



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA



WILLIAN PEREIRA RIBAS MACHADO

**UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA
AVALIAÇÃO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGENS
– ESTUDO DE CASO: UHE PEDRA DO CAVALO – (BA)**

Porto Alegre

2022

WILLIAN PEREIRA RIBAS MACHADO

**UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AVALIAÇÃO DE
RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGENS – ESTUDO DE CASO: UHE PEDRA DO
CAVALO – (BA)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

Orientador: Prof ° Dr° Maurício Andrades Paixão

Coorientador: Eng. Hídrico João Vicente Zancan Godoy

Porto Alegre

2022

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Tatiana da Silva Pereira, pelo amor incondicional e constante exemplo de determinação, fé e coragem que me permitiram chegar até aqui.

Ao meu pai, Mauricio Ribas Machado, homem de poucas palavras e de um coração gigantesco.

Ao meu irmão, Iago Pereira Ribas Machado, por ter transformado a minha vida desde o seu nascimento.

Ao meu companheiro, Mateus, pelo amor e carinho nos momentos mais importantes divididos até hoje.

Aos meus amigos, Ericson e Tuane, pela lealde e cumplicidade nos momentos bons e ruins pelos quais passamos juntos.

Ao professor e amigo, Maurício Andrades Paixão, pela orientação no trabalho de conclusão de curso, sempre disponível a colaborar e passar seu conhecimento.

Ao colega e amigo, João Vicente Zancan Godoy, por contribuir e compartilhar seus conhecimentos no dia a dia da engenharia.

Aos professores do IPH, por contribuírem no meu desenvolvimento durante trajetória da graduação.

RESUMO

A avaliação dos impactos gerados relacionados a construção de uma barragem é de suma importância. Assim como qualquer estrutura, as barragens estão sujeitas a acidentes, decorrentes da interferência humana ou da natureza. Os impactos oriundos de um colapso na estrutura são infinitos, mesmo quando não ocorrem perdas humanas ou desastres ambientais. O objetivo principal do estudo é avaliar a aplicabilidade de metodologia simplificada de obtenção de hidrograma de ruptura hipotética da barragem e seus possíveis impactos a jusante como estudo de caso a UHE Pedra do Cavalo – (BA). A ruptura de uma barragem pode gerar onda de cheia a jusante na forma de um hidrograma, no qual as características dependem de como ocorre essa ruptura. Sendo assim, foram escolhidos dois cenários de ruptura, um no nível de operação normal e outro no nível de operação extrema, onde foram avaliadas as vazões de pico e os mecanismos de formação de brecha de ruptura. Identificou-se que o hidrograma de decaimento parabólico e a formulação de Wetmore são os que mais se adequam aos cenários propostos, e que são partes de um estudo mais amplo, no qual abrange não só o rompimento, assim como os efeitos causados a jusante no caso de uma ruptura hipotética. Apesar das limitações, a aplicação do modelo hidrodinâmico de simulação da ruptura hipotética da UHE Pedra do Cavalo, permitiu avaliar a estimativa das vazões e níveis máximos resultantes da passagem da onda de ruptura, permitindo o mapeamento da área de inundação e a zona de autossalvamento para o cenário de operação extrema. O estudo buscou promover um melhor entendimento de ferramentas que possam facilitar o processo de simulação de rompimento de barragens, no entanto não se pode afirmar que hidrograma de ruptura gerado representa uma situação real, e sim um fator contribuinte para aumento da segurança dessas estruturas.

Palavras-chave: barragem, ruptura de barragem, hidrograma de ruptura, segurança de barragem, modelagem hidrodinâmica.

ABSTRACT

The evaluation of the impacts generated related to the construction of a dam is extremely important. As with any structure, dams are subject to accidents, resulting from human or nature interference. The impacts arising from a collapse in the structure are infinite, even when there are no human losses or environmental disasters. The main objective of this study is to evaluate the applicability of a simplified methodology for obtaining a hydrograph of hypothetical dam failure and its possible downstream impacts as a case study at UHE Pedra do Cavalo – (BA). The rupture of a dam can generate a flood wave downstream in the form of a hydrograph, whose characteristics depend on how the rupture occurs. Therefore, two rupture scenarios were chosen, one at the level of normal operation and another at the level of extreme operation, where the peak flows and the mechanisms of rupture breach formation were evaluated. It was identified that the parabolic decay hydrograph and the Wetmore formulation are the ones that best suit the proposed scenarios, and that they are part of a broader study, which covers not only the disruption, but also the effects caused downstream in the case of a hypothetical break. Despite the limitations, the application of the hydrodynamic model to simulate the hypothetical rupture of UHE Pedra do Cavalo, allowed to evaluate the estimation of flows and maximum levels resulting from the passage of the rupture wave, allowing the mapping of the flooding area and the self-rescue zone for the extreme operating scenario. The study sought to promote a better understanding of tools that can facilitate the process of simulating dam failure, however it cannot be said that the rupture hydrograph generated represents a real situation, but a contributing factor to increase the safety of these structures.

Key words: dam, dam break, rupture hydrograph, dam safety, hydrodynamic modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Seção transversal de uma barragem de terra homogênea	14
Figura 3-2 – Seção transversal de uma barragem de terra zoneada.....	14
Figura 3-3 – Seção transversal de barragem de encoramento	15
Figura 3-4 – Seções transversais para diferentes tipos de barragem de concreto.....	16
Figura 3-5 – Barragem de concreto tipo gravidade	17
Figura 3-6 – Barragem de concreto tipo contraforte	18
Figura 3-7 – Barragem de concreto tipo arco	19
Figura 3-8 – Usina Hidrelétrica de Itaipu	20
Figura 3-9 – Localização das estruturas da UHE de Itaipu	20
Figura 3-10 – Galgamento sobre o coroamento da barragem.....	25
Figura 3-11 – Formação de brecha por galgamento: a) início em um ponto mais fraco; b) brecha em forma de "V"; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão	25
Figura 3-12 – Erosão interna <i>piping</i>	26
Figura 4-1 – Visão parcial da UHE Pedra do Cavalo	32
Figura 4-2 – Fórmulas matemáticas para obtenção de vazão de pico	37
Figura 4-3 – Estimativa das características da brecha	38
Figura 4-4 – Hidrograma triangular simplificado.....	39
Figura 4-5 – Hidrograma de ruptura gradual.....	40
Figura 4-6 – Hidrograma de decaimento parabólico	41
Figura 5-1 – Vazões de pico	45
Figura 5-2 – Hidrograma de Ruptura NMN e NMM	46
Figura 6-1 - Hidrograma para as seções no vale a jusante	49
Figura 6-2 - Elevação do nível de água	50
Figura 6-3 – Área de inundação.	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Características Técnicas da UHE Pedra do Cavalo	32
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CPP	Centro Pastoral dos Pescadores
CRAB	Comissão Regional de Atingidos por Barragens
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIOCRUZ	Fundação Osvaldo Cruz
MAB	Movimento dos Atingidos por Barragens
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PAE	Plano de Ação de Emergência
PSB	Plano de Segurança de Barragem
PNAB	Plano Nacional de Direitos das Populações Atingidas por Barragens
PNPCT	Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PEP	Projeto Energético Popular
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UHE	Usina Hidrelétrica
ZAS	Zona de Autossalvamento
ZSS	Zona de Segurança Secundária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVO	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	BARRAGENS	12
3.1.1	Definição e importância.....	12
3.1.2	Tipos de barragens.....	13
3.1.2.1	Barragem de terra	13
3.1.3	Barragem de encoramento	15
3.1.3.1	Barragem de concreto	15
3.1.4	Impactos ambientais e econômicos	21
3.1.4.1	Impactos ambientais e econômicos positivos	21
3.1.4.2	Impactos ambientais e econômicos negativos	21
3.1.4.3	Alteração do regime e ocupação do solo	22
3.1.4.4	Alteração no regime hidrológico e qualidade da água.....	22
3.1.4.5	Ruptura de barragem	23
3.1.4.6	Causas de ruptura.....	24
3.2	SEGURANÇA DE BARRAGENS	26
3.2.1	Política nacional de segurança de barragens	26
3.2.1.1	Plano de segurança de barragem	26
3.2.1.2	Plano de Ação de Emergência	27
3.2.1.3	Sistema nacional de informação de segurança de barragens	28
3.2.2	Política nacional de recursos hídricos.....	29
3.3	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	ÁREA DE ESTUDO	31
4.1.1	Breve histórico do empreendimento	33
4.2	ANÁLISE DE RISCO	35
4.3	DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA	35
4.3.1	Cenários de ruptura.....	35
4.3.1.1	Cenários simulados.....	36
4.3.2	Análises das vazões de pico e do tempo base.....	36
4.3.3	Análises dos mecanismos e tempo de formação de brecha	37
4.3.4	Hidrograma de ruptura.....	39
4.3.4.1	Aplicação no modelo hidrodinâmico.....	41
4.3.4.2	Dados de entrada no modelo hidrodinâmico	42

4.3.4.3	Modelo digital de Elevação (MDE) para as simulações hidrodinâmicas	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1	VAZÕES DE PICO ENCONTRADAS	43
5.2	HIDROGRAMA DE RUPTURA.....	45
6	ANÁLISE DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA	47
6.1	ÁREA DE INUNDAÇÃO.....	50
6.1.1	Zona de autossalvamento.....	51
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	ANEXO I.....	57

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas para resolver o problema de escassez hídrica no período seco e a necessidade de armazenamento para consumo da população.

A análise dos impactos gerados relacionados a construção de uma barragem é de suma importância. Além dos benefícios econômicos e sociais que o armazenamento de água pode contribuir para a sociedade, existem os impactos negativos que alteram significativamente o ambiente onde se integram essas estruturas.

Após os acidentes mais recentes, em destaque negativo os casos Brasileiros a Barragem do Fundão e a Barragem Córrego do Feijão, reconhece-se a necessidade de avaliar os efeitos gerados pela liberação de volumes de forma instantânea, gradual e ou mais lenta, que resultam em grandes vazões com tempo de pico menores e grandes áreas de inundações.

A escolha adequada dos parâmetros de ruptura é de crucial importância quando se trata de barragens cuja região de estudo de jusante se encontra em regiões de pequenas distancias, inferiores a 25 km, quando comparadas a distancias maiores, os efeitos do evento de ruptura tendem a convergir independentemente dos parâmetros adotados.

Em face disso, esse trabalho avaliará a aplicabilidade de metodologia simplificada para obtenção de hidrograma de ruptura hipotética de barragens e seus possíveis impactos no vale a jusante utilizando como estudo de caso a UHE Pedra do Cavalo – (BA).

2 OBJETIVO

Avaliar a aplicabilidade de metodologia simplificada de obtenção de hidrograma de ruptura hipotética da barragem e seus possíveis impactos no vale de jusante utilizando como estudo de caso a UHE Pedra do Cavalo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BARRAGENS

3.1.1 Definição e importância

As barragens são definidas como estruturas com a capacidade de acumular água, qualquer outro líquido, assim como, rejeitos e detritos, para fins de armazenamento ou controle (CSDB, 2021).

O marco da construção das barragens no Brasil iniciou após os primeiros registros de períodos de grande estiagem, observados em 1880 nos estados do Nordeste brasileiro, no então governo do imperador Dom Pedro II, quando foi eleita a Comissão Imperial para solucionar os problemas de seca e promover o armazenamento de água. Desde então, as barragens têm sido de grande importância para a sociedade, sendo objeto de estudos, desde técnicas construtivas para a otimização de reservatórios até a estudos voltados a seus impactos socioambientais decorrentes da sua implementação.

Desde os tempos mais antigos as tentativas do homem de construir barramentos em cursos hídricos tem sido observada com as mais diferentes finalidades. Ainda assim, atualmente, alguns desses barramentos mais primitivos são difundidos quando a estrutura assume pequenas proporções, como por exemplo, executada por pequenos fazendeiros com o objetivo de armazenar água para própria subsistência de forma mais econômica possível.

Quanto ao tipo e conforme Costa (2012), as barragens devem ser divididas em dois grandes grupos, sendo eles convencionais, que são as mais utilizadas e cujo mecanismo é de amplo conhecimento na literatura; e não convencionais, que incluem as que são pouco utilizadas.

3.1.2 Tipos de barragens

3.1.2.1 Barragem de terra

Conforme descreve o Manual do Pequeno Empreendedor (ANA, 2016), as barragens de terra são estruturas essencialmente constituídas por materiais naturais ou processados, de acordo com os fatores condicionantes locais. Segundo a FAO (2011) são simplesmente estruturas compactadas que dependem de sua massa para resistir ao deslizamento e tombamento e são do tipo de barragem mais comum encontrado no mundo.

Segundo a FAO (2011), as principais vantagens envolvidas na construção de pequenas barragens de terra são:

- a) São utilizados materiais naturais locais;
- b) Os procedimentos do projeto são simples
- c) Comparativamente, são necessários pequenos ativos fixos tangíveis;
- d) Os requisitos para as fundações são menos exigentes do que para outro tipo de barragens. A base larga de uma barragem de terra distribui a carga nas fundações;
- e) Barragens de terra resistem ao assentamento e movimentos melhor do que estruturas mais rígidas e podem ser mais adequadas para áreas onde os movimentos do solo são comuns.

