragem	Hd (m)	Largura crista (m)	Inclinação Talude		V <sub>r</sub> (hm <sup>3</sup> )	V <sub>w</sub> (hm <sup>3</sup> )	H <sub>w</sub> (m)	B <sub>b</sub> (m)	H <sub>b</sub> (m)	Vol. Mat. Erodido (m <sup>3</sup> )	Tempo Máx (h)
			mont	jus							
Bullock Draw Dike	5,79	4,27	1:2	1:3	1,13	0,74	3,048	13,72	5,79	1353,26	-
Frankfurt	9,75	4,95	1:2.75	1:2.25	13,57	0,35	8,230	9,45	9,75	1292,10	0,25
Frenchman Creek	12,50	6,10	1:3	1:2	20,97	16,04	10,820	67,06	12,50	28364,99	-
Goose Creek	6,10	3,05	1:1.5	1:1.5	10,60	0,58	1,372	30,48	4,11	1070,38	0,50
Johnston City	4,27	1,83	1:4.75	1:2.75	0,57	0,57	3,048	13,41	5,18	672,81	-
Kelly Barnes	11,58	6,10	1:1	1:1	0,51	0,78	10,363	35,05	11,58	9939,21	-
Lake Frances	15,24	4,88	1:3	1:2	0,86	0,79	12,192	29,87	15,24	12385,79	1,00
Rito Manzanares	7,32	3,66	1:1.34	1:1.34	0,02	0,02	4,572	18,90	7,32	1292,10	-
Sheep Creek	17,07	6,10	1:3	1:2	1,43	2,91	14,021	30,48	17,07	18272,86	-

(fonte: MACDONALD e MONOPOLIS 1984)

Onde:

Hd– altura da barragem [m];

Vr – volume do reservatório [m<sup>3</sup>];

Vw– volume efluente através da brecha [m<sup>3</sup>];

Hw – altura da água no momento de ruptura, acima do fundo da brecha [m];

Bb – largura final da brecha [m];

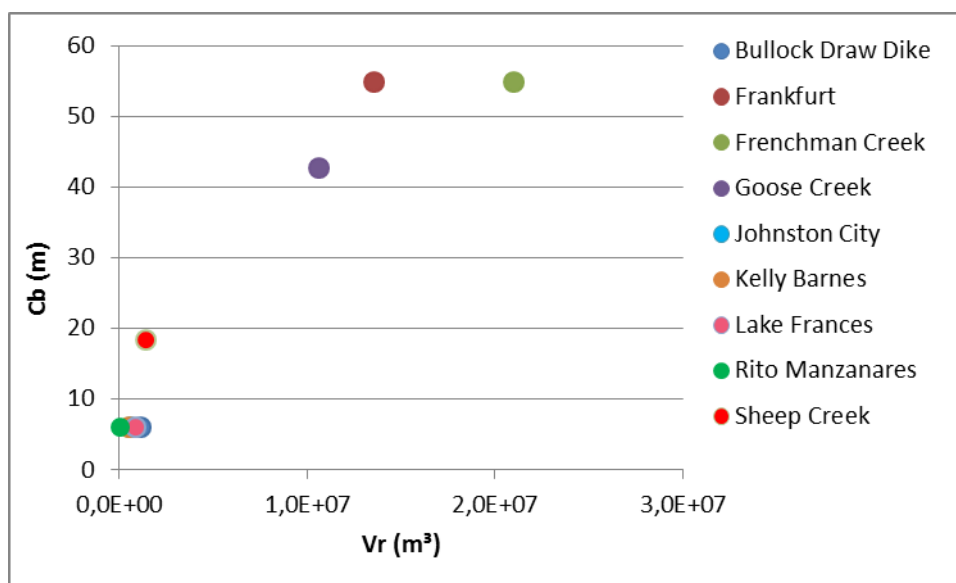
Hb – altura final da brecha [m].

Quadro 7 – Valores de Cb para os dados de barragens rompidas estudadas.

Barragem	Hd (m)	Vr (m <sup>3</sup> )	Cb (m)
Bullock Draw Dike	5,79	1,1E+06	6,1
Frankfurt	9,75	1,4E+07	54,9
Frenchman Creek	12,50	2,1E+07	54,9
Goose Creek	6,10	1,1E+07	42,7
Johnston City	4,27	5,7E+05	6,1
Kelly Barnes	11,58	5,1E+05	6,1
Lake Frances	15,24	8,6E+05	6,1
Rito Manzanares	7,32	2,5E+04	6,1
Sheep Creek	17,07	1,4E+06	18,3

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 8 – Relação entre Cb e o volume de reservação da barragem para os dados de barragens rompidas estudadas.



(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

$V_r$  – volume do reservatório [ $m^3$ ];

$C_b$  – fator compensatório da equação de Von Thun e Gillette (1990) para o cálculo da largura da brecha [m].

No quadro 8, são apresentados os valores da área do reservatório para o nível d'água máximo e da profundidade média do reservatório no momento de ruptura, também calculados de acordo com o procedimento demonstrado no item 4.4 (Mecanismo e tempo de formação da brecha). Essa caracterização do reservatório no momento de ruptura é necessária para o cálculo da vazão máxima pela fórmula proposta por Wetmore e Fread (1984), também apresentada no item 4.3 deste trabalho. Vale ressaltar que ambos os parâmetros são função da altura da barragem, mas a área do reservatório depende, também, do volume de reservação. Isso explica porque de um caso para outro, a área de reservatório varia muito mais do que a sua profundidade, tendo em vista que os casos analisados têm alturas de barragem semelhantes, porém volumes de reservação significativamente variados.

Quadro 8 – Caracterização do reservatório das barragens analisadas no momento da ruptura.

Barragem	Hd (m)	As. ( $m^2$ )	Y méd (m)
Bullock Draw Dike	5,79	2,93E+05	2,9
Frankfurt	9,75	2,09E+06	4,9
Frenchman Creek	12,50	2,52E+06	6,2
Goose Creek	6,10	2,61E+06	3,0
Johnston City	4,27	2,02E+05	2,1
Kelly Barnes	11,58	6,55E+04	5,8
Lake Frances	15,24	8,50E+04	7,6
Rito Manzanares	7,32	5,06E+03	3,7
Sheep Creek	17,07	1,26E+05	8,5

(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

Y médio – profundidade média no reservatório no instante da ruptura [m];

As – área do reservatório para o nível de água máximo [ $m^2$ ].

O quadro 9 apresenta os valores de largura de brecha ( $B_b$ ) calculados de acordo com as relações propostas pelos autores estudados, conforme descrito no item 4.4 (Mecanismo e tempo de formação da brecha), para as barragens rompidas analisadas. Na figura 9, é

apresentada a correlação entre a largura da brecha (Bb) e a altura da barragem (Hd) para os 3 métodos estudados. É possível observar que os métodos, de uma maneira geral, apresentam tendências semelhantes, sendo que as diferenças nos valores das brechas são devidas a constante que multiplica o valor da altura da água no momento de ruptura, Hw, (estimada como igual a altura da barragem, Hd, para fins de cálculo neste trabalho) adotada por cada autor, conforme descrito no também no item 4.3.

Os 3 pontos que fogem da tendência geral no método de Von Thun e Gillette (1990) apresentam esse comportamento, pois os valores do fator compensatório Cb para esses casos são bem superiores aos demais, como pode ser observado no quadro 9. O fator Cb é determinado proporcionalmente ao volume do reservatório (conforme descrito no quadro 3 apresentado no item 4.4 (Mecanismo e tempo de formação da brecha), passando de 18,3 para volumes de reservação na faixa de  $1,23 \cdot 10^6$  a  $6,17 \cdot 10^6$ , para 42,7 para intervalos de  $6,17 \cdot 10^6$  a  $1,23 \cdot 10^7$ , e depois para 54,9 para volumes de reservação superiores a  $1,23 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>. Tendo em vista que a fórmula proposta por estes autores para determinação da largura da brecha (Bb) é função de Cb, para esses 3 casos, a brecha resultante será também bastante elevada em comparação as outras.

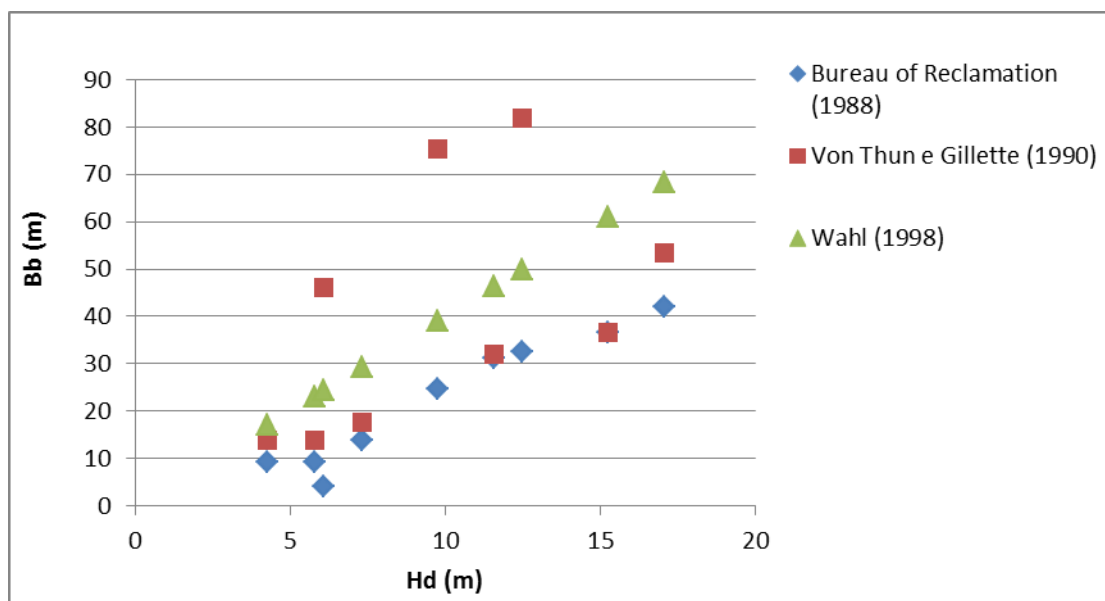
Vale ressaltar ainda que os métodos do Bureau of Reclamation (1988) e Von Thun e Gillette (1990) apresentam valores de brecha similares entre si, com exceção dos 3 pontos mencionado. O método de Froehlich (1995) apresenta resultados muito superiores aos demais, portanto foi desconsiderado para análises futuras. Sendo assim, o mecanismo de formação de brecha mais crítico estudado foi o de Wahl (1998).

Quadro 9 – Valores de largura de brecha (Bb), em metros, calculados conforme a literatura para os dados históricos de ruptura de barragens estudados.

Barragem	Hd (m)	Vr (m <sup>3</sup> )	Cb (m)	Bureau of Reclamation (1988)	Von Thun e Gillette (1990)	Wahl (1998)
Rito Manzanares	7,32	2,50E+04	6,1	13,7	17,5	29,3
Kelly Barnes	11,58	5,10E+05	6,1	31,1	32	46,3
Johnston City	4,27	5,70E+05	6,1	9,1	13,7	17,1
Lake Frances	15,24	8,60E+05	6,1	36,6	36,6	61
Bullock Draw Dike	5,79	1,10E+06	6,1	9,1	13,7	23,2
Sheep Creek	17,07	1,40E+06	18,3	42,1	53,4	68,3
Goose Creek	6,1	1,10E+07	42,7	4,1	46,1	24,4
Frankfurt	9,75	1,40E+07	54,3	24,7	75,5	39
Frenchman Creek	12,5	2,10E+07	54,3	32,5	82	50



Figura 9 – Largura da brecha em função da altura da barragem conforme a literatura para os casos de barragens rompidas estudados.



(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

Hd– altura da barragem [m];

Bb – largura final da brecha [m].

No quadro 10, estão apresentados os valores do tempo onde ocorre o pico da vazão,  $T_p$ , (adotado como equivalente ao tempo de formação da brecha,  $t_f$ , para fins de cálculo neste trabalho) em função da altura da barragem (Hd). Observa-se que os métodos, independentes da brecha apresentam uma variação de 3 a 4 vezes o tempo onde ocorre o pico do hidrograma.

Já para os métodos que consideram a brecha, essa variação ficou entre 1,5 a 2 vezes. Além disso, os métodos que não levam em conta a formação da brecha tiveram uma tendência de fornecer valores menores no método de Von Thun e Gillette (1990), gerando, portanto, condições menos críticas.

Quadro 10 – Tempo de pico ( $T_p$ ) em horas conforme a literatura para os dados históricos de ruptura de barragens estudados.