Além disso, também identifica-se desvantagens e estas são:

- a) Uma barragem de terra é mais fácil de ser danificada ou destruída pela água corrente, passando sobre ou batendo contra ela. Assim, um descarregador/vertedor e proteção adequada a montante são essenciais para qualquer barragem;
- b) Projetar e construir descarregadores/vertedores adequados é normalmente a parte tecnicamente mais difícil de qualquer trabalho de construção de uma barragem. Qualquer local com má qualidade de descarga não deverá ser usado.
- c) Durante a construção, se não for adequadamente compactada, a barragem apresentará uma integridade estrutural fraca, apresentando pontos preferenciais de infiltração;
- d) As barragens de terra requerem manutenção contínua de forma a evitar erosão, crescimento de árvores, sedimentação, infiltração e danos provocados por insetos e animais.

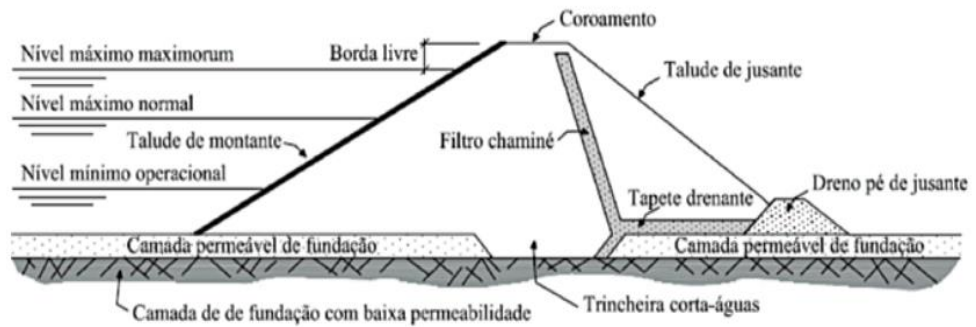
Para Costa (2012), as barragens de terra são constituídas por aterros homogêneos ou zoneados, onde as barragens de perfil homogêneo (Figura 3-1) são construídas com solos argilosos e, o perfil zoneado (Figura 3-2), são construídas por uma zona central com solos argilosos, também conhecida como núcleo, e por zonas laterais de solos não argilosos.

Figura 3-1 – Seção transversal de uma barragem de terra homogênea



Fonte: ANA (2012).

Figura 3-2 – Seção transversal de uma barragem de terra zoneada

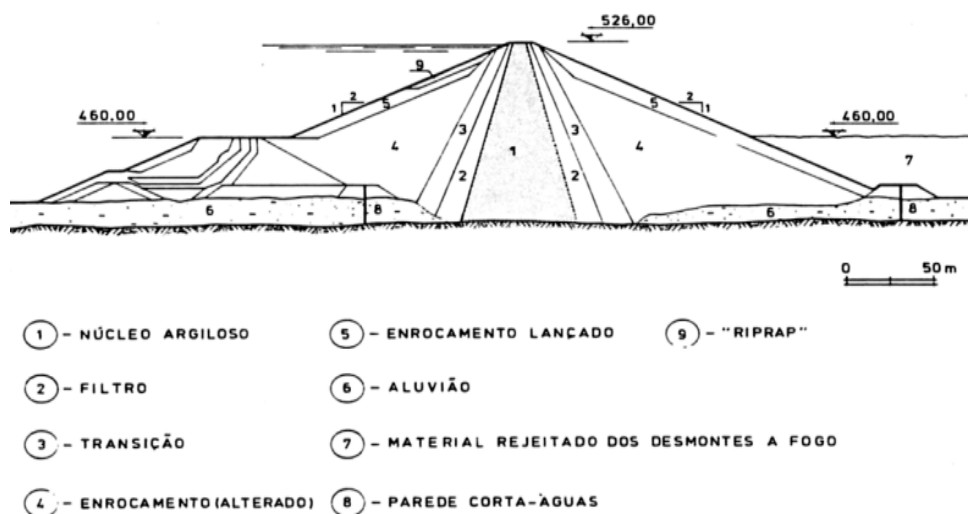


Fonte: ANA (2012).

3.1.3 Barragem de encoramento

As barragens de encoramento (Figura 3-3) são formadas através da união de aglomerados de terra e rochas que são capazes de realizar a sustentação da estrutura. Costa (2012) classifica-as em grupos com núcleo impermeável, onde o material rochoso é predominantemente e possui o núcleo de solo argiloso impermeável, e com face impermeável, onde a impermeabilização é garantida a montante, seja por camada de concreto ou asfalto.

Figura 3-3 – Seção transversal de barragem de encoramento



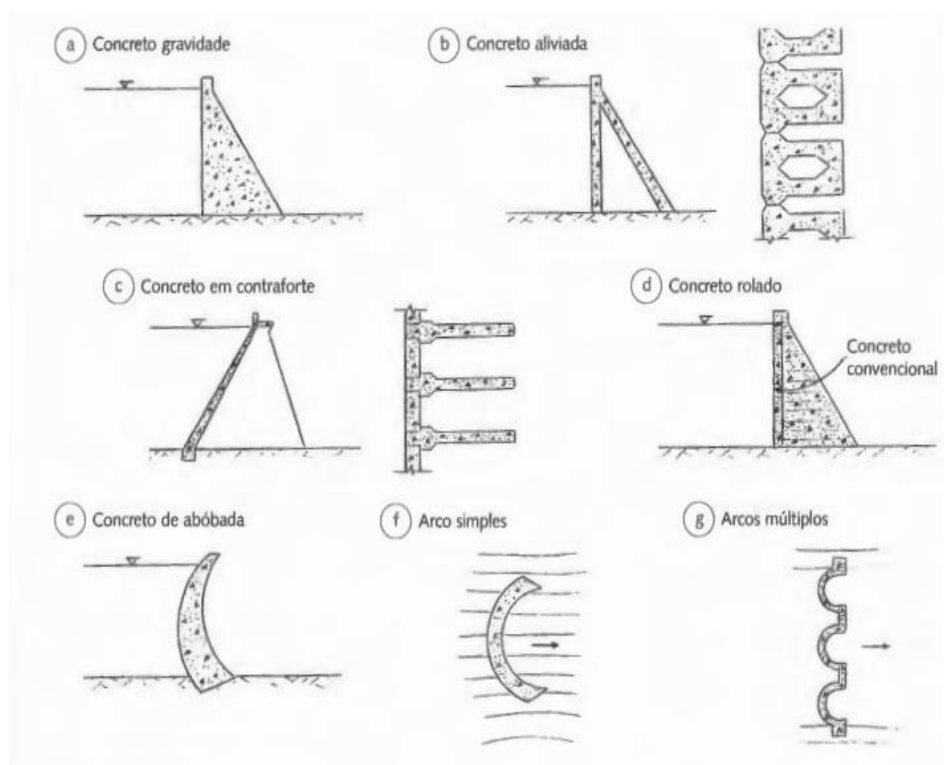
Fonte: Maranhá (1910).

3.1.3.1 Barragem de concreto

As barragens de concreto são caracterizadas pela sua forma, dimensões e materiais utilizados na sua construção, tais como o concreto convencional vibrado e o concreto compactado com rolo (ANA, 2016).

Segundo Costa (2012) essas barragens podem ser classificadas nos seguintes grupos: gravidade (Figura 3-4a), gravidade aliviada (Figura 3-4b), contrafortes (Figura 3-4c) e arco (Figura 3-4f). As barragens de concreto podem assumir diversas formas estruturais, em geral estão associadas a critérios de interesses econômicos, funcionais, ambientais e de segurança. Conforme a (Figura 3-4), observa-se os tipos de seções para barragens de concreto encontradas na literatura.

Figura 3-4 – Seções transversais para diferentes tipos de barragem de concreto



Fonte: Costa (2012).

➤ **Gravidade**

São barragens maciças de concreto, com pouca armação, onde as forças predominantes estão trabalhando apenas a esforços de compressão (COSTA, 2012). Como o próprio nome diz, são estruturas de concreto que sua estabilidade é garantida exclusivamente pelo próprio peso da estrutura (Figura 3-5).

Figura 3-5 – Barragem de concreto tipo gravidade



Fonte: Governo de Goiás (2021).

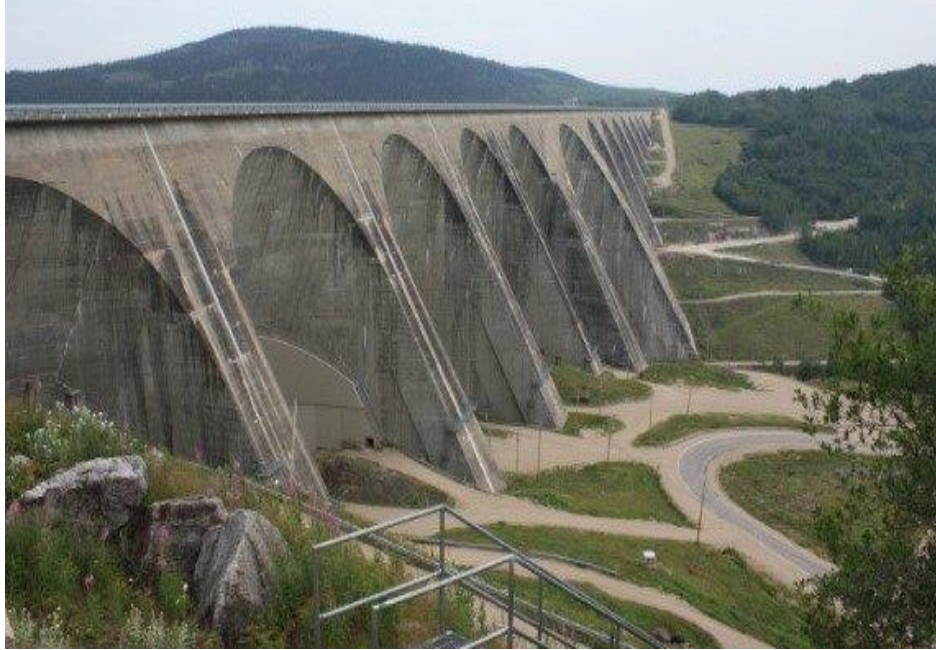
➤ **Gravidade aliviada**

As barragens de concreto do tipo gravidade aliviada são estruturas semelhantes a barragem de gravidade convencional, onde se procura otimizar a utilização do concreto e imprimir menor pressão às fundações, contudo, nesse tipo de barragem, ocorrem esforços de tração que exigem um maior número de armações (COSTA, 2012).

➤ **Contraforte**

As barragens de concreto do tipo contraforte (Figura 3-6) assemelham-se a barragens de gravidade aliviada, porém são ainda mais leves. Os esforços causados pela pressão hidrostática são concentrados em uma pequena área da fundação, conseqüentemente apresentam um regime de pressões ainda maiores de contato, fazendo com que a quantidade de armações seja ainda maior. Dentre as barragens de concreto, é a que apresenta menor volume de concreto consumido.

Figura 3-6 – Barragem de concreto tipo contraforte



Fonte: Acervo digital da Barragem de Cruachan, Escócia.

➤ **Arco ou Abóbada**

As barragens de concreto do tipo arco ou abóbada (Figura 3-7) possuem dupla curvatura, onde o sentido de curvatura ocorre tanto no sentido vertical quanto no horizontal ao longo do seu traçado. As pressões hidrostáticas são transmitidas para as ombreiras pelo efeito do arco, geralmente são obras muito esbeltas, e consomem o menor volume de concreto por metro quadrado de superfície represada (COSTA, 2012).

Figura 3-7 – Barragem de concreto tipo arco



Fonte: USBR (2021).

➤ **Barragem de Mista**

As barragens mistas correspondem àquelas que possuem diferentes materiais ao longo de uma seção transversal ou em seu traçado. São ditas mistas quando parte da estrutura é feita de um tipo e parte, feita de outro. Entre as barragens mistas mais convencionais estão as de terra-encoramento e terra-concreto (COSTA, 2012).

De modo geral, entre os inúmeros empreendimentos construídos no mundo, destaca-se a Usina Hidrelétrica de Itaipu (Figura 3-8), inaugurada no ano de 1984, que representa a maior usina geradora de energia no mundo. A estrutura da barragem possui altura de 196 metros e o volume aproximado de concreto é de 12,7 milhões de m³. Além de sua estrutura em concreto, a barragem conta com um maciço de terra e encoramento, sendo assim, configurada como um barramento misto (Figura 3-9).

Figura 3-8 – Usina Hidrelétrica de Itaipu



Fonte: Acervo digital Itaipu Binacional (2021).

Figura 3-9 – Localização das estruturas da UHE de Itaipu



Fonte: Acervo digital Itaipu Binacional (2021).

3.1.4 Impactos ambientais e econômicos

A construção de grandes barragens é uma arte antiga, inicialmente utilizada por pequenos produtores visando o armazenamento de água para abastecimento e irrigação, atualmente existem inúmeros usos múltiplos, e atualmente a possibilidade de produção de energia elétrica, tanto para populações quanto das indústrias.

3.1.4.1 Impactos ambientais e econômicos positivos

Estes empreendimentos oferecem inúmeros benefícios a sociedade, dentre os principais podem enumerar-se:

- Geração de empregos enquanto a sua fase de construção, embora estudos informem que a construção de barragens mantém os níveis de geração de empregos antes, durante e após a sua construção;
- Armazenamento de água para abastecimento de populações a jusante do barramento durante períodos de alta disponibilidade pluviométrica;
- Produção de energia elétrica a partir do controle gradual do volume do reservatório;
- Regularização de vazões mantendo a vazão constante, sendo atrelada a uma garantia de fornecimento;
- Controle de enchentes a jusante oriundas de eventos de máximas precipitações, controladas com o amortecimento realizados pela barragem a montante;

3.1.4.2 Impactos ambientais e econômicos negativos

Além dos benefícios econômicos e sociais, os impactos negativos oriundos da construção de um empreendimento desta natureza alteram significativamente o ambiente onde se integra, sendo destacado os principais impactos:

- Alterações na paisagem natural, fauna e flora locais;
- Inundação de áreas a montante originalmente destinadas a sobrevivência;
- Alterações nos processos geomorfológicos em consequência de mudanças na dinâmica fluvial;
- Alteração no regime hidrológico e qualidade da água;
- Alteração no regime de uso e ocupação do solo;
- Possibilidade de ruptura da barragem;
- Prejuízos à subsistência de comunidades tradicionais.