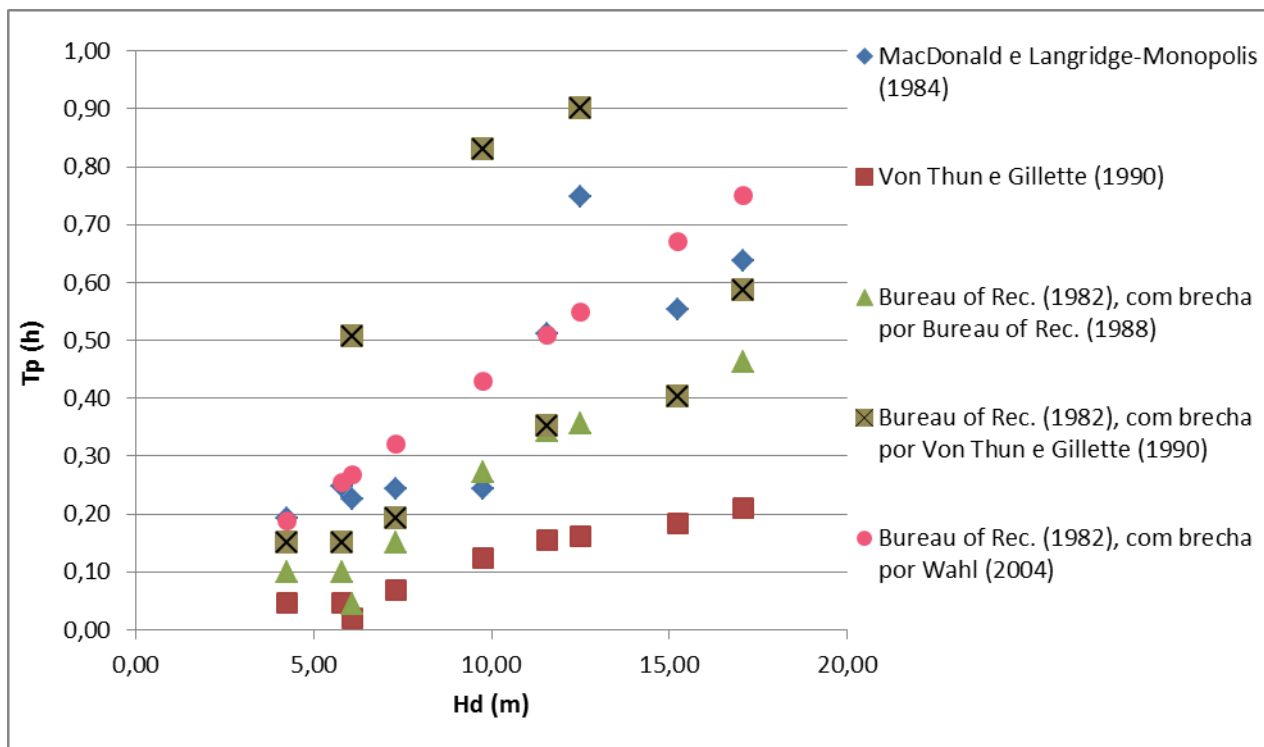
Barragem	Hd (m)	Tempo de formação da brecha (h)				
		Independente da brecha		Em função da brecha		
		MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Rec. (1982), com brecha por Bureau of Rec. (1988)	Bureau of Rec. (1982), com brecha por Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Rec. (1982), com brecha por Wahl (1998)
Bullock Draw Dike	5,79	0,25	0,05	0,10	0,15	0,25
Frankfurt	9,75	0,24	0,12	0,27	0,83	0,43
Frenchman Creek	12,50	0,75	0,16	0,36	0,90	0,55
Goose Creek	6,10	0,23	0,02	0,05	0,51	0,27
Johnston City	4,27	0,19	0,05	0,10	0,15	0,19
Kelly Barnes	11,58	0,51	0,16	0,34	0,35	0,51
Lake Frances	15,24	0,55	0,18	0,40	0,40	0,67
Rito Manzanares	7,32	0,24	0,07	0,15	0,19	0,32
Sheep Creek	17,07	0,64	0,21	0,46	0,59	0,75

(fonte: elaborada pela autora)

Na figura 10 a seguir apresenta-se a relação entre o tempo de pico ( $T_p$ ), equivalente ao tempo de formação da brecha ( $t_f$ ), e a altura da barragem (Hd), conforme os autores estudados para as barragens rompidas analisadas. É possível perceber que o tempo de pico do hidrograma de ruptura da barragem é diretamente proporcional a altura da barragem. Além disso, observa-se que independente do método aplicado, a variação máxima entre os valores de tempo de pico é de aproximadamente 0,15 a 0,9 horas.

Vale ressaltar ainda que os pontos que fogem a tendência geral dos demais, 3 para o método de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), e 3 para Bureau of Reclamation (1982) com brecha por Von Thun e Gillette (1990), ocorrem devido ao fato dos métodos de Von Thun e Gillette e MacDonald e Langridge-Monopolis levarem em consideração o volume do reservatório. Como já foi mencionado anteriormente, isso ocorre em decorrência dos valores bem superiores de fator compensatório  $C_b$  para esses 3 casos.

Figura 10 – Tempo de pico do hidrograma de ruptura em função da altura da barragem para os dados de barragens rompidas estudadas.



(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

Hd– altura da barragem [m];

Tp – tempo de pico [h].

O quadro 11 apresenta os valores de vazão máxima em um evento de ruptura para as barragens rompidas analisadas, calculadas através das formulações matemáticas apresentadas no item 4.5 (Determinação do hidrograma de ruptura). A figura 11 apresenta a correlação entre a vazão máxima em um evento de ruptura, conforme a literatura estudada, e a altura da barragem para os casos de rompimento de barragem estudados.

Para todos os casos foi possível constatar que a vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) é diretamente proporcional a altura da barragem ( $H_d$ ). Como pode ser observado no quadro 11 e na figura 11, os métodos propostos por Saint-Venant apud Verol et al. (2013), Kirkpatrick (1977), Hagen (1981) e Lou (1981) resultam valores para  $Q_{\text{máx}}$  em ordens de grandeza diferentes dos demais métodos, portanto foram desconsiderados para as análises seguintes. Não obstante essa consideração é possível observar que os valores de vazão máxima variam significativamente conforme o método utilizado.

Conforme mencionado anteriormente, os métodos de Saint-Venant (-) apud Verol et al. (2013), Kirkpatrick (1977), Lou (1981) e Hagen (1982) foram descartados por apresentarem valores extremos. Mesmo eliminando os casos extremos, é possível perceber uma grande variação nos valores de vazão de acordo com a fórmula utilizada para obtê-la.

Foram então analisadas para cada barragem rompida estudada, todas as combinações possíveis entre as formulações matemáticas restantes com o intuito de determinar qual delas acarretaria valores mais críticos de vazão de ruptura ( $Q_{\text{máx}}$ ) e tempo de base ( $T_b$ ).

Quadro 11 – Vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) em  $\text{m}^3/\text{s}$  de acordo com os autores estudados para os dados históricos de ruptura de barragens estudados.

Barragem	Hd (m)	Independente da brecha							Em função da brecha				
		Q <sub>máx</sub> ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) conforme os autores listados abaixo							Q <sub>máx</sub> ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) por Wetmore e Fread (1984)				
		Kirkpatrick (1977)	Singh e Snorrason (1984)	Hagen (1982)	Bureau of Rec. (1982)	SCS (1981)	Lou (1981)	Saint-Venant (-)	Tp por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) e Bb por Bureau of Rec. (1988)	Tp e Bb por Von Thun e Gillette (1990)	Tp por Bureau of Rec. (1982) e Bb por Bureau of Rec. (1988)	Tp por Bureau of Rec. (1982) e Bb por Von Thun e Gillette (1990)	Tp por Bureau of Rec. (1982) e Bb por Wahl (2004)
Bullock Draw Dike	5,79	26,0	370,5	1382,8	150,1	130,5	37,9	62,7	216,6	325,1	216,6	325,1	548,8
Frankfurt	9,75	269,4	992,3	6212,1	942,9	819,5	60,9	94,4	1278,4	3907,8	1278,4	3904,3	2019,8
Frenchman Creek	12,50	522,9	1585,1	8741,5	1564,5	1359,8	76,3	971,8	2436,8	6153,1	2437,4	6146,2	3752,2
Goose Creek	6,10	4,6	408,2	4339,9	34,3	29,8	39,7	150,5	105,3	1180,3	105,3	1179,9	623,9
Johnston City	4,27	26,0	208,0	845,7	150,1	130,5	28,7	38,8	137,0	205,6	137,0	205,6	255,8
Kelly Barnes	11,58	470,8	1373,0	1306,9	1444,4	1255,4	71,2	453,3	2082,8	2144,7	2083,0	2144,5	3103,3
Lake Frances	15,24	699,4	2306,5	1958,9	1951,1	1695,7	91,4	583,0	3697,8	3699,2	3698,2	3698,6	6160,4
Rito Manzanares	7,32	66,4	576,1	229,4	317,9	276,3	46,9	122,7	461,3	589,6	461,3	589,6	984,1
Sheep Creek	17,07	984,1	2857,4	2668,6	2526,8	2196,0	101,3	705,1	5039,6	6394,4	5040,4	6391,6	8175,8

(fonte: elaborada pela autora)

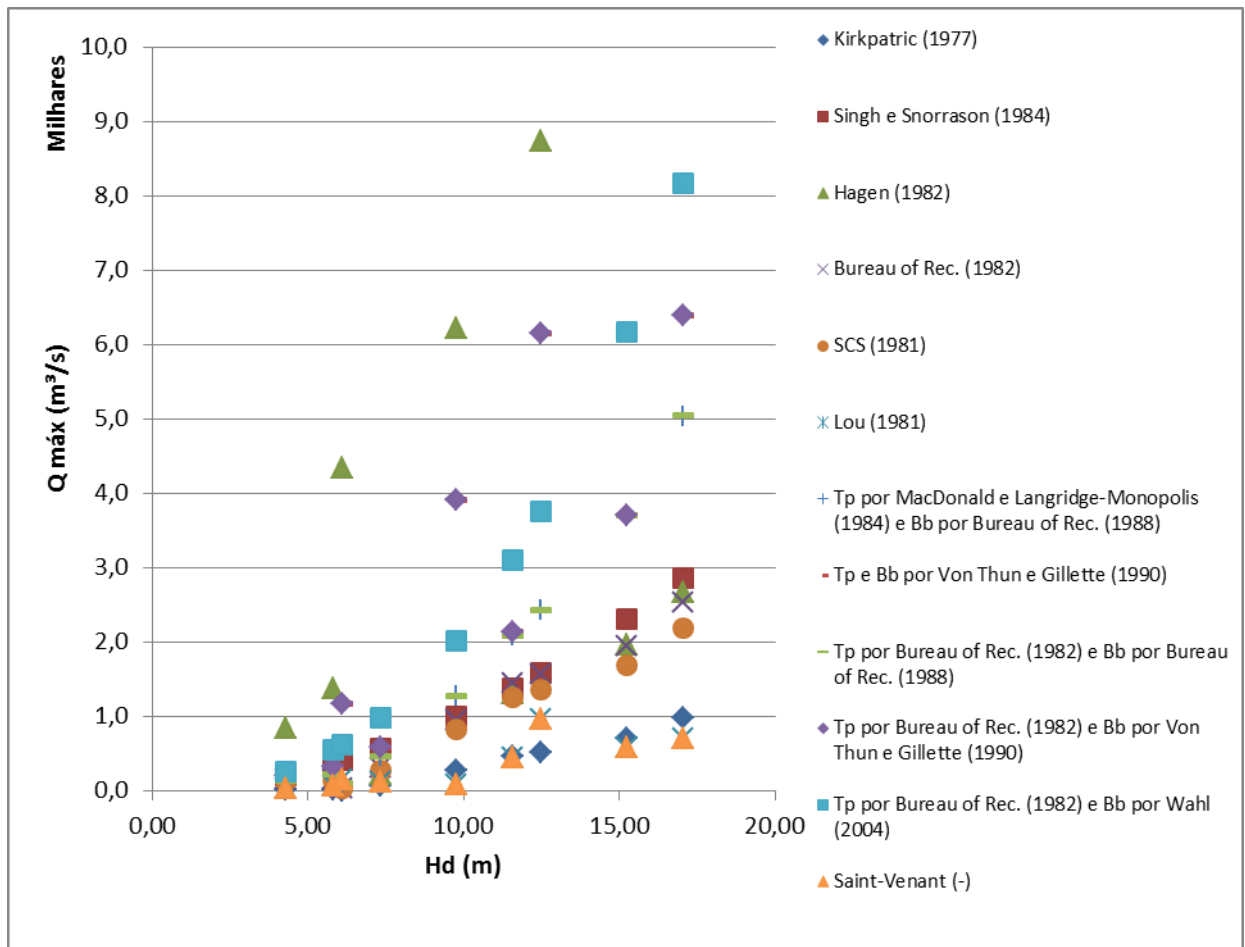
Onde:

Hd – altura da barragem [m];

Tp – tempo de pico [h];

Bb – largura da brecha [m].