3.1.4.3 Alteração do regime e ocupação do solo

As barragens são geradoras de impactos ambientais, contudo o equilíbrio do ecossistema no reservatório depende do tipo de uso de ocupação do solo. Segundo Afonso (2006), as alterações do regime introduzidas nas componentes biofísicas e paisagísticas acarretam modificações da paisagem ao nível de estrutura visual, visto que implicará a danificação da tipologia do entorno da barragem.

3.1.4.4 Alteração no regime hidrológico e qualidade da água

A construção da barragem também pode ter consequências a jusante, alterando o comportamento hidrológico devido à redução significativa do escoamento (ANA, 2016).

O regime hidrológico costuma variar com o regime de chuvas passando por períodos de secas e cheias, uma vez que a barragem esteja implantada, o aporte disponível no curso de água passa a ser controlado e/ou modificado, tanto em quantidade quanto em qualidade (LIMA, 2014).

Uma vez que a barragem é utilizada para abastecimento, o volume armazenado não retorna para a calha natural do rio ou, às vezes retorna de forma controlada com a finalidade de manter a vazão do rio regularizada. A forma de controle é observada na diminuição da disponibilidade do fluxo a jusante do barramento, elevando as vazões mínimas e atenuando as vazões máximas. Essas mudanças acabam reduzindo a diversidade biológica e a integridade ecológica dos rios (WARD; STANFORD, 1995).

Em determinadas épocas do ano, os reservatórios apresentam variações de temperatura entre as camadas superficiais e as mais profundas, gerando o fenômeno conhecido como estratificação térmica. Esse fenômeno ocorre quando a radiação solar é absorvida quase que totalmente pela zona logo abaixo da superfície e, conseqüentemente, estando praticamente extinta a um metro de profundidade. O efeito de rápida absorção de radiação resulta na diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório.

A qualidade da água liberada a jusante depende da altura das tomadas de água e da época do ano, isto é, pode ter qualidade pior durante o período de estratificação térmica em função da posição (BRAGA, 2005). Ainda, quanto as alterações ambientais provocadas pela construção de barragens, a má qualidade liberada a jusante pode atingir uma extensão de rio bastante significativa.

3.1.4.5 Ruptura de barragem

Assim como qualquer estrutura, as barragens estão sujeitas a acidentes, decorrentes da interferência humana ou da natureza. Os impactos oriundos de um colapso na estrutura são infinitos, mesmo quando não ocorrem perdas humanas ou desastres ambientais.

Os impactos sociais com o rompimento de uma barragem são muito complexos, uma vez que, o volume armazenado originalmente destinado a melhorias na qualidade de vida das comunidades vizinhas, passa a ser o linear de caos e destruição.

Estima-se que o prejuízo econômico provocado pelo rompimento de uma barragem provoque danos as cadeias de produção econômica agrícola, pecuária, pesqueira e turística, além dos serviços públicos.

Cabe ressaltar que eventos dessa magnitude são de baixa probabilidade de ocorrência. Quando esse evento ocorre, dois são os principais fatores que podem ser indicados como causa primária, sendo eles: i) o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem, como eventos sísmicos; ou ii) o mal planejamento e execução da estrutura. Dessa forma, as barragens requerem cuidados especiais na elaboração dos projetos de engenharia, operação, manutenção das estruturas, bem como o descomissionamento (DUARTE, 2008).

3.1.4.6 *Causas de ruptura*

As principais causas de do rompimento de barragens são (COLLISCHONN, 1997):

1. Incapacidade do vertedouro (35% das causas);
2. Problemas na fundação, infiltrações, deslizamentos e perturbações sísmicas (25% das causas registradas);
3. Outros, incluindo projeto inadequado, falha na construção, materiais de má qualidade, má operação, sabotagem e operações de guerra (40% das causas registradas).

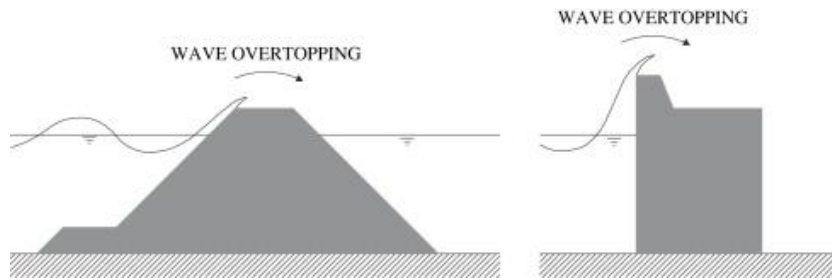
Na bibliografia são encontrados inúmeros tipos de ruptura de barragem, as quais, dependem principalmente do tipo de barragem e da causa de ruptura: instantânea e a gradual (VERÓL, 2010).

Para as barragens de concreto admite-se a hipótese de ruptura completa e instantânea, sendo a que mais se aproxima da realidade. No caso das barragens de terra e/ou enrocamento, é mais adequado considerar uma ruptura gradual e progressiva, causada pelo transbordamento de lâmina de água pelo coroamento (galgamento) ou da possibilidade de erosão interna (*piping*) do talude (VERÓL, 2010).

➤ **Galgamento**

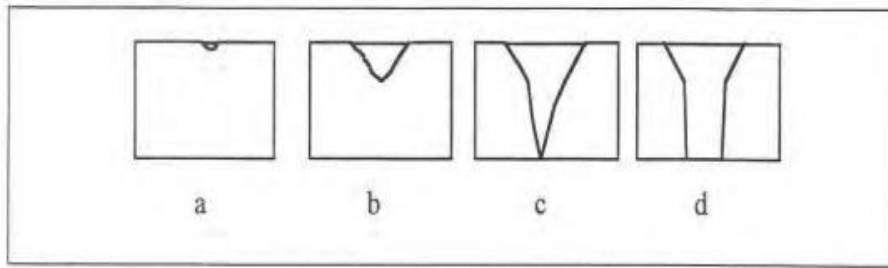
A passagem de água sobre o coroamento da barragem é denominada de galgamento (*overtopping* na literatura em inglês). Pode ser causado devido à má operação do reservatório, considerando uma situação de operação extrema onde o vertedouro não é capaz de escoar a lâmina de água além da sua capacidade de descarga, ou pela formação de uma onda de cheia dentro do reservatório, sendo ela de origem sísmica ou provocada pelo deslizamento de uma grande quantidade de terra das encostas (COLLISCHONN, 1997). Quando o galgamento possui tempo e intensidade o suficiente, no ponto mais frágil do coroamento se inicia o processo de formação de brecha, conseqüentemente essa brecha evolui com o tempo, por processo erosivo, no qual a velocidade de formação depende do tipo de barragem e do material (COLLISCHONN, 1997). A Figura 3-10 e Figura 3-11 demonstram o galgamento e o processo de formação de brecha.

Figura 3-10 – Galgamento sobre o coroamento da barragem



Fonte: Geeraerts *et al.* (2007).

Figura 3-11 – Formação de brecha por galgamento: a) início em um ponto mais fraco; b) brecha em forma de "V"; c) aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão

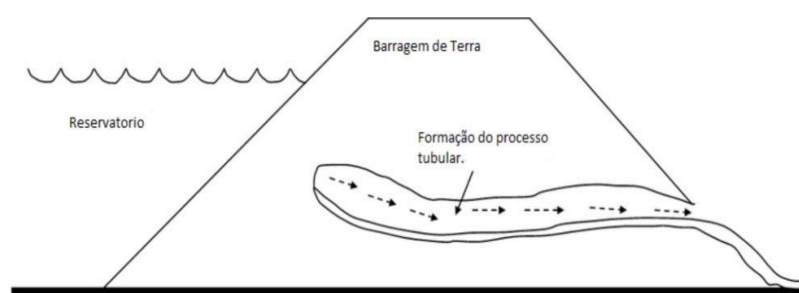


Fonte: Collischonn (1997).

➤ **Erosão interna *piping***

Segundo Ladeira *et al.* (2007), o processo de falha *piping* é o fenômeno que ocorre, por erosão regressiva, onde é formado um tubo originado do carreamento de grãos do maciço da barragem, de jusante para montante. À medida que a água percola pelo solo esse tubo tende a aumentar o seu diâmetro. Fatores como o grau de compactação do solo, a adequada graduação no tamanho das partículas de materiais e o adequado monitoramento de parâmetros geotécnicos, são importantes para evitar o processo de formação de *piping*, conforme apresentado na Figura 3-12.

Figura 3-12 – Erosão interna *piping*.



Fonte: Marinho, 2020.

3.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

3.2.1 Política nacional de segurança de barragens

A lei que regulamenta a segurança de barragens no Brasil é a Lei 12.334/2010. Ainda, quando analisado o cenário internacional, entende-se que a legislação instaurada no Brasil ocorreu de forma tardia.

Segundo a ANA (2010), o objetivo da Lei das Barragens é garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir os possíveis acidentes e suas consequências, além de regulamentar as ações e padrões de segurança.

3.2.1.1 *Plano de segurança de barragem*

Segundo o Art. 2, para os efeitos desta Lei, são estabelecidos que:

IV empreendedor: pessoa física ou jurídica que detenha outorga, licença, registro, concessão, autorização ou outro ato que lhe confira direito de operação da barragem e do respectivo reservatório, ou, subsidiariamente, aquele com direito real sobre as terras onde a barragem se localize, se não houver quem os explore oficialmente;

VII - dano potencial associado à barragem: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais;

VIII - categoria de risco: classificação da barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre;

IX - zona de autossalvamento (ZAS): trecho do vale a jusante da barragem em que não haja tempo suficiente para intervenção da autoridade competente em situação de emergência, conforme mapa de inundação;

X - zona de segurança secundária (ZSS): trecho constante do mapa de inundação não definido como ZAS;

XI - mapa de inundação: produto do estudo de inundação que compreende a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por eventual vazamento ou ruptura da barragem e seus possíveis cenários associados e que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas por essa situação;

XII - acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrollável do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa;

XIII - incidente: ocorrência que afeta o comportamento da barragem ou de estrutura anexa que, se não controlada, pode causar um acidente;

XIV - desastre: resultado de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis, que causa significativos danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais;

XV - barragem descaracterizada: aquela que não opera como estrutura de contenção de sedimentos ou rejeitos, não possuindo características de barragem, e que se destina a outra finalidade.

O Art. 8 da Lei 12.334/2010 atribui aos empreendedores e aos responsáveis técnicos escolhidos a responsabilidade por desenvolver e implementar o Plano de Segurança de Barragem (PSB).

3.2.1.2 *Plano de Ação de Emergência*

O Plano de Ação de Emergência (PAE), como o próprio nome diz, é o documento que contém um plano para ser executado caso ocorra uma emergência.

Segundo o Art. 11 a elaboração do PAE é obrigatória para todas as barragens classificadas como de:

I - médio e alto dano potencial associado;

II - alto risco, a critério do órgão fiscalizador.

Parágrafo único. Independentemente da classificação quanto ao dano potencial associado e ao risco, a elaboração do PAE é obrigatória para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração.

Segundo o Art. 12, o PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos:

- I - descrição das instalações da barragem e das possíveis situações de emergência;
 - II - procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento, de condições potenciais de ruptura da barragem ou de outras ocorrências anormais;
 - III - procedimentos preventivos e corretivos e ações de resposta às situações emergenciais identificadas nos cenários acidentais;
 - IV - programas de treinamento e divulgação para os envolvidos e para as comunidades potencialmente afetadas, com a realização de exercícios simulados periódicos;
 - V - atribuições e responsabilidades dos envolvidos e fluxograma de acionamento;
 - VI - medidas específicas, em articulação com o poder público, para resgatar atingidos, pessoas e animais, para mitigar impactos ambientais, para assegurar o abastecimento de água potável e para resgatar e salvaguardar o patrimônio cultural;
 - VII - dimensionamento dos recursos humanos e materiais necessários para resposta ao pior cenário identificado;
 - VIII - delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e da Zona de Segurança Secundária (ZSS), a partir do mapa de inundação referido no inciso XI do capítulo do Art. 8º desta Lei;
 - IX - levantamento cadastral e mapeamento atualizado da população existente na ZAS, incluindo a identificação de vulnerabilidades sociais;
 - X - sistema de monitoramento e controle de estabilidade da barragem integrado aos procedimentos emergenciais;
 - XI - plano de comunicação, incluindo contatos dos responsáveis pelo PAE no empreendimento, da prefeitura municipal, dos órgãos de segurança pública e de proteção e defesa civil, das unidades hospitalares mais próximas e das demais entidades envolvidas;
 - XII - previsão de instalação de sistema sonoro ou de outra solução tecnológica de maior eficácia em situação de alerta ou emergência, com alcance definido pelo órgão fiscalizador;
 - XIII - planejamento de rotas de fuga e pontos de encontro, com a respectiva sinalização.
- § 1º O PAE deverá estar disponível no site do empreendedor e ser mantido, em meio digital, no SNISB e, em meio físico, no empreendimento, nos órgãos de proteção e defesa civil dos Municípios inseridos no mapa de inundação ou, na inexistência desses órgãos, na prefeitura municipal.

3.2.1.3 Sistema nacional de informação de segurança de barragens

Segundo a ANA (2016), o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) constitui-se como um cadastro consolidado de informações sobre barragens, criado pela Lei 12.334/2010 onde se define que a inserção dos dados está sob a responsabilidade de cada entidade ou órgão fiscalizador de segurança de barragem. Ainda, define-se que deverá compreender coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações das barragens em construção, em operação e desativadas.

O Art 14. estabelece que são princípios básicos para o funcionamento do SNISB:

- I - descentralização da obtenção e produção de dados e informações;
- II - coordenação unificada do sistema;
- III - acesso a dados e informações garantido a toda a sociedade.

3.2.2 Política nacional de recursos hídricos

A Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), regulamenta o inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal, e altera o Art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

Segundo o Art. 1º a PNRH baseia-se nos seguintes fundamentos:

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Ainda, o Art. 2º informa que os objetivos da PNRH são:

- I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;
- III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.
- IV - incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais.

Art. 3º Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da PNRH:

- I - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade;
- II - a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País;
- III - a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental;

- IV - a articulação do planejamento de recursos hídricos com o dos setores usuários e com os planejamentos regional, estadual e nacional;
- V - a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo;
- VI - a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras.

São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

- I - os Planos de Recursos Hídricos;
- II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- V - a compensação a municípios;
- VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Segundo Tucci *et al.* (2001):

A Política desdobra-se em: fundamentos, objetivos, diretrizes de ação e instrumentos. O legislador fixou, como diretrizes, a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental, a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo e, mais especificamente, a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras. Com essa decisão, sinalizou que a gestão de recursos hídricos somente será bem sucedida se levar em consideração as interrelações existentes entre esses recursos e os demais recursos naturais.

O SINGREH é o instrumento que reúne todas as informações pertinentes sobre os recursos hídricos do país. Configura-se como sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão.

3.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Segundo Miranda (2011), modelo é uma representação simplificada da realidade capaz de funcionar semelhante a outros sistemas reais e que fornece previsões precisas sobre o comportamento e os acontecimentos dos sistemas semelhantes. Os modelos frequentemente utilizados são de três tipos: os analíticos, os numéricos e os físicos (CHANSON, 2004).

Os modelos analíticos representam as soluções teóricas dos princípios fundamentais. Os modelos físicos podem ser usados para validar os métodos numéricos. O modelo físico representa a realidade a uma escala diferente, sendo decisiva a representação apropriada das condições de fronteira, condições de montante e o campo do escoamento. Os modelos

numéricos são softwares que resolvem as equações básicas do escoamento do fluido, como por exemplo, a integração numérica do sistema de equações para o cálculo do perfil da superfície livre do escoamento gradualmente variado de um canal (CHANSON, 2004).

As aplicações práticas da hidráulica implicam modelos numéricos e resultados gráficos. Os métodos numéricos envolvem a resolução de vários tipos de problemas matemáticos, nomeadamente a solução de sistemas de equações diferenciais (NOVAK *et al.*, 2010).

Os modelos hidráulicos estudam a dinâmica dos escoamentos em canais naturais, artificiais e margens de forma a estimar as alturas e as velocidades da água em cada secção do escoamento e em cada instante de cálculo. Aplicam os resultados dos modelos hidrológicos como dados de entrada e são utilizados para delimitar as zonas inundáveis (MHL, 2006). Os modelos hidráulicos podem ser classificados em categorias, de acordo com as suas capacidades de modelação: unidimensional (1D), quasibidimensional (quasi-2D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D) (MHL, 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo (Figura 4-1), localizada nas coordenadas 12°35'11.3"S e 38°59'50.9"W a cerca de 2 km do município de Cachoeira e São Félix e aproximadamente 120 km de Salvador no estado da Bahia. A barragem está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu, interceptando o curso hídrico rio Paraguaçu, que deságua no estuário da Baía do Iguape, no município de Maragogipe.

O empreendimento é constituído por um barramento principal e dois diques auxiliares e um vertedouro controlado por comportas. As principais características do empreendimento são apresentadas no Quadro 4.1.

Figura 4-1 – Visão parcial da UHE Pedra do Cavalo



Fonte: Votorantim Energia (2022).

Quadro 4.1 – Características Técnicas da UHE Pedra do Cavalo

UHE Pedra do Cavalo	
Município	Cachoeira – BA
Nome de Curso de Água	Rio Paraguaçu
Área de Drenagem	53,108 km ²
Dados Técnicos da Barragem	
Tipo	Terra
Altura máx. acima da fundação (m)	142
Extensão do coroamento (m)	470
Crista (m)	125,50
Reservatório	
Nível mínimo operacional (NMO) (m)	106
Nível máximo normal (NMN) (m)	119
Nível máximo <i>maximorum</i> (NMM) (m)	124
Área inundada (km ²) (NMM)	185,9
Volume (hm ³) (NMM)	4836
Estrutura Extravasora – Vertedouro	
Tipo	Concreto
Elevação Soleira Projeto (m)	106
Largura útil (m)	15

Número de comportas	5
Capacidade de descarga (m ³ /s)	106

Fonte: INEMA (2014); EMBASA (2014).

4.1.1 Breve histórico do empreendimento

O empreendimento teve sua construção iniciada na década de 70 pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu (DESENVALE), sendo concluída e inaugurada em 1985. Anteriormente a sua construção, a cerca de 30 km a montante, existia a barragem de Bananeiras e seu reservatório foi incorporado ao novo reservatório da UHE Pedra do Cavalo. A operação e manutenção da barragem estiveram sob responsabilidade da Empresa Baiana de Água e Saneamento S/A (EMBASA) de 1989 até 2001 (COELBA & CNO, 2000). No ano de 2002 a barragem passou a ser operada pelo Grupo Votorantim Ltda., em conjunto com o Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA).

A barragem possui múltiplos usos e sua principal função é abastecimento de água a região metropolitana de Salvador. As demais demandas hídricas relacionadas ao empreendimento são:

- Contenção de cheias;
- Regularização de vazão;
- Irrigação;
- Geração de energia;
- Pesca e Psicultura;
- Navegação
- Recreação e Lazer;
- Preservação dos Recursos Naturais;

Conforme Couto (2014), uma das principais justificativas para a construção do barramento foi o controle de cheias que fazem parte da história dos municípios de Cachoeira e São Félix, cidades tombadas como patrimônio histórico do estado da Bahia. Conforme relatos de moradores antigos, os eventos de cheias eram considerados anuais, quando que nos anos de 1914, 1930, 1940, 1960, 1964, e 1965, ocorreram eventos extremos que culminaram em inundações registradas e sendo todas datadas a períodos anteriores a construção da barragem. No ano de 1989 a barragem não foi capaz de amortecer a onda de cheia, causando inundações

nos municípios a jusante, sendo assim, é considerada como a única ocorrência de inundação após o seu funcionamento (COUTO, 2014).

A instalação da Usina Hidrelétrica foi iniciada no ano de 2002, pela Concessionária Votorantim Cimentos N/NE Ltda, finalizada em 2004, mesmo ano de início de operação. Nesta configuração a UHE Pedra do Cavalo possui duas turbinas que podem operar com vazão máxima de 160 m³/s sendo cada turbina operando com 80 m³/s e potencial de geração de energia de 160 MW.

A concessão da operação da UHE foi firmada entre a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Votorantim Cimento Ltda., definindo os seguintes critérios a serem preservados (COUTO, 2014; BRASIL, 2002; VOTORANTIM ENERGIA, 2009):

- Quando o nível do reservatório estiver acima ou na elevação do Nível Mínimo Normal (NMN), ou seja, na El. 106m deve-se extravasar a vazão média diária de 60 m³/s;
- Quando o nível do reservatório estiver abaixo do NMN, deve-se reduzir a vazão média diária defluente para 10m³/s;
- Estabelecido como limite legal operacional máximo a vazão de 80 m³/s, quando a vazão é superior a essa ocorre alteração de salinidade no estuário da Baía do Iguape;
- Estabelecido como limite a vazão de restrição de 1500 m³/s, como limite de operação e que acima desse, há risco imediato de inundação dos municípios de Cachoeira e São Félix, imediatamente a jusante da barragem;
- Vazões superiores a 60m³/s deverão ser realizadas sempre que o Operador Nacional do Sistema (ONS) solicitar a fim de suprir o Sistema Integrado Nacional com energia; quando for necessário ao controle de cheias para manutenção do volume de espera na eminência de grandes pluviosidades; e nas ocasiões para a realização de liberação da vazão de restrição, objetivando a identificação das regiões passível de alagamento que estão sob influência do reservatório. Este procedimento é denominado teste de calha e quando ocorrer, nesse sentido, deverá ser aplicado o Plano de Ações Emergenciais (PAE) para situações de cheias, contemplando ações preventivas e imediatistas, devendo ser de ampla divulgação à sociedade e ao poder público.

Para períodos de estiagem é estabelecida a vazão sanitária de 3 m³/s, liberada em forma de pulsos uniformes de vazão constante durante algumas horas por dia, respeitando o limite diário preestabelecido (COUTO, 2014; VOROTANTIM ENERGIA, 2009).

4.2 ANÁLISE DE RISCO

Conforme apresentado no item 4.1 o barramento possui extensão de 460m e altura desde a fundação até o coroamento de 142 m com volume total de 4.630 hm³. Segundo o (SNISB, 2022), barragem é de Classe A cuja Categoria de Risco (CRI) é Baixo e Dano Potencial Associado (DPA) Alto para o empreendimento.

Segundo o Art. 8 da Lei 12.334/2010 é de responsabilidade do empreendedor e/ou responsável técnico escolhido a responsabilidade de implementar o PSB. Ainda, de acordo com o Art. 11 da mesma lei é de caráter obrigatório a elaboração do PAE para empreendimentos classificados de médio a alto dano potencial associado. Segundo o SNISB, o empreendimento possui Plano de Segurança de Barragem e Plano de Ação de Emergência, no entanto o empreendimento não possui Revisão Periódica de Segurança de Barragem, não conforme informações disponibilizadas no SNISB.

4.3 DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA

4.3.1 Cenários de ruptura

Saraiva (2014) define cenário de ruptura como arranjo único de circunstâncias que são de interesse para fins de avaliação de riscos e podem ou não influenciar uma ruptura hipotética.

Balbi (2008) cita entre essas circunstâncias: evento indicador, velocidade do vento, nível de água no reservatório, disposição das comportas, mecanismo de ruptura, onda de cheia oriunda de ruptura e parâmetros que determinam a presença de pessoas a jusante da barragem no momento da ruptura.

Existem diferentes tipos de cenários, além disso, devido ao grande número de singularidades que podem ocorrer no projeto de barragens e na complexidade do funcionamento desse tipo de estrutura, não é possível generalizar partes de conclusões e resultados obtidos em estudos, assim tornando cada empreendimento um caso à parte em alguns quesitos. Por isso, para fins de validade de estudo, deve-se compor alguns cenários a serem analisados que represente as circunstâncias com potencial de danos ao vale a jusante da barragem.

Devido à impossibilidade de validação dos resultados de um estudo de ruptura faz com que não seja possível escolher um único conjunto de parâmetros para a simulação da onda de cheia, assim faz-se necessário ponderar diferentes cenários de ruptura (BRASIL, 2005).

4.3.1.1 Cenários simulados

Para a UHE Pedra do cavalo foram escolhidos dois cenários de ruptura, sendo um no nível de operação normal e outro no nível de operação extrema (*maximorum*). A Tabela 4-1 apresenta os detalhes dos cenários adotados neste estudo de rompimento.

Tabela 4-1 – Cenários simulados

CENÁRIOS		COTA (m)	ÁREA (km ²)	VOLUME (hm ³)
1	Nível Máximo Normal (NMN)	106	106,42	2765,65
2	Nível Máximo Maximorum (NMM)	124	163,31	4630,96

Fonte: Própria do autor.

4.3.2 Análises das vazões de pico e do tempo base

Para obter a vazão de pico (Q_p) efluente devido à ruptura, expressões matemáticas relacionando à vazão máxima de descarga com as características da barragem (altura, comprimento, volume etc.) foram utilizadas. A Figura 4-2 apresenta diferentes fórmulas para obtenção de vazão de pico.

Para a compreensão das equações apresentadas a seguir, adotou-se a seguinte convenção:

Q_p = vazão máxima defluente da barragem em ruptura (m³/s);

V = volume máximo do reservatório para o nível de água máximo (m³);

A_s = área do reservatório para o nível de água máximo (m²);

B_d = largura da barragem (m);

H_d = altura da barragem (m);

B_b = largura final da brecha (m);

H_b = altura final da brecha (m);

$Y_{médio}$ = profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m);

T_p = tempo para desenvolvimento da brecha (s).

Figura 4-2 – Fórmulas matemáticas para obtenção de vazão de pico

AUTOR	VAZÃO DE PICO	CARACTERÍSTICA
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	$Q_p = 7,683H_d^{1,909}$	Equação baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa.
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_dV)^{0,48}$	Equação baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura.
Saint-Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)	$Q_p = \frac{8}{27}B_d\sqrt{g}Y_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Equação desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
Schoklistch (1917) apud ICOLD (1998)	$Q_p = \frac{8}{27}\left(\frac{B_d}{B_b}\right)^{1/2}B_b\sqrt{g}Y_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Equação considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem.
Bureau of Reclamation (1982) apud Bureau of Reclamation (1987)	$Q_p = 19H_d^{1,85}$	Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da ruptura.
Vertedor de Soleira Espessa (Singh, 1996)	$Q_p = 1,7B_bH_b^{3/2}$	De acordo com Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor retangular de soleira espessa.
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	$Q_p = 1,7B_b \left\{ \frac{1,94\frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[\frac{1,94A_s}{(B_b\sqrt{H_d})} \right]} \right\}^3$	Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t).