Figura 11 – Vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) do hidrograma de ruptura em relação a altura de Barragem ( $H_d$ ) para as barragens rompidas estudadas.



(fonte: elaborada pela autora)

Os quadros 12 e 13 exemplificam o estudo que foi realizado para as 9 barragens rompidas estudadas. No quadro 12, estão listados todos os casos analisados de acordo com as combinações possíveis de fórmulas para determinação de hidrogramas de ruptura distintos.

Vale ressaltar que para essa análise de combinações, não foram considerados os métodos de Hagen, Lou e Kirkpatrick, previamente descartados. No quadro 13, observa-se para a barragem de Bullock Draw Dike, que o método mais crítico para determinação da  $Q_{\text{máx}}$  foi o proposto por Wetmore e Fread (1981), em função do tempo de pico calculado pelo Bureau of Reclamation (1988) e da brecha proposta por Wahl (1998). Para a mesma barragem, o método que apresentou maior tempo de base foi SCS (1981).

Quadro 12 – Cenários analisados para a barragem de Bullock Draw Dike.

Cenário	Vazão (m³/s)	Brecha (m)	Tempo de formação de brecha (h)
1	Singh e Snorrason (1984)	-	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)
2	Bureau of Reclamation (1982)	-	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)
3	Soil Conservation Service (1981)	-	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)
4	Wetmore e Fread (1984)	Bureau of Reclamation (1988)	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)
5	Wetmore e Fread (1984)	Von Thun e Gillette (1990)	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)
6	Wetmore e Fread (1984)	Wahl (1998)	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)
7	Singh e Snorrason (1984)	-	Von Thun e Gillette (1990)
8	Bureau of Reclamation (1982)	-	Von Thun e Gillette (1990)
9	Soil Conservation Service (1981)	-	Von Thun e Gillette (1990)
10	Wetmore e Fread (1984)	Bureau of Reclamation (1988)	Von Thun e Gillette (1990)
11	Wetmore e Fread (1984)	Von Thun e Gillette (1990)	Von Thun e Gillette (1990)
12	Wetmore e Fread (1984)	Wahl (1998)	Von Thun e Gillette (1990)
13	Singh e Snorrason (1984)	Bureau of Reclamation (1988)	Bureau of Reclamation (1988)
14	Singh e Snorrason (1984)	Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Reclamation (1988)
15	Singh e Snorrason (1984)	Wahl (1998)	Bureau of Reclamation (1988)
16	Bureau of Reclamation (1982)	Bureau of Reclamation (1988)	Bureau of Reclamation (1988)
17	Bureau of Reclamation (1982)	Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Reclamation (1988)
18	Bureau of Reclamation (1982)	Wahl (1998)	Bureau of Reclamation (1988)
19	Soil Conservation Service (1981)	Bureau of Reclamation (1988)	Bureau of Reclamation (1988)
20	Soil Conservation Service (1981)	Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Reclamation (1988)
21	Soil Conservation Service (1981)	Wahl (1998)	Bureau of Reclamation (1988)
22	Wetmore e Fread (1984)	Bureau of Reclamation (1988)	Bureau of Reclamation (1988)
23	Wetmore e Fread (1984)	Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Reclamation (1988)
24	Wetmore e Fread (1984)	Wahl (1998)	Bureau of Reclamation (1988)

(fonte: elaborada pela autora)

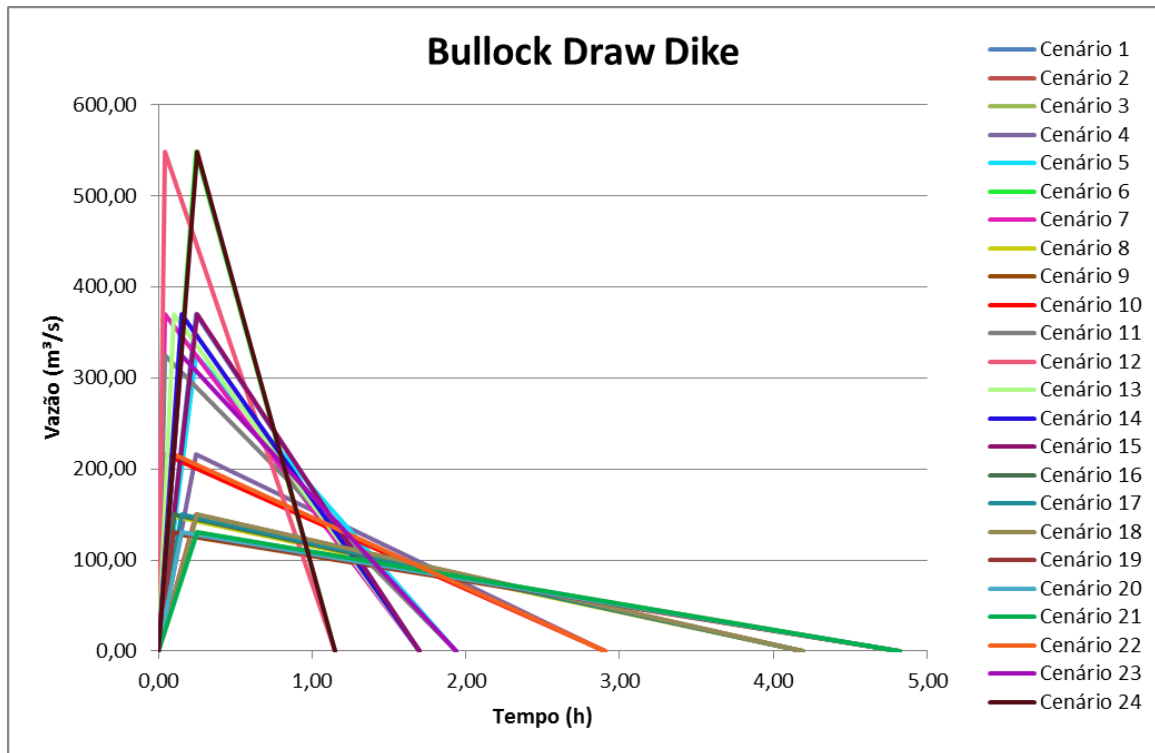
Quadro 13 – Resultados de Vazão máxima (Q máx) e tempo de base (Tb) para a barragem de Bullock Draw Dike.

Cenário	Q (m³/s)	Tempo de base (h)	Cenário	Q (m³/s)	Tempo de base (h)
1	370,4566	1,7	13	370,4566	1,7
2	150,1278	4,19	14	370,4566	1,7
3	130,4775	4,82	15	370,4566	1,7
4	216,6335	2,9	16	150,1278	4,19
5	325,0403	1,94	17	150,1278	4,19
6	548,7807	1,15	18	150,1278	4,19
7	370,4566	1,7	19	130,4775	4,82
8	150,1278	4,19	20	130,4775	4,82
9	130,4775	4,82	21	130,4775	4,82
10	216,6385	2,9	22	216,6371	2,9
11	325,0517	1,94	23	325,0457	1,94
12	548,8131	1,15	24	548,7794	1,15

(fonte: elaborada pela autora)

O caso da barragem de Bullock Draw Dike reflete o comportamento da maior parte dos casos analisados, portanto esses foram os métodos adotados como críticos para a determinação de  $Q_{\text{máx}}$  e  $T_b$ . Na figura 12 estão apresentados os hidrogramas de ruptura para essa barragem. Os hidrogramas de ruptura das demais estão apresentados no anexo A.

Figura 12 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Bullock Draw Dike.



(fonte: elaborada pela autora)

## 5.2 ADIMENSIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS

Para fins de adimensionalização dos parâmetros analisados, foi determinada a relação  $\beta_\lambda$ , conforme a fórmula 21 apresentada a seguir. No quadro 14 estão apresentados os valores de  $\beta_\lambda$  para os casos estudados, bem como seus valores mínimo, máximo, médio e desvio médio, segundo os métodos para determinação de brecha estudados.

$$\beta_\lambda = \frac{Bd}{Hd} \quad (\text{fórmula 21})$$

Onde:

$\beta_\lambda$  – relação adimensional entre a largura de brecha e a altura da barragem;

Hd– altura da barragem [m];

Bb – largura final da brecha [m].

Conforme pode ser observado no quadro 14, para a brecha proposta por Bureau of Reclamation (1988),  $\beta_\lambda$  tem valor médio igual a 2,11 e desvio médio de 0,5. O método de Von Thun e Gillette apresenta média de 2,71 e desvio médio de 0,3, desconsiderando os 3 pontos que fogem da tendência geral de comportamento de dados (em decorrência do fator compensatório Cb, conforme mencionado anteriormente).

Os métodos de Von Thun e Gillette (1990) e Bureau of Reclamation (1988) apresentam valores relativamente parecidos. Já o mecanismo de formação de brecha de Wahl (1998) apresenta relação entre a altura da barragem e a largura da brecha constante e no valor de 4,0.

Os valores de  $\beta_\lambda$  médios entre os métodos analisados, em geral são mais próximos do mecanismo de brecha de Von Thun e Gillette (1990), porém o método escolhido para ser aplicado às barragens hipotéticas foi o de Wahl (1998), tendo em vista que este resulta nos valores mais críticos de brecha.

Quadro 14 – Apresentação dos valores de  $\beta_\lambda$  para as barragens rompidas estudadas, conforme os mecanismos de formação de brecha analisados.

Barragem	Hd (m)	Bureau of Reclamation (1988)	Von Thun e Gillette (1990)	Wahl (1998)	$\beta_\lambda$ médio
Bullock Draw Dike	5,79	1,6	2,4	4,0	2,5
Frankfurt	9,75	2,5	*	4,0	3,2
Frenchman Creek	12,50	2,6	*	4,0	3,2
Goose Creek	6,10	0,7	*	4,0	1,6
Johnston City	4,27	2,1	3,2	4,0	3,0
Kelly Barnes	11,58	2,7	2,8	4,0	3,1
Lake Frances	15,24	2,4	2,4	4,0	2,8
Rito Manzanares	7,32	1,9	2,4	4,0	2,6
Sheep Creek	17,07	2,5	3,1	4,0	3,1
Valor Médio		2,1	2,7	4,0	2,8
Valor Máximo		2,7	3,2	4,0	3,3
Valor Mínimo		0,7	2,4	4,0	1,9
Desvio Médio		0,5	0,3		-

(fonte: elaborada pela autora)



Hd– altura da barragem [m];

Bb – largura final da brecha [m].

A mesma análise foi aplicada ao tempo de pico  $T_p$ , resultando na relação  $\tau_\lambda$ , determinada conforme a fórmula 22 apresentada a seguir. No quadro 15 estão apresentados os valores de  $\tau_\lambda$  para os casos estudados, bem como seus valores mínimo, máximo, médio e desvio médio segundo os métodos para determinação de brecha estudados.

$$\tau_\lambda = \frac{T_p \ 3600 \sqrt{g}}{\sqrt{Hd}} \quad (\text{fórmula 22})$$

Onde:

$\tau_\lambda$  – relação adimensional entre o tempo de pico e a altura da barragem;

Hd– altura da barragem [m];

$T_p$  – tempo de pico [h].

g – aceleração da gravidade, considerada equivalente a 9,806 para fins de cálculo [m/s<sup>2</sup>].

Quadro 15 – Apresentação dos valores de  $\tau_\lambda$  para as barragens rompidas estudadas, conforme os mecanismos de formação de brecha analisados.