Fonte: USACE, 2010.

4.3.3 Análises dos mecanismos e tempo de formação de brecha

O tempo de pico está relacionado ao tempo de evolução da brecha e normalmente é definido a partir de tabelas relacionadas as características das barragens e do tipo da brecha, baseado em casos históricos similares ou formulações mais robustas que consideram o desenvolvimento da brecha com base em princípios da hidráulica, do transporte de sedimentos e da mecânica dos solos (BARFIELD *et al.*, 1981).

Para barragens de terra, o tempo de formação da brecha varia entre 30 minutos a 3 horas. Assim como na estimativa de largura de brecha, alguns autores utilizam equações empíricas para a obtenção da estimativa do tempo de abertura da brecha, conforme apresentado na Figura 4-3.

Figura 4-3 – Estimativa das características da brecha

Tipo de Barragem	Comprimento da brecha (Bb)	Componente horizontal da declividade dos taludes da brecha (H) H:1V	Tempo de ruptura t_f (horas)	Referência
Concreto Gravidade	Blocos monolíticos	Vertical	0,1 a 0,5	USACE (1980)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,3	FERC (1988)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,2	Fread (2006)
	Usualmente <0,5L	Vertical	0,1 a 0,3	ELETROBRÁS (2003)
Concreto em arco	L	Declividade do vale	<0,1	USACE (1980)
	L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	FERC (1988)
	0,8L a L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	Fread (2006)
	L	Entre 0 e declividade do vale	<0,1	ELETROBRÁS (2003)
Terra/Enrocamento	(0,5 a 0,3) x H	Entre 0 e 1	0,5 a 4,0	USACE (1980)
	(1,0 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	FERC (1988)
	(2,0 a 5,0) x H	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	Fread (2006)
	(2,0 a 4,0) x H	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	ELETROBRÁS (2003)

Fonte: Adaptado de Faria (2019).

Através dos autores citados, calculou-se as larguras e os tempos de abertura da brecha, no entanto optou-se por utilizar uma largura mínima de $0.5H$ e uma largura máxima de $2H$ e um tempo mínimo de ruptura de 1 hora e tempo máximo de 30 minutos. A Tabela 4-2 apresenta o resumo das condições de contorno para obtenção do hidrograma de ruptura.

Tabela 4-2 – Condições de contorno para obtenção do hidrograma de ruptura

CENÁRIOS		LARGURA DA BRECHA	TEMPO DE RUPTURA (h)	FONTE
1	Nível Máximo Normal (NMN)	$0.5 \times H$	1	USACE (1980)
2	Nível Máximo Maximorum (NMM)	$2 \times H$	0.5	FERC (1988), FREAD (2006), ELETROBRÁS (2003)

Fonte: Própria do autor.

4.3.4 Hidrograma de ruptura

A ruptura de uma barragem pode gerar onda de cheia para jusante na forma de um hidrograma, no qual as características dependem de como ocorre essa ruptura (MASCARENHAS, 1990).

Segundo Uemura (2007), pode-se utilizar os seguintes tipos de hidrogramas para simulação de propagação de onda de cheia. Os mesmos são apresentados nos itens a seguir.

Para compreensão dos hidrogramas apresentados, adotou-se a seguinte convenção:

Q_p = descarga máxima defluente da barragem em ruptura (m^3/s);

V = volume do reservatório da barragem no momento da ruptura (m^3);

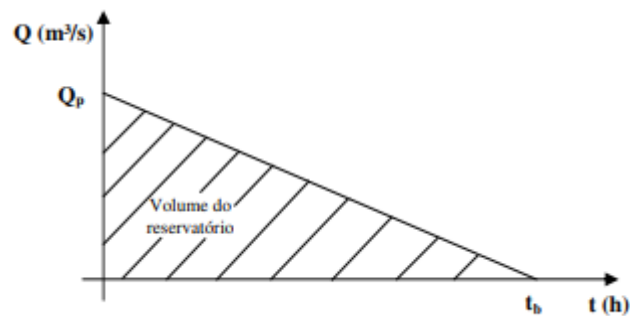
t_p = tempo de pico (s);

t_b = tempo de base (s).

1. Hidrograma triangular simplificado

Para o cenário de uma ruptura instantânea, conforme citado anteriormente, comum a barragens de concreto, o hidrograma assume a forma triangular (Figura 4-4). A área do hidrograma equivale ao volume armazenado no reservatório, sendo o tempo estimado para esvaziamento expresso pela equação 1.

Figura 4-4 – Hidrograma triangular simplificado



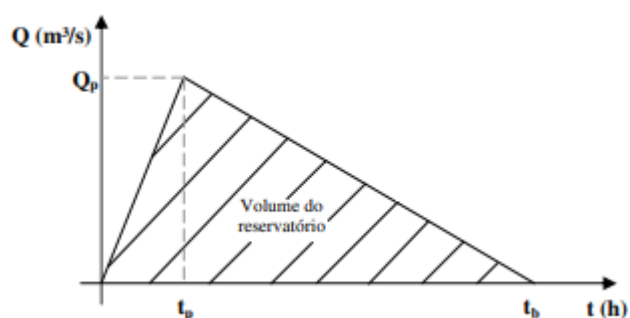
Fonte: Adaptado de Faria (2019).

$$t_b = \frac{2V}{Q_p}, \text{ para } t_p = 0 \quad (1)$$

2. Hidrograma para ruptura gradual

O hidrograma de ruptura gradual permite a representação do tempo de formação de brecha, no qual é caracterizado pelo tempo de pico (t_p). Sendo assim, é adequado para o cenário de ruptura não instantânea e pode ser obtido através da equação 2. Para o cenário de ruptura gradual o hidrograma assume a forma apresentada na Figura 4-5.

Figura 4-5 – Hidrograma de ruptura gradual



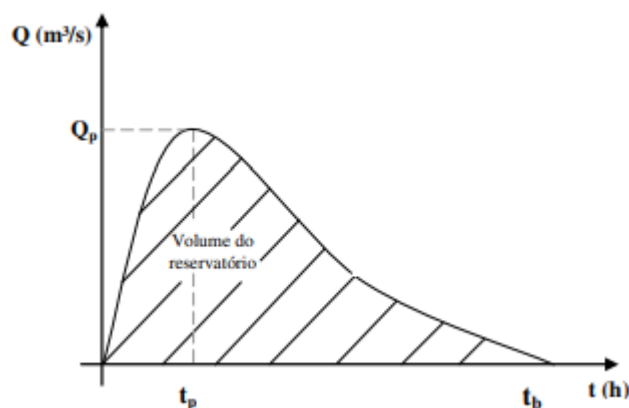
Fonte: Adaptado de Faria (2019).

$$Q(t) = Q_p - Q_p \left(\frac{t-t_p}{t_b-t_p} \right) \text{ para } t_p \neq 0 \quad (2)$$

3. Hidrograma de decaimento parabólico

Segundo Silva (2010), o hidrograma de decaimento parabólico representa o tempo de esvaziamento de forma mais gradual que o triangular, sendo o que mais representa a ruptura em barragens de terra. O hidrograma pode ser observado na Figura 4-6 e obtido através da equação 3.

Figura 4-6 – Hidrograma de decaimento parabólico



Fonte: Adaptado de Faria (2019).

$$Q(t) = Q_p \left[\frac{t}{t_p} e^{\left(1 - \frac{t}{t_p}\right)} \right]^k \quad (3)$$

Portanto, identificou-se que entre os tipos de hidrogramas citados anteriormente, conclui-se que para o rompimento gradual da UHE Pedra do Cavalo, o hidrograma de decaimento parabólico é o que mais se adequa da realidade de formação de brecha.

4.3.4.1 Aplicação no modelo hidrodinâmico

A avaliação da propagação da onda de cheia e dos mapas de inundação foi realizada a partir da utilização do modelo hidrodinâmico HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) – versão 6.0, do U.S. Army Corps of Engineers, de uso difundido e consolidado em estudos dessa natureza.

O programa permite obter o perfil da linha de água por meio de uma abordagem unidimensional, bidimensional ou a combinação desses métodos. No caso dos estudos da UHE Pedra do Cavalo, optou-se pela modelagem bidimensional, em que a propagação da onda de ruptura, no vale de jusante, é calculada a partir de uma área, definida por uma malha de elementos finitos.

4.3.4.2 *Dados de entrada no modelo hidrodinâmico*

O modelo hidrodinâmico utilizado nos estudos foi o HEC-RAS® em sua versão 6.0, considerando uma abordagem bidimensional a partir do trecho do reservatório, por cerca de 20 km, até o final do leito do rio Paraguaçu.

Utilizou-se o hidrograma de ruptura para o cenário 2, no qual representa a situação de operação extrema. Neste cenário, o trecho bidimensional foi representado por uma malha ortogonal base, com células de dimensões 50 m x 50 m e com detalhamento em algumas áreas com células de dimensões 20 m x 20 m, resultado de um estudo de sensibilidade em que foram experimentadas resoluções de 20 m a 50 m.

Para a extração dos resultados traçou-se a cada 0.5 km uma seção transversal desde a barragem até o limite da simulação, assim, o modelo nos permite analisar o comportamento da onda de cheia nestes locais.

4.3.4.3 *Modelo digital de Elevação (MDE) para as simulações hidrodinâmicas*

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real (BURROUGH, 1986). O MDE serve para representar a superfície real no computador, e é obtido a partir de dados de campo. A aquisição desses dados pode ser realizada por levantamentos, digitalização de mapas, medidas fotogramétricas, a partir de modelos estereoscópicos, e dados altimétricos, adquiridos por GPS's, aviões ou satélites.

O modelo escolhido para elaboração do presente estudo foi o sensor PALSAR do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), lançado em 2006 pela missão da agência de exploração aeroespacial japonesa (Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA). A coleta de dados do sensor PALSAR durou até 2006 e foi projetado com mais dois instrumentos para contribuir no mapeamento da topografia terrestre, precisão no monitoramento da cobertura vegetal e de desastres e no levantamento de recursos naturais (ASF DAAC, 2018). Os MDE ALOS PALSAR podem ser adquiridos gratuitamente, já corrigidos e projetados no sistema UTM WGS84, nas resoluções baixa e alta, de 30m e 12,5m, respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VAZÕES DE PICO ENCONTRADAS

Conforme a metodologia apresentada no item 4.3.2 foram calculadas as vazões de pico (Q_p) para os cenários propostos anteriormente. A Tabela 5-1 descreve respectivamente os dados de entrada utilizados para os cálculos de Q_p para a UHE Pedra do Cavalo. As vazões de pico obtidas são apresentadas nas Tabela 5-2.

Tabela 5-1 – Dados de Entrada

Cenário 1 – Nível Máximo Normal			
Volume	V	2765,65	hm ³
Área	As	106,42	km ²
Largura	Bd	470	m
Altura da barragem	Hd	142,5	m
Largura da brecha	Bb	71,25	m
Altura da brecha	Hb	57	m
Profundidade média	Ymed	47,5	m
Tempo da brecha	Tp	3600	s
Cenário 2 – Nível Máximo <i>Maximorum</i>			
Volume (NMN)	V	4630,96	hm ³
Área (NMN)	As	163,30	km ²
Largura	Bd	470	m
Altura da barragem	Hd	142,5	m
Largura da brecha	Bb	285	m
Altura da brecha	Hb	57	m
Profundidade média	Ymed	47,5	m
Tempo da brecha	Tp	1800	s

Fonte: Própria do autor.

Tabela 5-2 – Vazões de pico

VAZÃO DE PICO (m³/s)		EQUAÇÃO
CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	
99.348,98	99.348,98	Lou (1981)
443.486,95	567.989,46	Hagen (1982)
142.790,40	142.790,40	Saint-Venant (1997)
55.595,87	111.191,73	Schoklistch (1917)

183.362,74	183.362,74	Bureau of Reclamation (1982)
52.125,00	208.500,00	Singh (1996)
197.140,41	622.533,06	Wetmore (1981)

Fonte: Própria do autor.

Para o cenário 1, considerou-se a largura da brecha de ruptura de 71,25m ($0.5 \times H$) e com tempo de desenvolvimento da brecha de 1 hora ou 3600 segundos. Observa-se que a menor vazão é de 52.125 m³/s e a maior 443.486,95 m³/s, uma variação de 850%. As vazões que mais se aproximaram foram as de Schoklistch e Singh, visto que na formulação de Schoklistch é considerado a relação entre a largura da brecha e a largura do barramento, enquanto formulação de Singh é considerado a relação entre a largura da brecha e a altura da brecha de ruptura. Observou-se que a formulação de Wetmore é a que possui maior relação entre o tempo de formação de brecha e a largura da brecha de ruptura, no entanto apresentou uma variação de cerca de 378% com a menor vazão de pico observada. A formulação de Saint-Venant não demonstrou sensibilidade, quando comparado aos outros autores, visto que na sua formulação a vazão de pico só possui variação quando é alterado a largura do barramento. Lou e Bureau of Reclamation possuem relação com a altura do barramento e apresentaram uma relação entre si de cerca de 184%. Hagen demonstrou a maior vazão de pico por considerar em sua formulação o volume total do reservatório e altura do barramento.

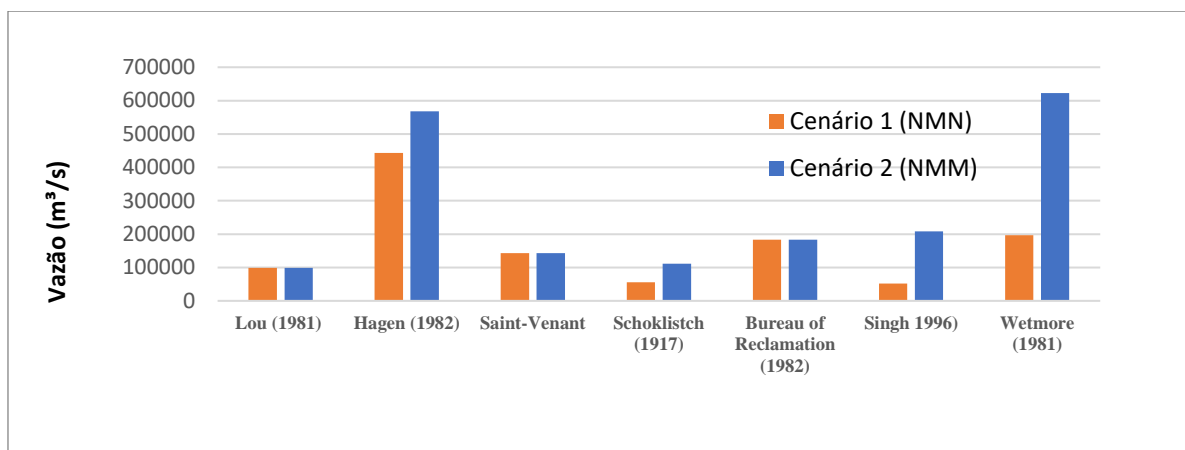
Para o cenário 2, considerou-se a largura da brecha de ruptura de 285m ($2 \times H$) e com tempo de desenvolvimento de brecha de 30 min ou 1800 segundos. Identificou-se que para Lou, Saint-Venant e Bureau of Reclamation as vazões permaneceram constantes por não possuírem relação com a largura de brecha e tempo de ruptura. Hagen apresentou a maior vazão de pico no primeiro cenário de ruptura, no entanto no cenário 2 apresentou uma variação de 128%. Neste cenário Schoklistch e Singh apresentaram vazões 111.191m³/s e 208.500 m³/s, onde o primeiro demonstrou uma variação de 200% e o segunda uma variação de 400%, quando comparado ao cenário anterior. Observou-se que a formulação de Wetmore apresentou uma vazão de pico de 622.533 m³/s, sendo a maior para este cenário.

Por fim, identificou-se que as vazões de pico do cenário 1 variaram em uma proporção menor do que no cenário 2, devido ao tempo de pico ser maior e o volume no reservatório ser menor. As vazões para o cenário 2 demonstraram maiores variações, devido ao tempo de pico ser menor e o volume do reservatório ser maior. Ainda, identificou-se que entre os autores

apresentados, Wetmore possui a formulação que possui maior relação entre o tempo de pico e brecha de ruptura e é a que mais se adequa aos cenários propostos para a UHE Pedra do Cavallo.

A Figura 5-1 apresenta o resumo dos resultados apresentados.

Figura 5-1 – Vazões de pico



Fonte: Própria do autor.

5.2 HIDROGRAMA DE RUPTURA

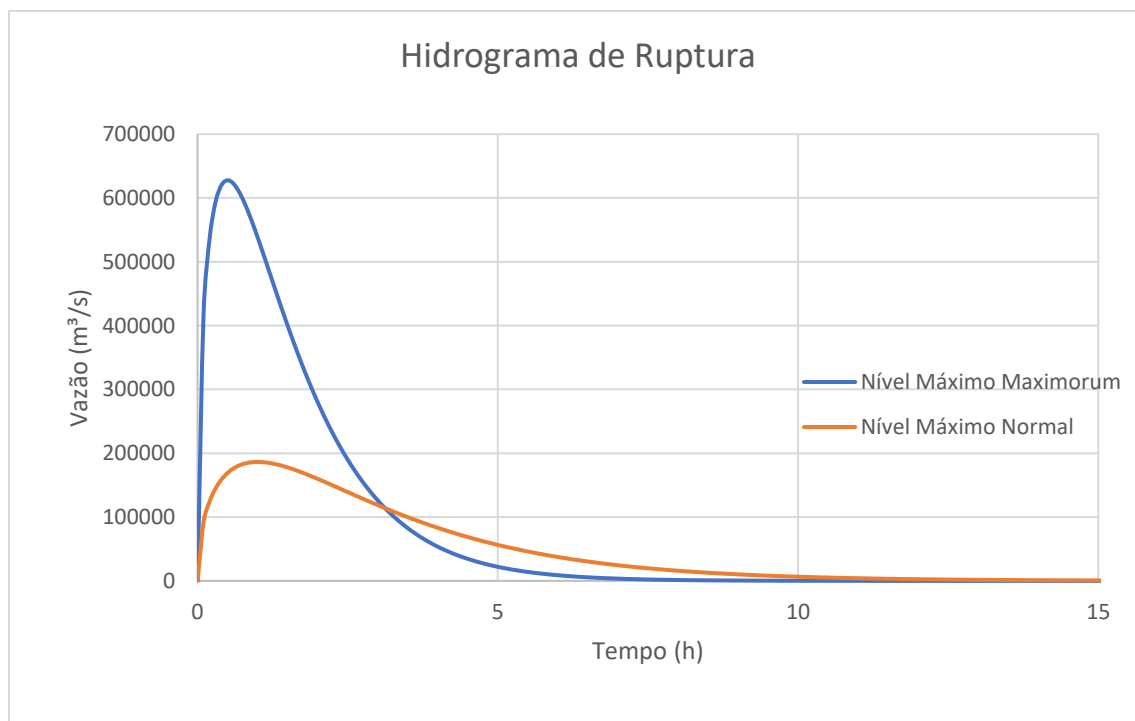
A metodologia apresentada no item 4.3.2 teve como premissa obter as vazões de pico apresentadas no item 5.1. A propagação do volume do reservatório, de acordo com o tempo de pico estipulado, poderá ser mais lenta ou mais rápida, quando considerado o hidrograma de decaimento parabólico.

De acordo com o hidrograma de decaimento parabólico o somatório das áreas parciais sob a curva, deve ser igual ao volume total do reservatório. Diante do apresentado, para a obtenção da Q_p aplicou-se o teste de hipóteses, que é uma ferramenta que testa vários valores para fórmulas da planilha de cálculo. Fixou-se os tempos de pico de 1800 e 3600 segundos e variou-se o campo da Q_p até que a área do gráfico coincida com o volume do reservatório para os dois cenários.

Identificou-se que o valor encontrado para vazão de pico para o cenário 1 é de $186.380,77 \text{ m}^3/\text{s}$ é próxima aos valores encontrados nas formulações de Saint Venant, Bureau of Reclamation e Wetmore. Para o cenário 2 o valor encontrado para vazão de pico é de $627.747,65 \text{ m}^3/\text{s}$ são próximos aos valores encontrados nas formulações empíricas de Hagen e Wetmore. Conforme dito anteriormente, a formulação proposta por Wetmore é a que mais representa os cenários de ruptura do presente estudo.

Os resultados obtidos são apresentados no ANEXO I e os hidrogramas de ruptura na Figura 5-2.

Figura 5-2 – Hidrograma de Ruptura NMN e NMM



Fonte: Própria do autor.

6 ANÁLISE DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Conforme apresentado no item 5.2, a equação que mais se aproximou da vazão de pico que representa o reservatório da UHE Pedra do Cavalo foi a proposta por Wetmore. Com base nisso, aplicou-se o hidrograma de ruptura do cenário 2, no qual representa o cenário de operação extrema, no modelo hidrodinâmico HEC-RAS em sua versão 6.0, considerando a metodologia apresentada no item 4.3.4.2. Foram inseridas seções transversais espaçadas a cada 0.5 km desde o barramento até o limite de simulação de 20 km, que nos permitem avaliar o comportamento da onda cheia no vale a jusante. A Tabela 6-1 apresenta o resumo dos resultados obtidos na simulação, enquanto na Tabela 6-2 são apresentados os resultados mais detalhados.

Para a compreensão dos dados apresentados a seguir, adotou-se a seguinte convenção:

T_c = é o tempo de chegada da onda de ruptura a partir do instante de ruptura;

T_p = é o tempo de pico do hidrograma desde o início da passagem da onda de cheia pelo reservatório;

$V_{m\acute{a}x}$ = velocidade máxima observada na seção (m/s);

$Q_{m\acute{a}x}$ = é a vazão máxima observada na seção (m³/s);

$N_{m\acute{a}x}$ = é a velocidade máxima observada na seção (m);

D = é duração da submergência foi obtida analisando o a subida e a descida do hidrograma de ruptura.

Tabela 6-1 – Resumo de resultados da simulação

Cenários	UHE PEDRA DO CAVALO		Seção de jusante a 20 km da barragem	
	Q_{pico} (m ³ /s)	N_{Amax} (m)	Q_{pico} (m ³ /s)	N_{Amax} (m)
Nível Máximo Maximorum	625403.38	87.53	506487.28	39.39

Fonte: Própria do autor.

Tabela 6-2 – Resultados do estudo de ruptura

Distância (km)	T_c (min)	T_p (min)	$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)	$Q_{m\acute{a}x}$ (m ³ /s)	$N_{m\acute{a}x}$ (m)	D (hh:min)
0.5	00H01M	00H48M	14.09	625403.38	87.53	27H38M
1.0	00H01M	00H50M	19.98	622975.94	84.01	30H12M

1.5	00H02M	00H46M	20.65	619407.69	81.71	32H18M
2.0	00H03M	01H04M	18.06	615317.00	80.70	34H15M
2.5	00H03M	01H11M	20.53	609843.06	79.14	40H44M
3.0	00H03M	01H17M	27.02	609843.06	79.08	39H47M
3.5	00H05M	01H16M	24.23	598861.31	79.23	42H39M
4.0	00H06M	01H13M	20.50	596336.31	79.31	45H425M
4.5	00H06M	01H23M	16.44	594189.38	79.11	49H53M
5.0	00H07M	01H23M	17.67	592136.50	78.76	50H54M
5.5	00H08M	01H17M	17.15	591053.50	76.36	55H43M
6.0	00H09M	01H31M	18.01	590089.81	73.35	55H47M
6.5	00H09M	01H34M	21.31	588839.50	71.10	66H30M
7.0	00H10M	01H20M	19.19	587087.56	70.31	77H42M
7.5	00H11M	01H16M	20.74	585352.00	68.98	135H39M
8.0	00H12M	01H11M	19.82	582502.06	63.81	133H20M
8.5	00H13M	01H13M	20.48	581501.88	61.77	83H06M
9.0	00H14M	01H08M	19.37	580487.50	61.60	116H25M
9.5	00H14M	01H14M	18.86	579098.56	61.55	149H45M
10.0	00H15M	01H18M	20.68	577220.75	60.20	169H47M
10.5	00H16M	01H06M	16.47	576032.63	60.22	133H03M
11.0	00H16M	01H06M	14.84	576032.63	60.37	99H43M
11.5	00H18M	01H16M	15.43	574368.94	60.92	99H41M
12.0	00H19M	01H18M	15.16	573042.25	59.88	86H20M
12.5	00H19M	01H17M	15.49	571466.44	58.45	87H12M
13.0	00H20M	01H44M	16.89	569276.19	57.17	82H59M
13.5	00H21M	02H02M	18.05	566905.44	54.96	91H25M
14.0	00H22M	02H0M	17.01	546861.44	52.68	92H12M
14.5	00H22M	01H36M	17.30	546861.44	52.17	95H37M
15.0	00H25M	01H45M	22.73	556414.63	50.83	114H36M
15.5	00H24M	01H25M	20.02	553905.81	50.66	99H35M
16.0	00H25M	01H53M	18.26	552267.75	49.85	96H14M
16.5	00H26M	01H48M	16.13	550208.25	49.66	95H55M
17.0	00H26M	01H53M	16.58	548715.56	49.45	108H19M
17.5	00H28M	01H35M	15.41	547356.44	50.86	99H31M
18.0	00H29M	01H27	13.56	546350.69	50.21	99H30M
18.5	00H30M	01H45M	12.37	545546.13	49.17	97H49M
19.0	00H31M	01H38M	14.61	545225.25	46.24	99H28M
19.5	00H32M	01H53M	20.35	506487.28	35.59	101H34M
Baía do Iguape	00H32M	01H53M	12.54	506487.28	39.39	99H57M

Fonte própria do autor.

Identificou-se que a vazão de pico atingiu 625.403,38m³/s na primeira seção localizada a 0.5 km do ponto de ruptura, cujo nível de água máximo atingiu aproximadamente 87,53m.

Na seção localizada a 20km do local de ruptura foi observado um pico de vazão de aproximadamente 506.487,28m³/s e um nível de água de 39,39m.

Em relação a vazão máxima, identificou-se que o vale a jusante amorteceu aproximadamente 118.916,10m³/s (19%) entre as extremidades avaliadas (20 km). Os efeitos do evento são sentidos até 169 horas e 47 minutos (aproximadamente 7 dias), quando por fim, a onda não oferece mais riscos nas planícies de inundação. A Figura 6-1 representa o comportamento das vazões ao longo do vale a jusante, assim como a Figura 6-2 representa as variações nas elevações dos níveis de água.