Barragem	Hd (m)	$\tau_\lambda$				
		Independente da brecha		Em função da brecha		
		MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Rec. (1982), com brecha por Bureau of Rec. (1988)	Bureau of Rec. (1982), com brecha por Von Thun e Gillette (1990)	Bureau of Rec. (1982), com brecha por Wahl (2004)
Bullock Draw Dike	5,79	1157,0	214,2	471,2	707,0	1193,7
Frankfurt	9,75	1137,7	578,3	1272,2	3889,1	2010,4
FrenchmanCreek	12,50	3502,1	760,3	1672,7	4222,9	2575,8
Goose Creek	6,10	1062,4	96,4	212,0	2377,0	1256,5
Johnston City	4,27	897,2	214,2	471,2	707,0	879,5
Kelly Barnes	11,58	2390,9	728,2	1602,0	1649,4	2387,3
Lake Frances	15,24	2590,2	856,7	1884,7	1885,0	3141,2
Rito Manzanares	7,32	1137,7	321,3	706,8	903,3	1507,8
SheepCreek	17,07	2984,1	985,2	2167,5	2749,2	3518,2
Valor Médio		1653,5	417,3	918,1	1864,1	1155,7
Valor Máximo		3502,1	985,2	4222,9	3518,2	2565,4
Valor Mínimo		897,2	96,4	707,0	879,5	408,7
Desvio Médio		883,2	281,6	1056,4	758,6	-

(fonte: elaborada pela autora)

Conforme pode ser observado no quadro 15, métodos do Bureau of Reclamation (1982) com brecha pelo Wahl (1998), de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) e do Bureau of Reclamation com brecha por Von Thun e Gillette apresentam valores médios relativamente semelhantes. O método do Bureau of Reclamation (1982) com brecha pelo Bureau of Reclamation (1988) resulta em valores similares aos de  $\tau_\lambda$  médio.

No entanto, o método escolhido para ser aplicado às barragens hipotéticas é o de Von Thun e Gillette (1990), tendo em vista que este gera valores significativamente menores de  $\tau_\lambda$ . Isso significa que o pico da vazão chega mais rapidamente a seções a jusante, sendo, portanto, o caso mais crítico a ser estudado.

Foi realizada ainda uma adimensionalização da vazão máxima  $Q_{\text{máx}}$ , resultando na relação  $\varepsilon_\lambda$ , determinada conforme a fórmula 23. No quadro 16 estão apresentados os valores de  $\varepsilon_\lambda$  para os casos estudados, bem como seus valores mínimo, máximo, médio e desvio médio segundo os métodos para determinação de brecha estudados.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{Q_{\text{máx}}}{Hd^{\frac{5}{2}}\beta_\lambda\sqrt{2g}} \quad (\text{fórmula 23})$$

Onde:

$\varepsilon_\lambda$  – relação adimensional entre a vazão máxima e a brecha e a altura da barragem;

Hd– altura da barragem [m];

$\beta_\lambda$  – relação adimensional entre a largura de brecha e a altura da barragem;

g – aceleração da gravidade, considerada equivalente a 9,806 para fins de cálculo [m/s<sup>2</sup>].

Como pode ser observado no quadro 16, valores de  $\varepsilon_\lambda$ , obtidos por Wetmore e Fread (1984) com  $T_p$  por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) e brecha por Bureau of Reclamation (1988), e também por Wetmore e Fread (1984), porém com  $T_p$  por Bureau of Reclamation (1982) e brecha por Bureau of Reclamation (1988) apresentam valores idênticos até uma precisão de duas casa após a vírgula. Os valores calculados ainda pelo método de Wetmore e Fread (1984), com  $T_p$  por Bureau of Reclamation (1982) e brecha por Von Thun e Gillette

(1990), e com  $T_p$  e  $B_b$  calculados ambos por Von Thun e Gillette, também apresentam valores idênticos entre si e desvio médio bem superior ao dos demais. Vale ressaltar ainda que esses valores são bastante semelhantes ao método de Singh e Snorrason (1984), obtido independente da brecha.

O Método de SCS (1981) gera os menores resultados da relação  $\epsilon_\lambda$ , sendo estes similares aos do Bureau of Reclamation (1982), sendo ambos obtidos independente da brecha e com valores inferiores em comparação aos demais métodos. Os desvios médios referente a esses dois métodos são idênticos entre si e muito parecidos aos de Wetmore e Fread (1984) com  $T_p$  por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) e brecha por Bureau of Reclamation (1988), e com  $T_p$  por Bureau of Reclamation (1982) e brecha por Bureau of Reclamation (1988).

O método que apresenta valores mais críticos dentre os analisados é o de Wetmore e Fread (1984) com tempo de pico por Bureau of Reclamation e brecha por Wahl (1998). Este apresenta uma relação adimensional entre a vazão máxima e a brecha e a altura da barragem,  $\epsilon_\lambda$ , constante no valor 0,38, e, conseqüentemente, desvio médio igual a zero.

Quadro 16 – Valores de  $\epsilon_\lambda$  para as barragens rompidas estudadas, conforme os mecanismos de formação de brecha analisados.

Barragem	Hd (m)	$\epsilon_\lambda$								$\epsilon_\lambda$ médio
		Independente da brecha			Em função da brecha					
		Singh e Snorrason (1984)	Bureau of Rec. (1982)	SCS (1981)	Tp por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) e Bb por Bureau of Rec (1988)	Tp e Bb por Von Thun e Gillette (1990)	Tp por Bureau of Rec. (1982) e Bb por Bureau of Rec. (1988)	Tp por Bureau of Rec. (1982) e Bb por Von Thun e Gillette (1990)	Tp por Bureau of Rec. (1982) e Bb por Wahl (1998)	
Bullock Draw Dike	5,79	0,26	0,11	0,09	0,15	0,23	0,15	0,23	0,38	0,18
Frankfurt	9,75	0,19	0,18	0,16	0,24	0,74	0,24	0,74	0,38	0,30
FrenchmanCreek	12,50	0,16	0,16	0,14	0,25	0,63	0,25	0,63	0,38	0,28
Goose Creek	6,10	0,25	0,02	0,02	0,06	0,73	0,06	0,73	0,38	0,13
Johnston City	4,27	0,31	0,23	0,20	0,21	0,31	0,21	0,31	0,38	0,26
Kelly Barnes	11,58	0,17	0,18	0,16	0,26	0,27	0,26	0,27	0,38	0,23
Lake Frances	15,24	0,14	0,12	0,11	0,23	0,23	0,23	0,23	0,38	0,19
Rito Manzanares	7,32	0,22	0,12	0,11	0,18	0,23	0,18	0,23	0,38	0,19
SheepCreek	17,07	0,13	0,12	0,10	0,24	0,30	0,24	0,30	0,38	0,21
Valor Médio		0,20	0,12	0,10	0,19	0,36	0,19	0,36	0,38	0,21
Valor Máximo		0,31	0,23	0,20	0,26	0,74	0,26	0,74	0,38	0,34
Valor Mínimo		0,13	0,02	0,02	0,06	0,23	0,06	0,23	0,38	0,09
Desvio Médio		0,05	0,04	0,04	0,05	0,20	0,05	0,20	0,00	-

(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

$\varepsilon_\lambda$  – relação adimensional entre a vazão máxima e a brecha e a altura da barragem;

Hd– altura da barragem [m];

Bb – largura final da brecha [pés];

Tp – tempo de formação da brecha [h].

### 5.3 BARRAGENS HIPOTÉTICAS ESTUDADAS

Nas seções a seguir estão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos descritos nos capítulos anteriores deste trabalho, para as 6 barragens hipotéticas propostas, referentes aos dois casos de condições críticas estudados: caso 1, no qual é considerada a maior vazão de ruptura ( $Q$  máx), e caso 2, onde é considerado o maior tempo de esvaziamento ( $T_b$ ).

#### 5.3.1 Determinação das características das barragens hipotéticas estudadas

Analisando os dados históricos de ruptura de barragens, quanto à relação entre a altura da barragem e seu volume de reservação, foi constatada a existência de dois comportamentos distintos, como pode ser observado na figura 13 apresentada a seguir. Para barragens com reservação maiores ou iguais a  $5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>, foi obtida a fórmula 24, e para reservações inferiores a  $5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>, foi determinada a fórmula 25. Observando a figura 13 e as fórmulas deduzidas, foi concluído que para ambos os casos, o volume de reservação cresce linearmente com o aumento da altura da barragem.

$$Vr = 2 \times 10^{-6} Hd + 143628 \quad (\text{fórmula 24})$$

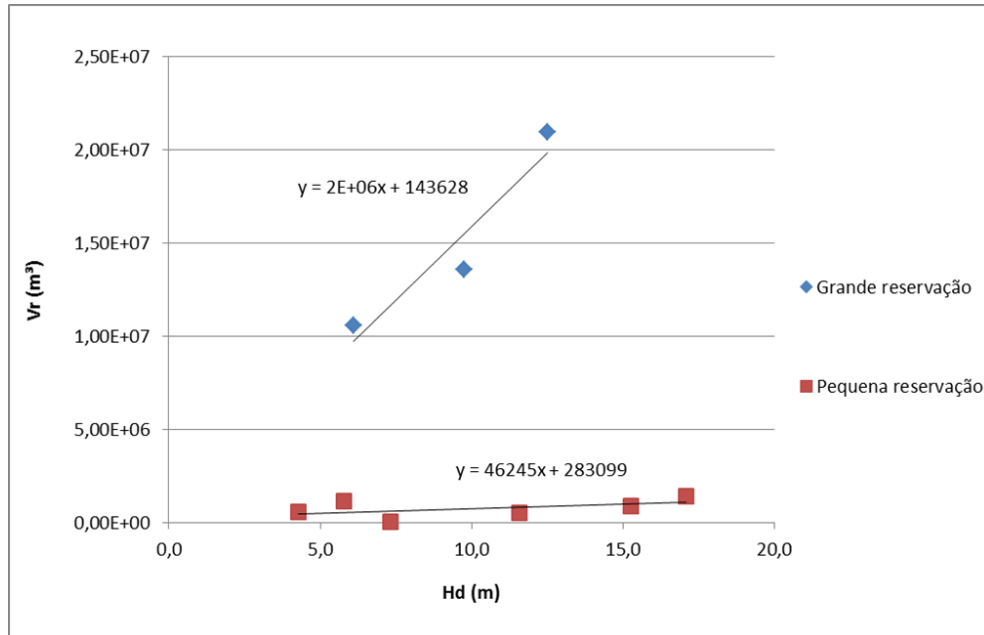
$$Vr = 46245 Hd + 283099 \quad (\text{fórmula 25})$$

Onde:

Hd – altura da barragem [m];

Vr – volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [m<sup>3</sup>].

Figura 13 – Relações entre o volume do reservatório e a altura da barragem.



(fonte: elaborada pela autora)

Foram propostas então barragens hipotéticas para os casos de pequena e grande reserwações com alturas de 5, 7,5 e 10 metros. Utilizando as fórmulas 24 e 25, foi possível determinar os volumes de reserwação para cada caso. Para cada uma das 6 barragens hipotéticas, foram estudados dois casos distintos, conforme os casos críticos de vazão máxima e tempo de base determinados no item 5.1.4 (Análises da vazão máxima e do tempo de base críticos para as barragens levantadas).

No caso 1, a vazão máxima foi calculada por Wetmore e Fread (1981) em função do tempo de pico calculado por Bureau of Reclamation (1988) e da brecha proposta por Wahl (1998). Já para o caso 2, a vazão máxima foi determinada através da formulação matemática proposta por SCS (1981). No quadro 17, são apresentadas as principais características das 6 barragens hipotéticas estudadas.

Quadro 17 – Cálculo da brecha, tempo de pico, vazões máximas e tempo de base para as barragens hipotéticas estudadas.

Reservação	Barragem	Hd (m)	Vr (m³)	As (m²)	Bb (m) (Wahl, 1998)	Tb 1 (h)	Q máx1 (m³/s)	Tp1 (h)	Tp2 (h)	Q máx2 (m³/s)	Tb 2 (h)
Pequena	B1	5,0	5,14E+05	1,54E+05	20	0,90	316,3	0,22	0,08	326,0	0,88
	B2	7,5	6,30E+05	1,26E+05	30	0,60	579,1	0,33	0,11	690,2	0,51
	B3	10,0	7,46E+05	1,12E+05	40	0,66	626,9	0,44	0,15	1175,2	0,35
Grande	B4	5,0	1,01E+07	3,04E+06	20	14,87	378,9	0,22	0,08	326,0	17,29
	B5	7,5	1,51E+07	3,03E+06	30	8,20	1026,0	0,33	0,11	690,2	12,19
	B6	10,0	2,01E+07	3,02E+06	40	5,47	2046,4	0,44	0,15	1175,2	9,52

(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

Hd – altura da barragem [m];

Vr– volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [m³];

Bb– largura da brecha [m];

Tp– tempo de pico (igual ao tempo de formação da brecha) [h];

Q máx – vazão máxima defluente da barragem em ruptura [m³/s];

Tb – tempo de base [h].

Para a determinação de  $\beta_\lambda$ , a largura da brecha foi calculada utilizando o método de Wahl (1998), determinado o mais crítico dentre os mecanismos de formação de brecha analisados, conforme concluído no item 5.2 (Adimensionalização de parâmetros). Os valores de  $\beta_\lambda$  estão demonstrados no quadro 18.

Quadro 18 – Valores de  $\beta_\lambda$  para as barragens hipotéticas estudadas.

Reservação	Barragem	Hd (m)	Bb (m)	$\beta_\lambda$
Pequena	B1	5	20	4,0
	B2	7,5	30	4,0
	B3	10	40	4,0
Grande	B4	5	20	4,0
	B5	7,5	30	4,0
	B6	10	40	4,0

(fonte: elaborada pela autora)

Os valores de  $\tau_\lambda$  foram calculados com Tp conforme Von Thun e Gillette (1990), uma vez que foi concluído no item 5.2 (Adimensionalização de parâmetros), que esse é o método mais

crítico presente na literatura analisada para determinação do tempo de formação de brecha. Os valores de  $\tau_\lambda$ , calculados para os casos estudados, estão apresentados no quadro 19.

Conforme pode ser observado no quadro 19,  $\tau_\lambda$  tem valor médio de 454,1 e desvio médio de 53,7. Além disso, vale salientar que os valores de  $\tau_\lambda$  para as barragens B1 e B4, B2 e B5 e B3 e B6 são idênticos, uma vez que a fórmula de Von Thun e Gillette (1990), independe da brecha e, para materiais altamente erodíveis, é função apenas de  $H_w$ , altura d'água no momento de ruptura. Visando a segurança,  $H_w$  foi adotado como equivalente a altura da barragem ( $H_d$ ). Sendo assim, é possível concluir que a relação adimensional entre o tempo de pico e a altura da barragem não é afetada pelo volume de reservação. Vale ressaltar ainda que devido a esse mesmo motivo,  $\tau_\lambda$  apresenta valores iguais para ambos os casos 1 (maior  $Q$  máx) e 2 (maior  $T_b$ ) analisados.

Quadro 19 – Valores de  $\tau_\lambda$  para as barragens hipotéticas estudadas.

Barragem	Hd (m)	Tp (h)	$\tau_\lambda$
B1 e B4	5	0,08	378,12
B2 e B5	7,5	0,11	463,10
B3 e B6	10	0,15	534,74
Valor médio			454,10
Valor máximo			534,70
Valor mínimo			378,10
Desvio médio			53,70

(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

$H_d$  – altura da barragem [m];

$\tau_\lambda$  – relação adimensional entre o tempo de pico e a altura da barragem.

No quadro 20 constam os valores de  $\varepsilon_\lambda$  para as barragens hipotéticas estudadas, de acordo com os casos 1 (maior  $Q$  máx) e 2 (maior  $T_b$ ). Percebe-se que  $\varepsilon_\lambda$  é inversamente proporcional a altura da barragem ( $H_d$ ) e à vazão máxima oriunda defluente de um evento de ruptura de barragem ( $Q$  máx).

Vale ressaltar que para o caso 2, os valores de  $\varepsilon_\lambda$  independem do volume de reservação da barragem em decorrência da fórmula proposta por SCS (1981), utilizada para o cálculo da vazão máxima no caso 2, ser função apenas da altura d'água no momento de ruptura, arbitrada

como igual a altura da barragem. Observa-se também que os valores médios de  $\varepsilon_\lambda$  são aproximadamente iguais para os casos 1 e 2 analisados. O desvio médio, para ambos os casos, é aproximadamente zero.

Quadro 20 – Valores de  $\varepsilon_\lambda$  para as barragens hipotéticas estudadas.

Reservação	Barragem	Hd (m)	Q máx 1 (m <sup>3</sup> /s)	$\varepsilon_\lambda$ 1	Q máx 2 (m <sup>3</sup> /s)	$\varepsilon_\lambda$ 2
Pequena	B1	5	316,3	0,32	326,0	0,33
	B2	7,5	579,1	0,21	690,2	0,25
	B3	10	626,9	0,11	1175,2	0,21
Grande	B4	5	378,9	0,38	326,0	0,33
	B5	7,5	1026,0	0,38	690,2	0,25
	B6	10	2046,4	0,37	1175,2	0,21
Valor médio				0,27	-	0,26
Valor máximo				0,38	-	0,33
Valor mínimo				0,11	-	0,21
Desvio médio				0,09	-	0,04

(fonte: elaborada pela autora)

Onde:

$\varepsilon_\lambda$  – relação adimensional entre a vazão máxima e a brecha e a altura da barragem;

Hd – altura da barragem [m];

Q máx – vazão máxima defluente da barragem em ruptura [m<sup>3</sup>/s].

### 5.3.2 Hidrogramas de ruptura das barragens hipotéticas

Nas figuras 14 a 17 a seguir estão apresentados os hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas estudadas com alturas 5m, 7,5m e 10 m para as condições de reservação grande ( $V_r \geq 5 \times 10^6$ ) e pequena ( $V_r < 5 \times 10^6$ ). Para cada uma das barragens analisadas foram consideradas duas situações: caso 1, considerando maior vazão de pico oriunda de eventos de ruptura de barragem, e caso 2, no qual foi considerado o maior tempo de base, ou tempo de esvaziamento do hidrograma.

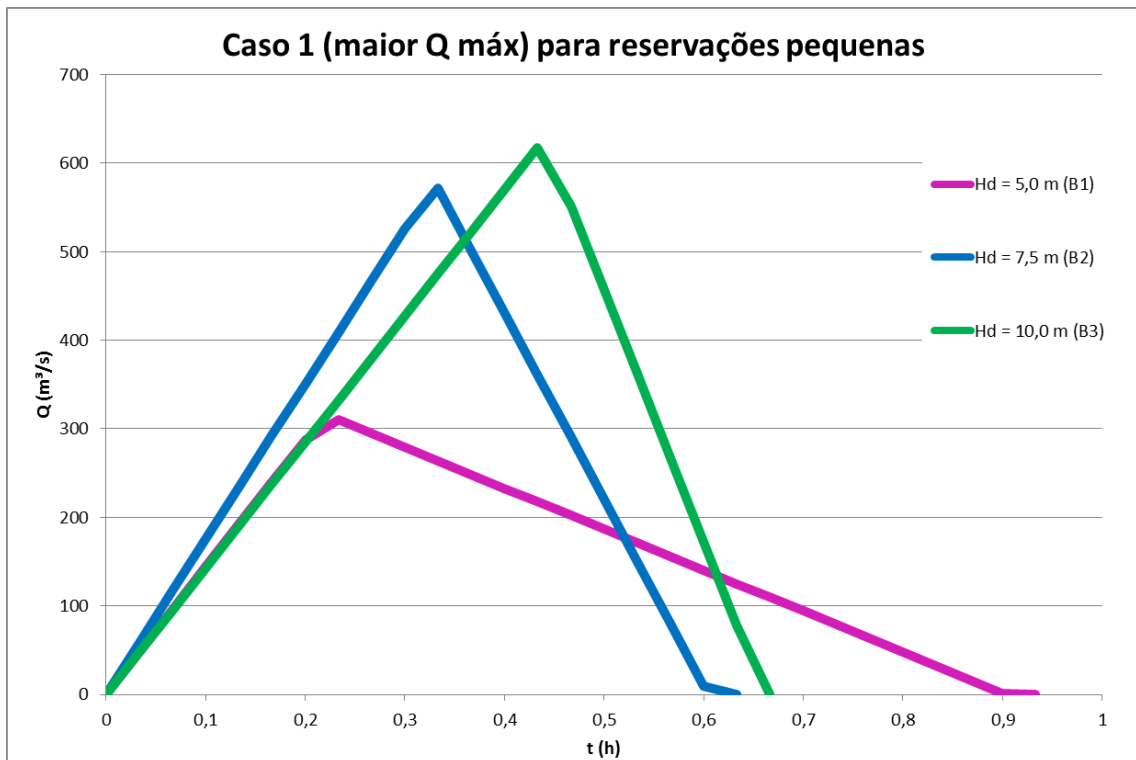
O caso da barragem hipotética B1, com altura de 5m e reservação pequena, apresentou vazão máxima de 310,17 m<sup>3</sup>/s, tempo de pico de 0,23 horas e tempo de base de 0,93 horas. Já no caso 2, o pico ocorreu para o tempo de 0,07 horas com 301,84 m<sup>3</sup>/s. O tempo de base para o caso 2 foi de 0,88 horas.



A barragem B2, também de pequena reservação, com altura de 7,5m, atingiu seu pico em 526,46 m<sup>3</sup>/s para 0,3 horas e apresentou tempo de base de 0,63 horas, no caso 1. No caso 2, os mesmos parâmetros passaram para os seguintes valores: 656,11 m<sup>3</sup>/s, 0,11 horas e 0,52 horas, respectivamente.

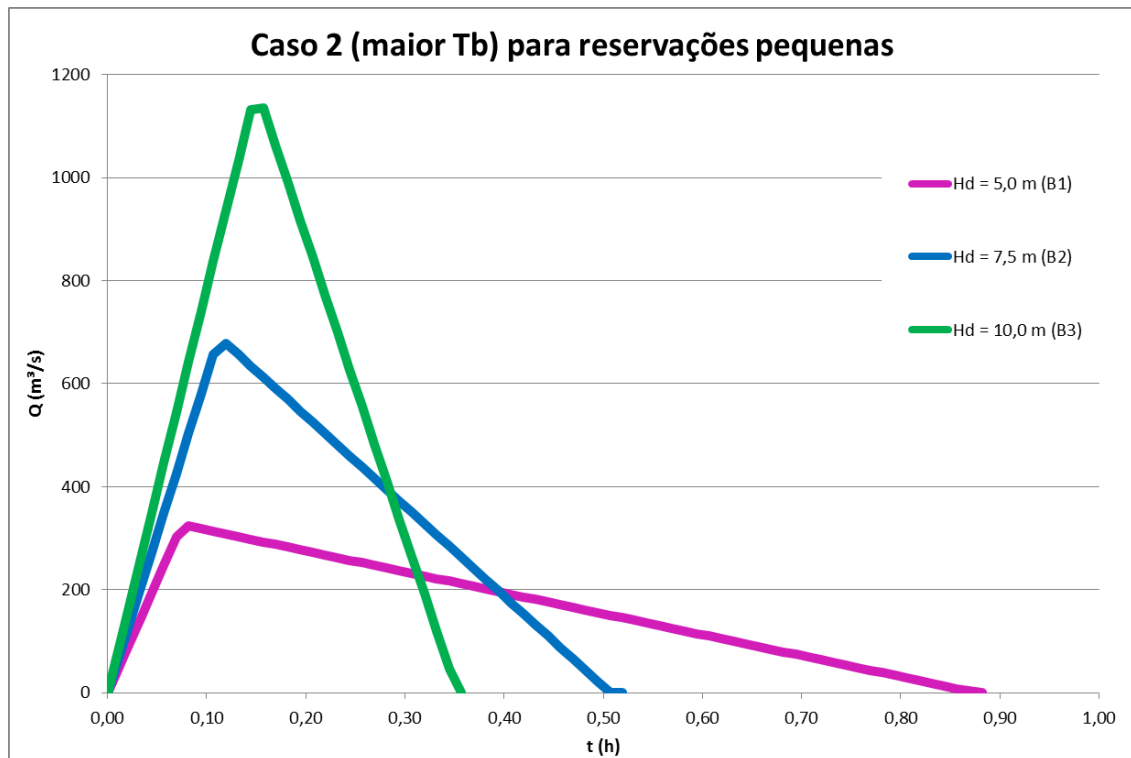
Também de pequena reservação, a barragem B3, com altura de 10m, teve vazão máxima de 617,44 m<sup>3</sup>/s, ocorrendo para um tempo de pico de 0,43 horas e tempo de base de 0,67 horas para o caso 1. Considerando o caso 2, o tempo de base foi de 0,36 horas, e o pico foi em 0,14 horas para a vazão de 1131,66 m<sup>3</sup>/s.

Figura 14 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de pequena reservação estudadas, considerando o caso 1 (maior Q máx).



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 15 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de pequena reservação estudadas, considerando o caso 2 (maior  $T_b$ ).