Figura 6-1 - Hidrograma para as seções no vale a jusante

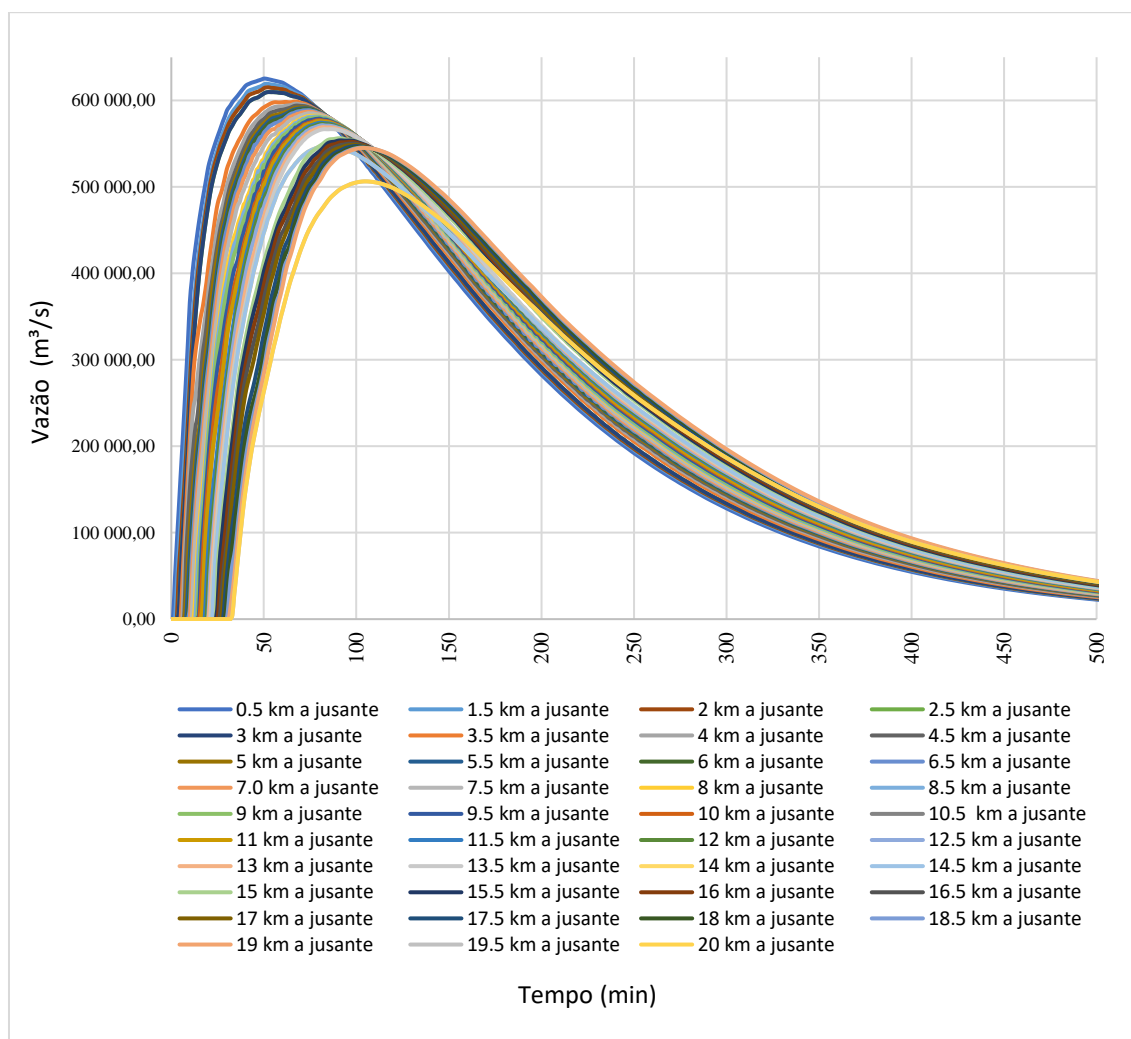
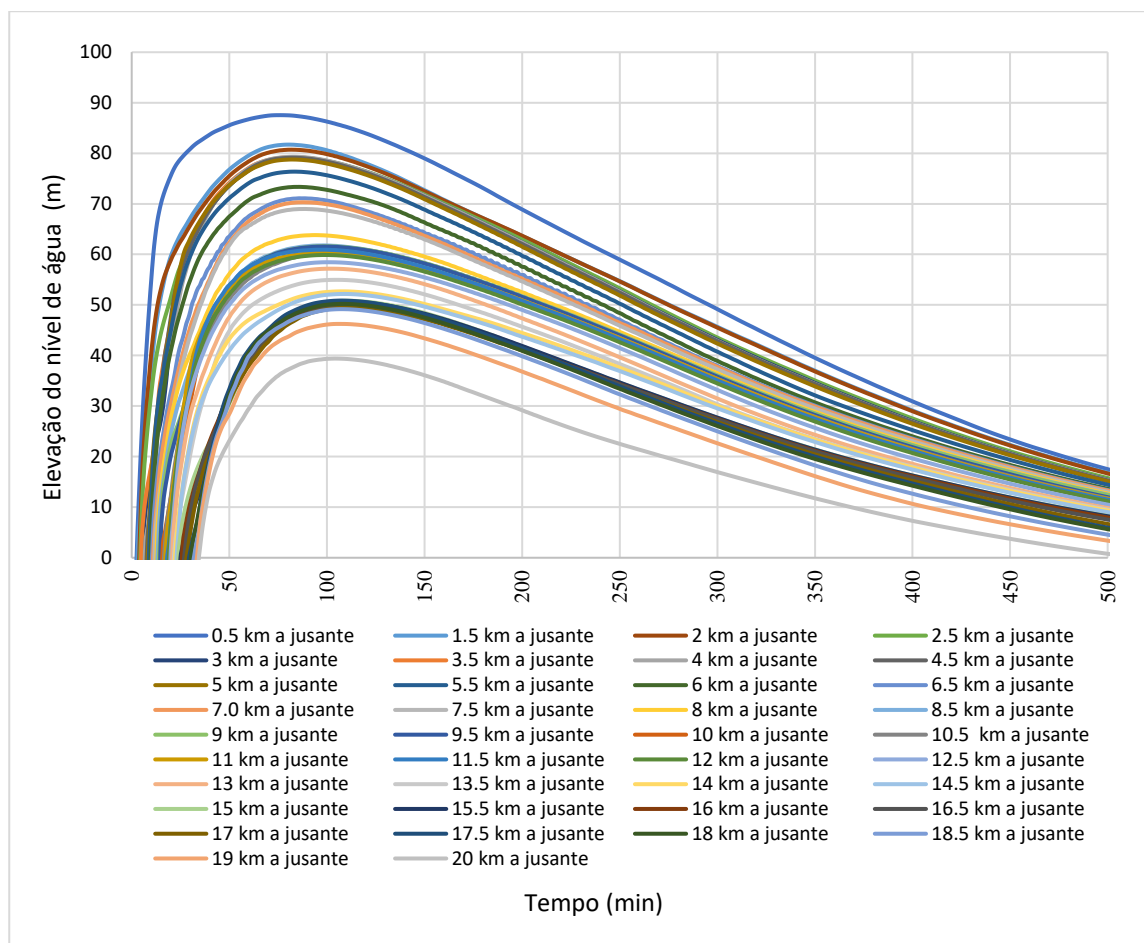


Figura 6-2 - Elevação do nível de água



Fonte: Própria do autor.

6.1 ÁREA DE INUNDAÇÃO

A delimitação da área de inundação foi obtida através de uma ferramenta chamada RAS- Mapper, tecnologia SIG, acoplada ao HEC-RAS, no qual permite delimitar a mancha de inundação em níveis de detalhamento que são impraticáveis para métodos manuais. A delimitação é realizada automaticamente comparando os níveis máximos determinados no modelo hidrodinâmico, em cada seção, com as elevações do modelo digital de elevação. As machas de inundação são resultantes do cruzamento dos níveis máximos de água com as elevações do MDE. A área de inundação resultante possui um perímetro de aproximadamente 153 km e uma área correspondente a 42,80km². A mancha de inundação pode ser observada na Figura 6-3.

Figura 6-3 – Área de inundação.



Fonte: Google Earth.

6.1.1 Zona de autossalvamento

A zona de autossalvamento (ZAS) é definida como a região a jusante da barragem em que se considera não haver tempo suficiente para intervenção das autoridades competentes em caso de acidente. A ZAS é definida como a área delimitada pelos maiores níveis de água alcançados no percurso da onda de cheia pelo vale do rio, limitada a menor distância entre 10 km a jusante do eixo da barragem ou a distância percorrida pela onda de cheia em até 30 minutos (ANA, 2016).

Com base nos resultados apresentados no item 6 para esta simulação, a onda de cheia percorre 20km no intervalo de 30min, sendo este o pior cenário de inundação induzida pelo rompimento. Portanto, adotou-se como o limite da ZAS a distância de 20km do barramento.

Em uma situação de emergência, o alerta de autossalvamento deve ser acionado para a área que indica o pior cenário de rompimento. Cabe ressaltar que devido à incerteza da vazão afluente associada ao evento de ruptura e ao baixo tempo de resposta nessa situação, a zona de autossalvamento é definida para o cenário mais crítico da inundação gerada pelo rompimento.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de ruptura de barragens é muito amplo e engloba inúmeras áreas do conhecimento. A metodologia utilizada para determinar as vazões de pico e posteriormente o hidrograma de ruptura, são partes de um estudo mais amplo, no qual abrange não só o rompimento, assim como os efeitos causados no vale a jusante no caso de uma ruptura hipotética.

Ao identificar a grande variação das vazões de pico para os mesmos dados de entrada, a escolha de qual melhor representa este estudo pode ser problemática, o que dificulta a escolha de qual equacionamento utilizar para simular o rompimento. A equação do hidrograma de ruptura de decaimento parabólico, considerando o tempo de pico e o volume do reservatório, foi a que mais representou os cenários propostos neste estudo.

A metodologia proposta busca promover um melhor entendimento de ferramentas que possam facilitar o processo de simulação de rompimento de barragens, no entanto não se pode afirmar que hidrograma de ruptura gerado representa uma situação real, e sim um fator contribuinte para aumento da segurança dessas estruturas.

A aplicação do modelo hidrodinâmico de simulação da ruptura hipotética da UHE Pedra do Cavalo, permitiu avaliar os níveis de água a jusante na hipótese de ruptura semelhante aos cenários propostos neste estudo.

O cenário extremo resultou em vazão de pico de $625.403,38\text{m}^3/\text{s}$ na seção da barragem e uma elevação do nível de água de aproximadamente de 87,53m. Os efeitos do evento são sentidos até 169 horas e 47 minutos após o momento do colapso, quando, por fim, a onda não oferece mais riscos a planície de inundação. Em relação a vazão máxima, a vazão de pico inicial foi de $625.403,38\text{ m}^3/\text{s}$ e a final de $506.487,28\text{m}^3/\text{s}$, tendo uma amortização de aproximadamente 19% entre as extremidades avaliadas.

Apesar das limitações, o estudo permitiu a estimativa das vazões e níveis máximos resultadas de passagem da onda de ruptura, permitindo o mapeamento da área de inundação e a zona de autossalvamento para o cenário de operação extrema.

Recomenda-se, para estudos futuros, que sejam avaliados distintos modos de ruptura da barragem UHE Pedra do Cavalo a fim de se verificar e validar as condições críticas decorrentes de eventual ruptura. Além disso, recomenda-se a utilização de metodologia aprofundada de tempo de abertura de brecha, avaliação do trânsito de cheias na bacia de montante e incorporação de estudos geotécnicos referentes ao barramento.

Para gestores, recomenda-se que sejam implementados treinamentos junto às comunidades que estão em zonas potencialmente atingidas pela ruptura com o objetivo de conscientizar e educar

a população quanto aos riscos envolvidos. O treinamento constante e a percepção ao risco são fatores importantes na gestão de desastres e que normalmente são difíceis de serem mensurados. Dessa forma, é possível reduzir eventuais impactos humanos causados pela ruptura da barragem.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional do Águas e Saneamento Básico. ANA. **Instruções para Apresentação do Plano de Segurança da Barragem**. Brasília: ANA, 2016a.

Agência Nacional do Águas e Saneamento Básico ANA. **Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE**. Brasília: ANA, 2016b.

ASF DAAC. **Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center**. Disponível em: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar/>.

BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas. **Oklahoma Technical Press**, p. 104-108, 1981.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo. Brasília, DF, 8 jan. 1997. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=FF6287BC38836EBD9BC60A913B631C31.proposicoesWebExterno2?codteor=470365&filename=LegislacaoCitada+-PL+1253/2007. Acesso em: nov. 2021.

BRASIL. Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: nov. 2021.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986. 193p.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. 1. ed. Illinois: Editora Mcgraw Hill Book Company, 1959.

COELBA. Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia S/A & CNO. Construtora Norberto Odebrecht S/A. **Estudos de Viabilidade da Motorização da Barragem de Pedra do Cavalo** – Rio Paraguaçu, Bahia. VOLUME V – MEIO FÍSICO. 2000.

COLLISCHONN, C.; TUCCI, C. E. M. Análise de Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 191-206, 1997.

COLLISCHONN, W. **Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS**. 1997. 192f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IPH-UFRGS, 1997.

Conselho Pastoral dos Pescadores. Org: Tomáz, Alzení de Freitas & Santos, Gilmar. **Conflitos Socioambientais e Violações de Direitos Humanos em Comunidades Tradicionais Pesqueiras no Brasil**. Brasília-DF. 2016. 104p.