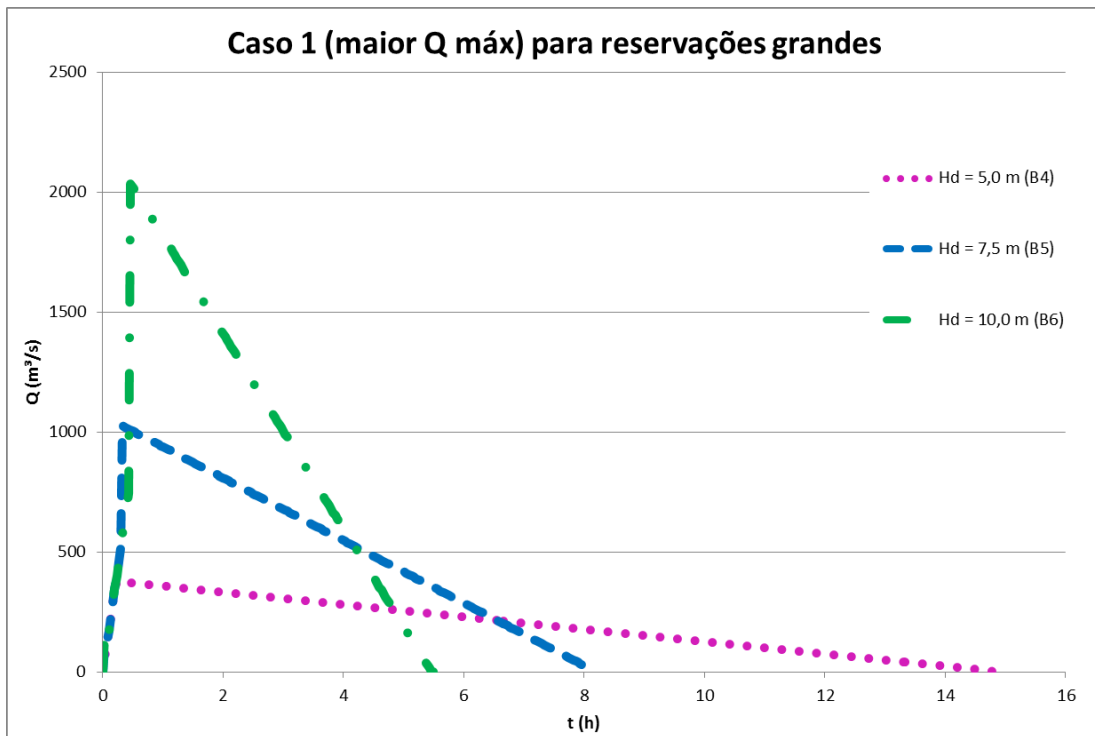
(fonte: elaborada pela autora)

A barragem B4 tem altura de 5,0m e grande reservação. No caso 1, o pico para a mesma foi de 344,46  $m^3/s$ , ocorrendo em 0,2 horas, e o tempo de base foi de 14,90 horas. Para o caso 2, a vazão máxima foi de 289,77  $m^3/s$ , o tempo de pico de 0,07 horas e o tempo de base de 17,27 horas.

Para a barragem de 7,5m e grande reservação, B5, a vazão máxima foi de 516,69  $m^3/s$ , o tempo de pico de 0,3 horas e o tempo de base de 8,20 horas para o caso 1. No caso 2, o pico ocorreu para uma vazão de 613,51  $m^3/s$  e um tempo de 0,10 horas. Nesse caso, o tempo de base foi de 12,2 horas.

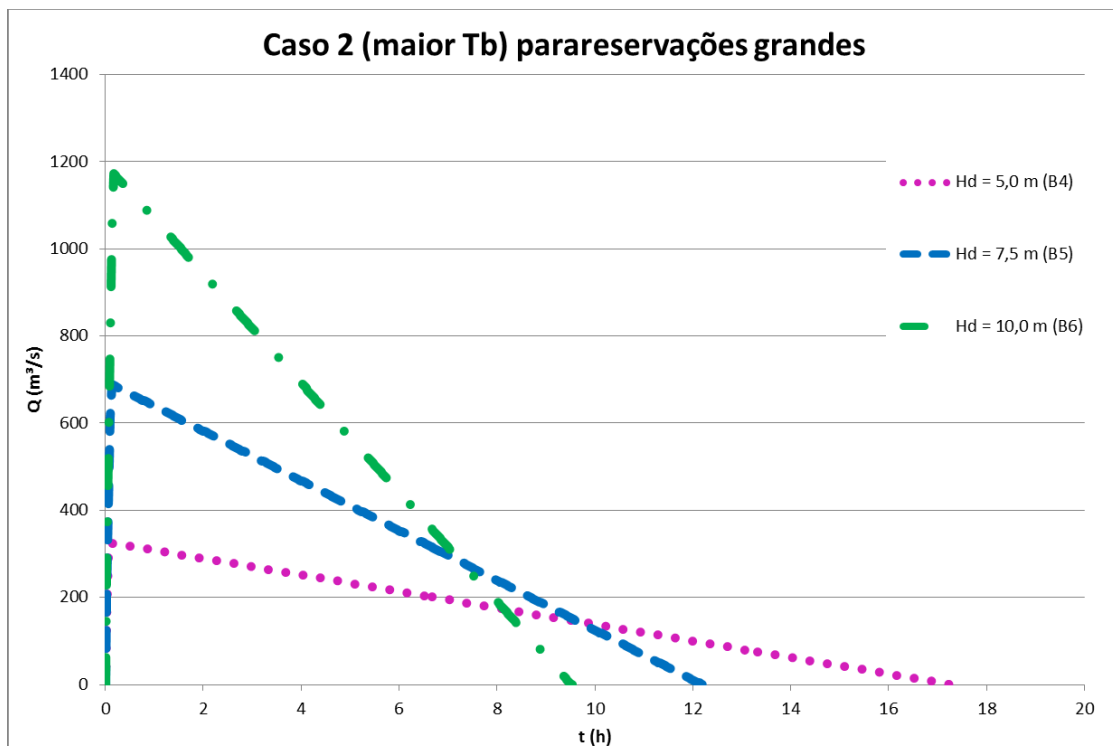
Também de grande reservação, a barragem B6, com altura de 10m, apresentou no caso 1, vazão de pico de 746,33  $m^3/s$ , o tempo de pico foi de 0,43 horas e o tempo de base de 5,5 horas. Já para o caso 2, os resultados foram os seguintes: vazão de pico de 1044,61  $m^3/s$ , tempo de pico de 0,13 horas e tempo de base de 9,53 horas.

Figura 16 – Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de grande reservação estudadas, considerando o caso 1 (maior Q máx).



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 17 - Hidrogramas de ruptura para as barragens hipotéticas de pequena reservação estudadas, considerando o caso 2 (maior T<sub>b</sub>).



(fonte: elaborada pela autora)

Para todas as barragens analisadas, foi constatado que a altura da barragem é diretamente proporcional à vazão máxima de ruptura e ao tempo de pico (equivalente ao tempo de formação da brecha) e inversamente proporcional ao tempo de base. Foi observado também que o caso 2 (maior  $T_b$ ) atinge o pico mais rapidamente que o caso 1 (maior  $Q_{\text{máx}}$ ).

Além disso, observou-se também que o caso 2 apresenta vazões de pico maiores do que o caso 1 para barragens com altura superior a 5,0m. Percebe-se também que o tempo de base do caso 1 é maior do que o do caso 2 para grandes volumes de reservação, e menor para pequenas reservações.

Comparando os resultados, foi constatado que o volume armazenado pela barragem não influencia significativamente o pico do hidrograma. Ou seja, os valores de vazão máxima e tempo de picos referente à barragens de grande reservação são maiores, porém semelhantes aos das barragens de pequena reservação para uma mesma altura de barramento. O mesmo não pode ser dito dos tempos de base, sendo os referentes a barragens de grande reservação muito superiores aos referentes a barragens de pequena reservação.

Por fim, foi observado que situações de grande reservação apresentam tempo de pico pequeno e tempo de base grande, portanto, os hidrogramas gerados apresentam formato semelhante ao de um triângulo retângulo. Vale ressaltar, no entanto, que o pico é atingido muito rapidamente, mas nunca no tempo igual a zero. Para pequenos volumes de reservação, a diferença nos tempos de pico e de base não é tão intensa, portanto os hidrogramas resultantes se assemelham mais a triângulos escalenos.

## 6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para fins deste estudo foram analisadas as influências das formulações matemáticas utilizadas para a determinação da vazão máxima e do tempo e mecanismo de formação de brechas em barragens de terra de pequeno porte ( $H_d \leq 10$  m). Foram analisadas 9 barragens gerais que romperam e 6 casos de barragens hipotéticas, 3 com pequena reservação ( $V_r \leq 5,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) e 3 com grande reservação ( $V_r > 5,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

Os hidrogramas foram calculados por diferentes métodos, o que permitiu determinar quais resultariam em situações mais críticas para as barragens hipotéticas:

- a) formação de brecha (Bb) mais crítica para todos os métodos: Wahl (1998 apud Grimaldi et al., 2010);
- b) maior vazão de pico do hidrograma de ruptura - Método de Wetmore e Fread (1984), considerando a brecha calculada por Wahl (1998) e tempo de formação de brecha por Bureau of Reclamation (1988);
- c) maior tempo de base - Método do SCS (1981).

Analisando-se os resultados das 6 rupturas hipotéticas, foi constatado que os hidrogramas de ruptura de barragens têm sua magnitude e forma diretamente afetadas pelos critérios utilizados para sua obtenção. Barragens com volumes de reservação maiores geram hidrogramas em formato semelhante ao de um triângulo retângulo, com pico adiantado e maiores tempos de base em comparação a barragens de menor reservação, que por sua vez apresentam hidrogramas em formato mais suave, semelhante ao de um triângulo escaleno.

Além disto, baseado nas 9 barragens que romperam, pode-se observar nas barragens hipotéticas estudadas as seguintes relações adimensionais para o hidrograma de ruptura, considerando as situações mais críticas:

- a) formação da brecha (Bb): apresentou uma relação de  $Bb/H_d$  constante de 4,0;
- b) tempo de pico ( $T_p$ ):  $378,1 \leq (T_p 3600\sqrt{2g})/\sqrt{H_d} \leq 534,7$  sendo a média igual a 454,1;

- c) vazão de pico no local da barragem ( $Q_{\text{máx}}$ ), utilizando o método de Wetmore e Fread (1984), considerando valores críticos de:  $0,11 \leq Q_{\text{máx}}/(\beta_{\lambda} H d^{5/2} \sqrt{2g}) \leq 0,38$ ;
- d) vazão de pico no local da barragem ( $Q_{\text{máx}}$ ), pelo método de SCS (1981), considerando valores críticos de  $T_b$  máx:  $0,21 \leq Q_{\text{máx}}/(\beta_{\lambda} H d^{5/2} \sqrt{2g}) \leq 0,33$  sendo a média igual a 0,26;
- e) observa-se que o valor Máximo da vazão de pico é dado pela relação  $Q_{\text{máx}}/(\beta_{\lambda} H d^{5/2} \sqrt{2g}) = 0,38$ , se considerarmos a relação  $\beta_{\lambda} = 4$  teríamos
- f)  $Q_{\text{máx}}/(H d^{5/2} \sqrt{2g}) \approx 1,5$
- g) o tempo de pico pode ser estimado, considerando:  
 $T_p = 3600 \sqrt{2g} / \sqrt{Hd} \approx 455$
- h) para o tempo de base, pode ser estimado:  
 $T_b = 2 V_r / Q_{\text{máx}}$

Vale salientar que as relações adimensionais propostas foram desenvolvidas com o intuito de servir como método empírico expedito para obter a estimativa do hidrograma para barragens de pequeno porte. Sendo assim, para que sejam utilizadas em análises de inundação a jusante geradas por ruptura de barragem, é necessário fazer a propagação da onda de ruptura.

Por fim, espera-se que com este trabalho tenha-se contribuído para a determinação das condições de análise que devem ser feitas para as barragens de pequeno porte de maneira a ajudar no planejamento de medidas a serem tomadas no caso de ruptura das barragens.

Recomenda-se que para trabalhos futuros seja estudada a propagação dos hidrogramas de maneira a obter equações ou relações que permitam uma rápida estimativa do amortecimento da vazão de pico em função da distância da barragem.

## REFERÊNCIAS

- BALBI, D. A. F. **Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens**: estudo de caso – barragem de Peti/MG. 2008. 336 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, julho de 2002. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br>>. Acesso em: 08 out. 2013.
- BRASIL, L. S. S. **Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem**: estudo de caso – barragem de Rio de Pedras/MG. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- COLLISCHONN, W. **Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS**. 1997. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Análise de rompimento hipotético da barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 191-206, jul/dez. 1997. Disponível em: <<http://www.rhama.net/download/artigos/artigo25.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2013.
- CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução n. 143**, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7. da Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14](http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14)>. Acesso em: 08 out. 2013.
- CUNGE, J. A.; HOLLY JUNIOR, F. M.; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. Boston: Pitman Edition, 1980.
- FREAD, D. L.; LEWIS, J. M. **NWS FLDWAV Model**: theoretical description and user documentation. Silver Springs: National Weather Service – Office of Hydrology, 1998.
- GRIMALDI, S.; DEL VESCO, R.; PATROCCO, D. e POGGI, D. A Synthetic Method for Assessing the Risk of Small Dam Flooding. In: UNITED STATES SOCIETY ON DAMS CONFERENCE, 30, 2010, Sacramento, **Proceedings...** Sacramento, 2010.
- LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos**: o caso UHE – São Simão. 2007. 210 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens**. 1990. 291 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MENESCAL, R. A. **Risco e segurança em engenharia: problemas enfrentados pelo MI com obras de infra-estrutura hídrica**. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/Metro/Rog%E9rio%20Menescal.pdf>>. Acesso em 01 dez. 2014.

MONTE-MOR, R. C. de A. **Mapeamento de áreas inundáveis associadas à ruptura de barragens: estudo de caso – barragem de Ninho da Águia/MG**. 2004. 141 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

MORRIS, M. W. **CADAM: Concerted action on dambreak modeling**. 2000. Final Report.

PALMIER, L. R.; BRASIL, L. S. S.; MONTE-MOR, R. C. A.; NASCIMENTO, N. O.; ROCHA, E. G.; SILVA, N. S.; CANELLAS, A. V. B. Modelagem Simplificada de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem: estudo de caso – barragem do aproveitamento múltiplo Manso, Mato Grosso, Brasil. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTRO-OESTE, n. 1, 2007, Cuiabá, **Resumos...**Cuiabá, 2007, 17 p.

SNEAD, D. B. **Development and Application of Unsteady Flood Models Using Geographic Information Systems**. 2000. 195 f. Departmental Report (Master of Science in Engineering) – Faculty of the Civil Engineering Department, University of Texas, Austin, 2000.

UEMURA, S. **Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens**. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VEROL, A. P.; MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B. Propagação da Onda de Ruptura de Barragem Através de Um Modelo Quasi-2D. In: RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 18, n.1, p. 165-176, Jan/Mar 2013. Disponível em: <[http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/1d26d0aaa30c558f2bd790fc33c60b91\\_558d713f8ab863583f5dae18bca92417.pdf](http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/1d26d0aaa30c558f2bd790fc33c60b91_558d713f8ab863583f5dae18bca92417.pdf)>. Acesso em 20 ago. 2013.

WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. Gestão do Risco nos Vales a Jusante de Barragens. **Revista Territorium**. Coimbra, n. 18, p. 33-42, 2011. Disponível em: <[http://www.uc.pt/fluc/nicif/riscos/Documentacao/Territorium/T18\\_artg/Teresa\\_Viseu.pdf](http://www.uc.pt/fluc/nicif/riscos/Documentacao/Territorium/T18_artg/Teresa_Viseu.pdf)>. Acesso em: 17 nov. 2013.

WAHL, T. L. **Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 130, n. 5, p. 389-397, May, 2004.

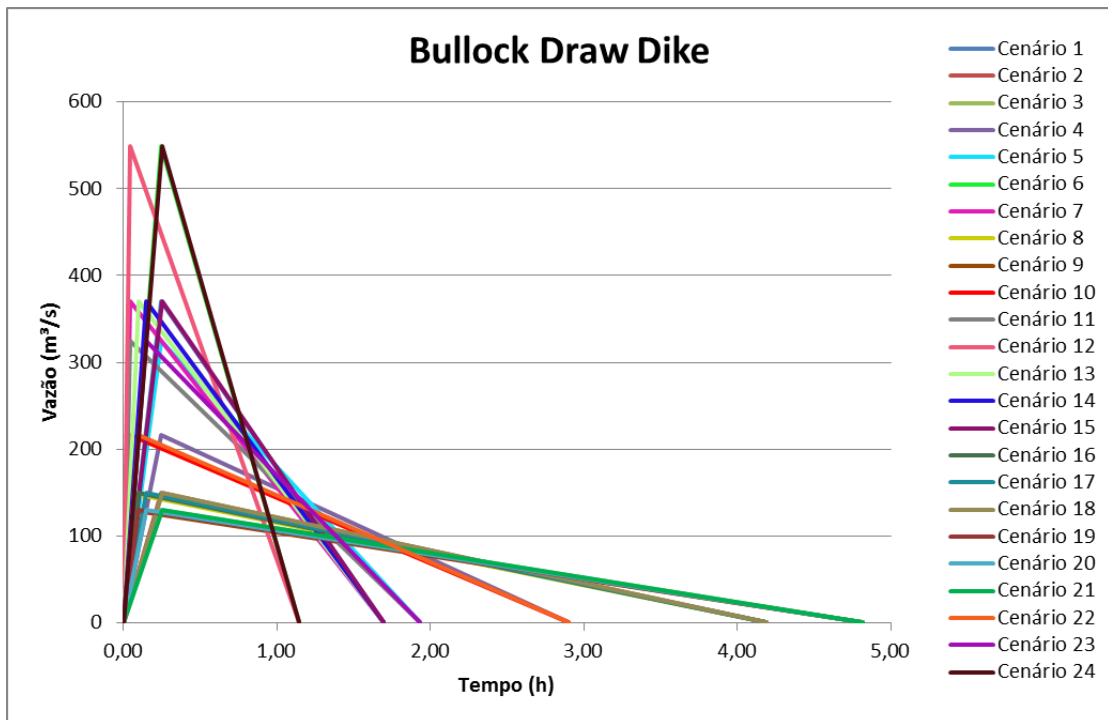
WETMORE, J. N.; FREAD, D. L. The NWS Simplified Dam Break Flood Forecasting



Model. In: CANADIAN HYDROTECHNICAL CONFERENCE, 5, **Proceedings**, Québec, 1984.

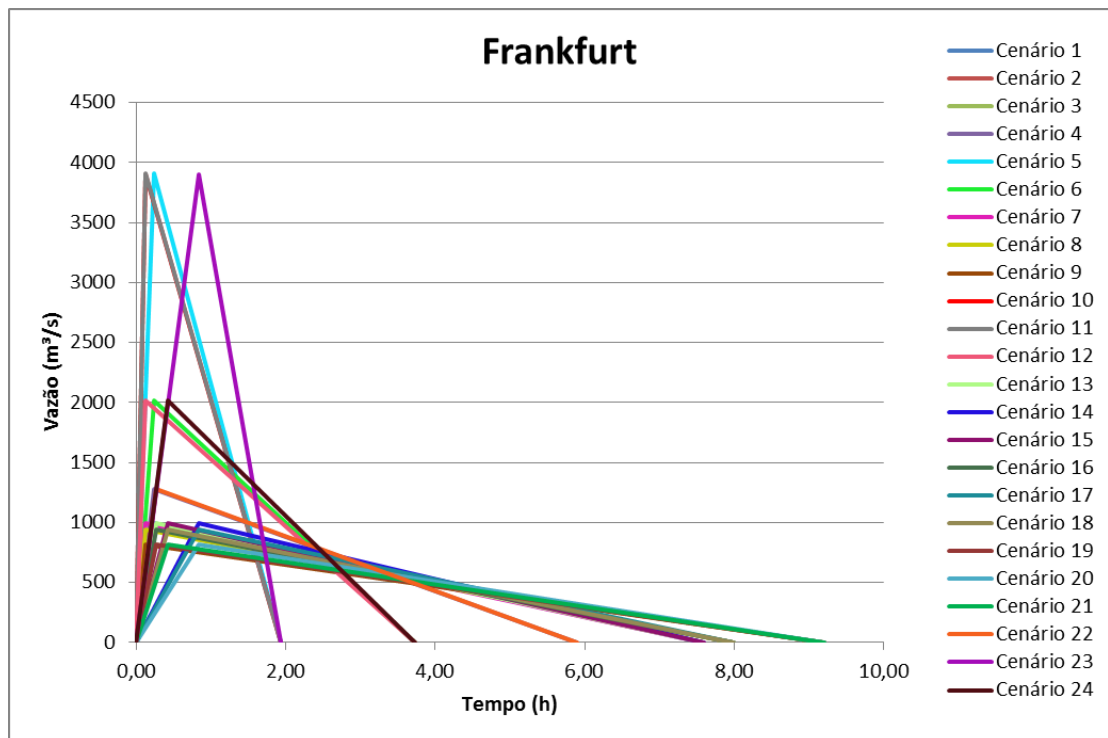
**ANEXO A – Hidrogramas de ruptura de barragens para 9 casos históricos  
de falha de barragens de terra**

Figura 18 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Bullock Draw Dike.



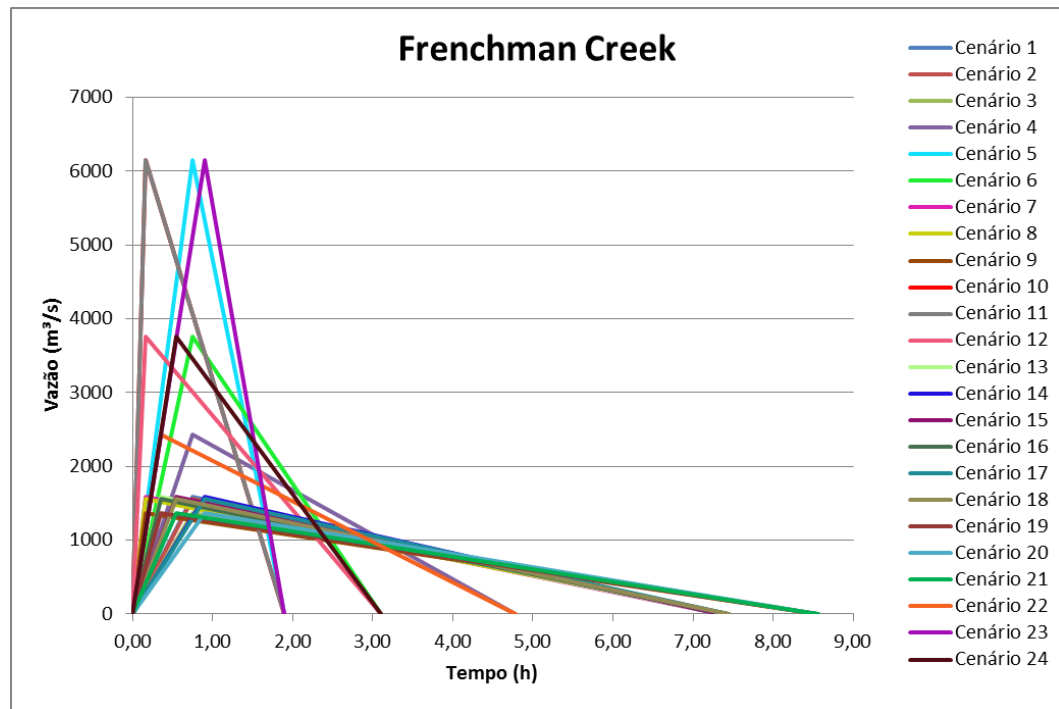
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 19 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Frankfurt.



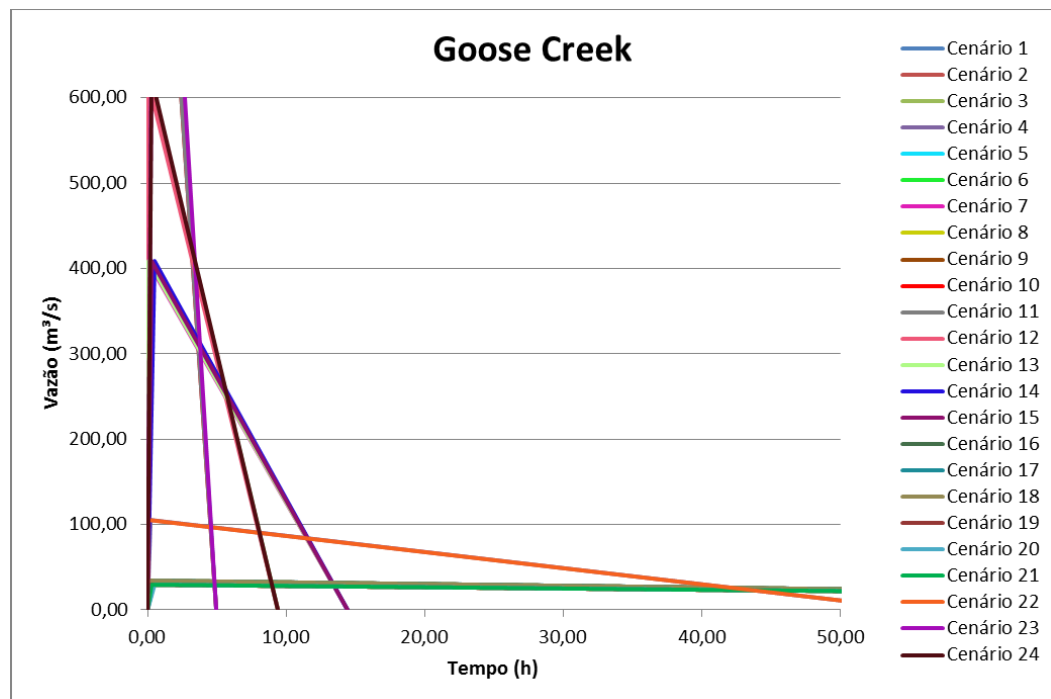
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 20 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Frenchman Creek.



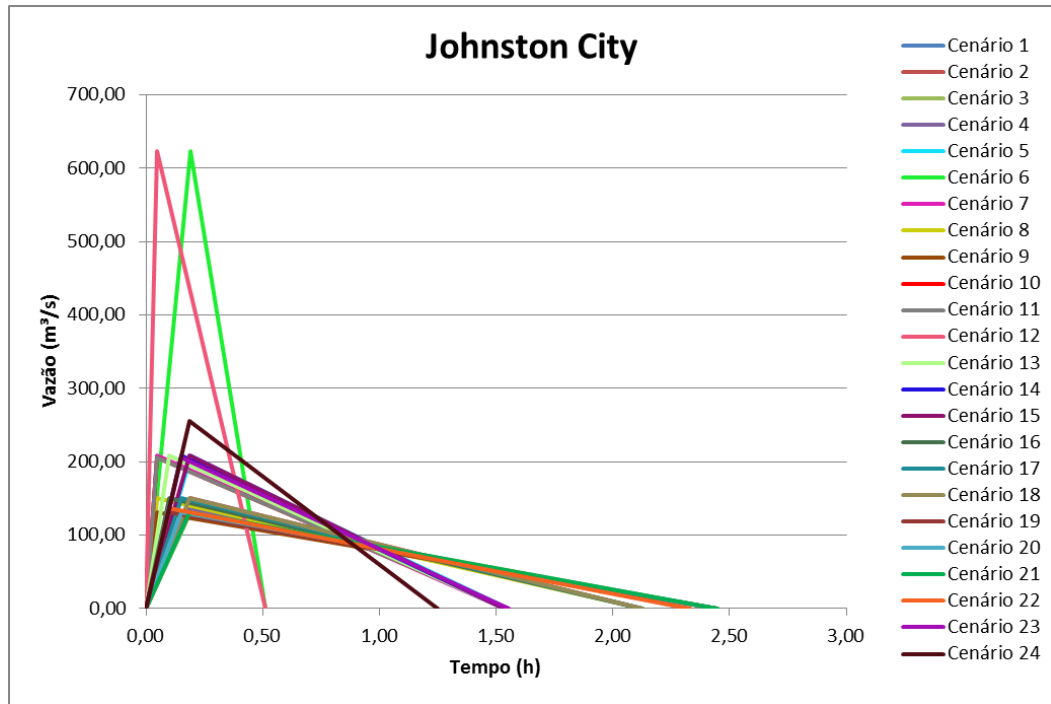
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 21 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Goose Creek.



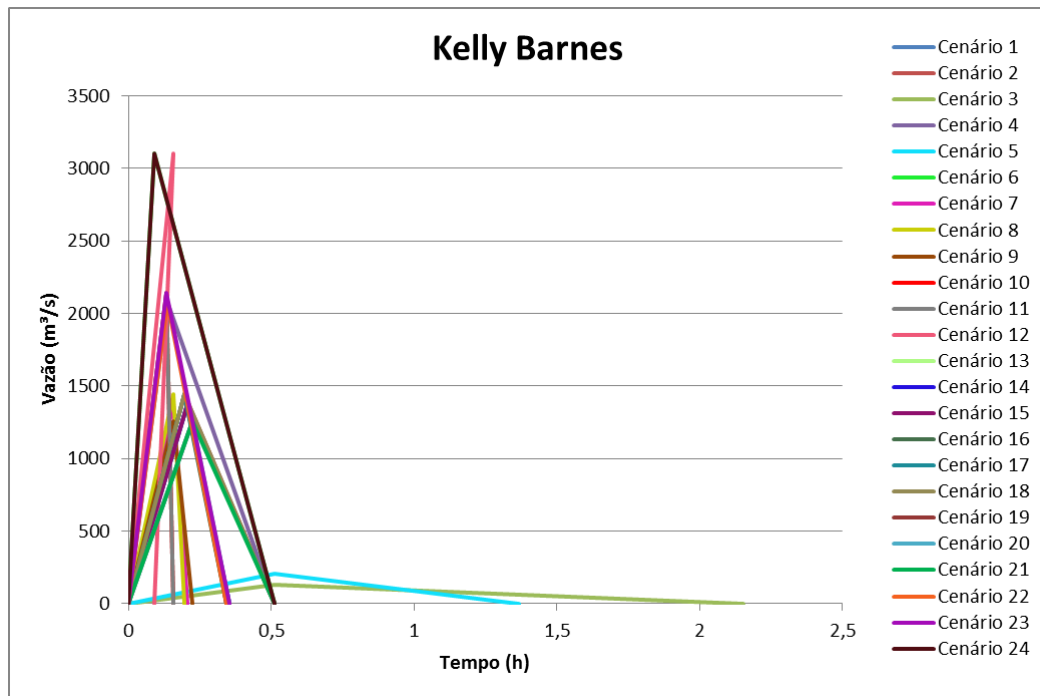
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 22 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Johnston City.



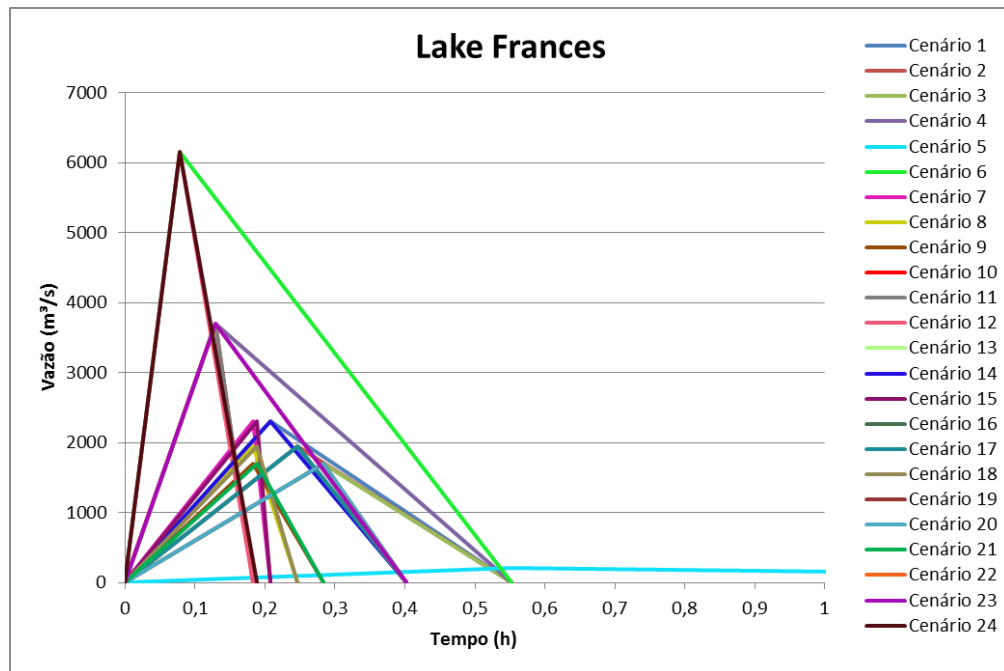
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 23 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Kelly Barnes.



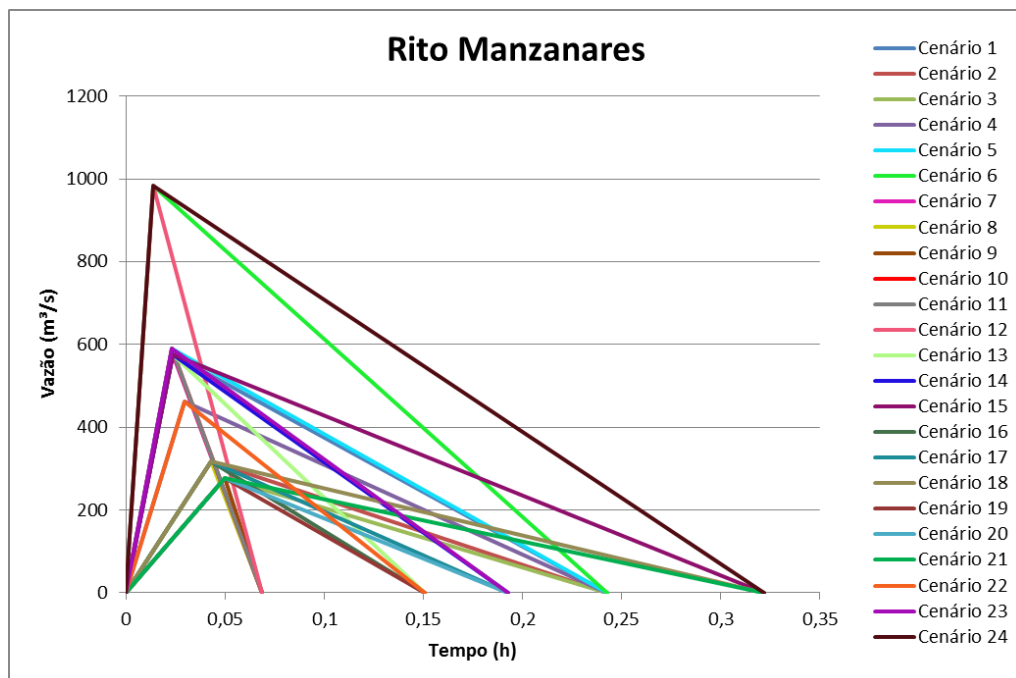
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 24 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Lake Frances.



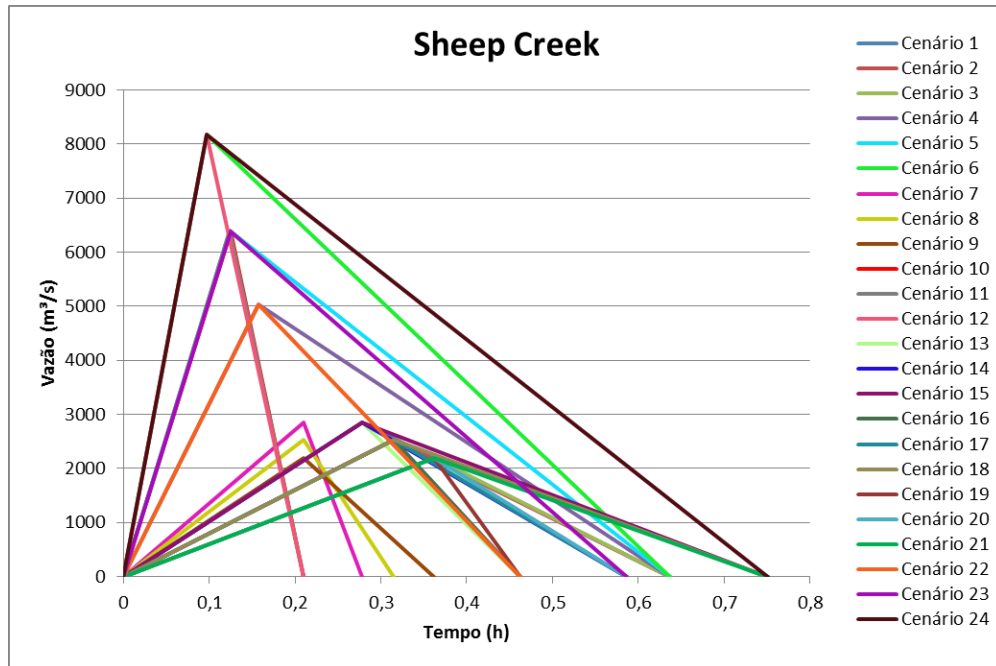
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 25 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Rito Manzanares.



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 26 – Hidrogramas de ruptura para a barragem de Sheep Creek.



(fonte: elaborada pela autora)