COSTA, J. M. de A. **Conflitos socioambientais no estado de Sergipe: natureza, elementos deflagradores e sujeitos políticos envolvidos**. 2019. 159f. Dissertação (Mestrado em Serviço Social). Universidade Federal de Sergipe. UFS, São Cristóvão, 2019.

COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

COUTO, G. A. **Análise da influência do regime de vazão da UHE de Pedra do Cavalo no comportamento espacial e temporal da salinidade no trecho fluvioestuarino do baixo curso do rio Paraguaçu à Baía do Iguape**. 2014. 124f. Dissertação (Mestre em Meio ambiente, Águas e Saneamento). Universidade Federal da Bahia. UFBA, Salvador, 2014.

FARIA, L F F.; REIS, M. B. S.; AMORIM, J. C. C. Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**. 2019. Disponível em: http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2019/RMCT_45518.pdf?msclkid=7c3c77e1cea511ec9a4259744097df06. Acesso em: abr. 2022.

FIOCRUZ. **Mapa de Conflitos Injustiça Ambiental e Saúde Pública**. Disponível em: <http://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/>. Acesso em: nov. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para localização, projeto e construção.** Roma: FAO, 2011. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ba0081p/ba0081p.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2021.

LADEIRA, J. E. R.; ESPÓSITO, T.; NAGHETTINI, M. Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico. 2007. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007. [Anais...]. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/d27f62dd4dd4fedb0059caf2c10581ab_325347561cf292b434b74adcc60c1f33.pdf. Acesso em: nov. 2021.

LIMA, C. H. P. **Avaliação das Alterações Hidrológicas a Jusante de Barragens por meio de Análise de Sensibilidade à Variação de Variáveis de Projeto.** 2014. 231f. (Tese de Mestrado). Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento. Universidade Federal da Bahia. UFBA, Salvador, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/16984/1/LIMA2014.pdf>. Acesso em: nov. 2021.

MAB. **Política Nacional de Direitos das Populações Atingidas por Barragens.** 2003. Disponível em: http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/documentacao_e_divulgacao/doc_biblioteca/bibli_servicos_produtos/BibliotecaDigital/BibDigitalLivros/TodosOsLivros/PNAB-Politica-Nacional-de-Direitos-das-Populacoes-Atingidas-por-Barragens.pdf. Acesso em: nov. 2021.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens.** 1990. 291f. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.

MHL. **Review and Assessment of Hydrologic/Hydraulic Flood Models.** New South Wales Government. Manly Hydraulics Laboratory, NSW, Australia, 2006.

SARAIVA, S. L. **Comparação entre Critérios para Determinação de Hidrogramas de Ruptura de Barragens.** 2014. 77f. Trabalho de Conclusão de curso (Departamento de Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS, Porto Alegre, 2014.

SILVA JUNIOR J. C. G. Estudo Comparativo Entre Modelos Unidimensional e Pseudo-bidimensional para Simulação da Propagação de Ondas Provocadas Pela Ruptura de Barragens. 2013. 132f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ. (COPPE), 2013.

TUCCI, C. E. M. *et al.* **Gestão da água no Brasil.** Brasília: UNESCO, 2001.

UEMURA, S. **Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens**. 2009. 160f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP, São Paulo, 2009.

USACE. U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS, **River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center (HEC), Version 4.1, 2010. 417p.

WAHL, T. L. The Uncertainty of Embankment Dam Breach Parameter Predictions Based on Dam Failure Case Studies in USDA/FEMA, Workshop on Issues, Resolutions and Research. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 130, n. 5, may. 2004.

WARD, J. V.; STANFORD, J. A. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. **Regulated rivers: research & management**, v. 10, n. 2-4 , p. 159-168, aug. 1994.

ANEXO I

Cenário 1			Cenário 2		
t (h)	Q(t)	Áreas Parciais	t (h)	Q(t)	Áreas Parciais
0	0.00	33276383	0	0.00	150771894
0.1	92434.40	44764773	0.1	418810.82	192932743
0.2	124346.59	52151558	0.2	535924.29	213807099
0.3	144865.44	57282496	0.3	593908.61	223389132
0.4	159118.04	60920325	0.4	620525.37	225989155
0.5	169223.13	63480175	0.5	627747.65	224000390
0.6	176333.82	65222401	0.6	622223.30	218923670
0.7	181173.34	66325118	0.7	608121.31	211767469
0.8	184236.44	66917479	0.8	588242.97	203238537
0.9	185881.89	67097075	0.9	564551.49	193845336
1	186380.77	66939923	1	538459.27	183959513
1.1	185944.23	66506603	1.1	510998.65	173854959
1.2	184740.56	65846257	1.2	482930.44	163733931
1.3	182906.27	64999305	1.3	454816.47	153745205
1.4	180553.62	63999355	1.4	427070.02	143997100
1.5	177775.99	62874600	1.5	399991.94	134567027
1.6	174651.67	61648851	1.6	373797.30	125508656
1.7	171246.81	60342327	1.7	348635.16	116857347
1.8	167617.57	58972274	1.8	324603.74	108634338
1.9	163811.87	57553448	1.9	301762.05	100849993
2	159870.69	56098503	2	280138.87	93506343
2.1	155829.18	54618308	2.1	259739.84	86599088
2.2	151717.52	53122205	2.2	240553.02	80119171
2.3	147561.68	51618226	2.3	222553.25	74054031
2.4	143383.96	50113269	2.4	205705.64	68388588
2.5	139203.53	48613253	2.5	189968.30	63106030
2.6	135036.81	47123242	2.6	175294.53	58188427
2.7	130897.90	45647561	2.7	161634.52	53617221
2.8	126798.78	44189881	2.8	148936.73	49373605
2.9	122749.67	42753309	2.9	137148.90	45438817
3	118759.19	41340453	3	126218.94	41794371
3.1	114834.59	39953483	3.1	116095.47	38422223
3.2	110981.90	38594188	3.2	106728.40	35304903
3.3	107206.08	37264017	3.3	98069.17	32425603

3.4	103511.16	35964126	3.4	90071.12	29768241
3.5	99900.35	34695409	3.5	82689.56	27317500
3.6	96376.14	33458534	3.6	75881.94	25058849
3.7	92940.37	32253965	3.7	69607.91	22978549
3.8	89594.35	31081996	3.8	63829.30	21063652
3.9	86338.88	29942762	3.9	58510.14	19301982
4	83174.34	28836269	4	53616.62	17682122
4.1	80100.75	27762404	4.1	49117.01	16193386
4.2	77117.79	26720952	4.2	44981.63	14825788
4.3	74224.87	25711612	4.3	41182.75	13570019
4.4	71421.15	24734008	4.4	37694.50	12417407
4.5	68705.58	23787699	4.5	34492.80	11359890
4.6	66076.94	22872189	4.6	31555.25	10389980
4.7	63533.86	21986935	4.7	28861.05	9500729
4.8	61074.82	21131357	4.8	26390.91	8685702
4.9	58698.21	20304843	4.9	24126.95	7938938
5	56402.34	19506753	5	22052.61	7254927
5.1	54185.43	18736430	5.1	20152.58	6628575
5.2	52045.64	17993199	5.2	18412.71	6055179
5.3	49981.11	17276375	5.3	16819.94	5530400
5.4	47989.93	16585263	5.4	15362.22	5050234
5.5	46070.17	15919165	5.5	14028.43	4610996
5.6	44219.90	15277384	5.6	12808.32	4209289
5.7	42437.18	14659219	5.7	11692.47	3841987
5.8	40720.05	14063976	5.8	10672.18	3506214
5.9	39066.60	13490965	5.9	9739.48	3199327
6	37474.90	12939503	6	8887.02	2918895
6.1	35943.06	12408914	6.1	8108.04	2662686
6.2	34469.21	11898535	6.2	7396.35	2428650
6.3	33051.49	11407710	6.3	6746.25	2214905
6.4	31688.08	10935797	6.4	6152.51	2019726
6.5	30377.21	10482165	6.5	5610.35	1841528
6.6	29117.13	10046198	6.6	5115.35	1678859
6.7	27906.10	9627290	6.7	4663.50	1530389
6.8	26742.47	9224852	6.8	4251.08	1394898
6.9	25624.59	8838309	6.9	3874.72	1271269
7	24550.86	8467098	7	3531.30	1158479
7.1	23519.72	8110674	7.1	3218.00	1055591
7.2	22529.65	7768504	7.2	2932.20	961749

7.3	21579.18	7440071	7.3	2671.52	876166
7.4	20666.87	7124873	7.4	2433.80	798127
7.5	19791.32	6822422	7.5	2217.02	726973
7.6	18951.17	6532245	7.6	2019.37	662106
7.7	18145.12	6253882	7.7	1839.18	602976
7.8	17371.89	5986889	7.8	1674.93	549082
7.9	16630.25	5730835	7.9	1525.23	499964
8	15918.99	5485304	8	1388.79	455205
8.1	15236.96	5249892	8.1	1264.46	414421
8.2	14583.03	5024210	8.2	1151.17	377263
8.3	13956.14	4807880	8.3	1047.95	343412
8.4	13355.22	4600539	8.4	953.92	312576
8.5	12779.28	4401835	8.5	868.27	284490
8.6	12227.32	4211429	8.6	790.25	258909
8.7	11698.41	4028992	8.7	719.19	235613
8.8	11191.65	3854210	8.8	654.48	214400
8.9	10706.14	3686777	8.9	595.55	195084
9	10241.05	3526401	9	541.90	177497
9.1	9795.56	3372796	9.1	493.05	161486
9.2	9368.88	3225693	9.2	448.57	146910
9.3	8960.26	3084826	9.3	408.08	133643
9.4	8568.96	2949945	9.4	371.23	121567
9.5	8194.29	2820804	9.5	337.68	110575
9.6	7835.57	2697171	9.6	307.15	100572
9.7	7492.14	2578819	9.7	279.37	91470
9.8	7163.39	2465533	9.8	254.08	83186
9.9	6848.70	2357102	9.9	231.07	75649
10	6547.51	2253328	10	210.14	68792
10.1	6259.24	2154017	10.1	191.09	62553
10.2	5983.38	2058983	10.2	173.76	56877
10.3	5719.40	1968050	10.3	157.99	51713
10.4	5466.81	1881046	10.4	143.65	47017
10.5	5225.13	1797807	10.5	130.60	42745
10.6	4993.91	1718174	10.6	118.74	38859
10.7	4772.71	1641998	10.7	107.94	35325
10.8	4561.10	1569131	10.8	98.12	32111
10.9	4358.70	1499435	10.9	89.20	29188
11	4165.10	1432775	11	81.08	26530
11.1	3979.93	1369023	11.1	73.70	24114

11.2	3802.84	1308056	11.2	66.98	21916
11.3	3633.49	1249755	11.3	60.88	19918
11.4	3471.54	1194006	11.4	55.33	18101
11.5	3316.68	1140701	11.5	50.28	16450
11.6	3168.61	1089735	11.6	45.69	14948
11.7	3027.04	1041009	11.7	41.52	13584
11.8	2891.69	994425	11.8	37.73	12343
11.9	2762.29	949893	11.9	34.29	11215
12	2638.59	907323	12	31.15	10190
12.1	2520.34	866631	12.1	28.31	9258
12.2	2407.31	827737	12.2	25.72	8412
12.3	2299.27	790562	12.3	23.37	7642
12.4	2196.01	755032	12.4	21.23	6943
12.5	2097.31	721076	12.5	19.29	6307
12.6	2002.99	688625	12.6	17.52	5729
12.7	1912.85	657614	12.7	15.92	5205
12.8	1826.71	627981	12.8	14.46	4728
12.9	1744.39	599665	12.9	13.13	4294
13	1665.73	572608	13	11.93	3901
13.1	1590.58	546757	13.1	10.83	3543
13.2	1518.77	522058	13.2	9.84	3218
13.3	1450.16	498460	13.3	8.94	2923
13.4	1384.61	475916	13.4	8.12	2654
13.5	1321.99	454379	13.5	7.37	2411
13.6	1262.16	433804	13.6	6.70	2189
13.7	1205.01	414151	13.7	6.08	1988
13.8	1150.42	395377	13.8	5.52	1805
13.9	1098.27	377445	13.9	5.01	1639
14	1048.46	360317	14	4.55	1489
14.1	1000.88	343957	14.1	4.14	1352
14.2	955.44	328332	14.2	3.75	1227
14.3	912.03	313409	14.3	3.41	1115
14.4	870.58	299157	14.4	3.10	1012
14.5	830.99	285547	14.5	2.81	919
14.6	793.19	272549	14.6	2.55	834
14.7	757.08	260137	14.7	2.32	757
14.8	722.60	248285	14.8	2.10	688
14.9	689.68	236967	14.9	1.91	624
15	658.24	226160	15	1.73	567

15.1	628.22	215841	15.1	1.57	515
15.2	599.56	205989	15.2	1.43	467
15.3	572.19	196582	15.3	1.30	424
15.4	546.06	187601	15.4	1.18	385
15.5	521.11	179026	15.5	1.07	349
15.6	497.29	170840	15.6	0.97	317
15.7	474.55	163025	15.7	0.88	288
15.8	452.85	155564	15.8	0.80	261
15.9	432.12	148441	15.9	0.73	237
16	412.34	141642	16	0.66	215
16.1	393.45	135152	16.1	0.60	195
16.2	375.42	128957	16.2	0.54	177
16.3	358.21	123043	16.3	0.49	161
16.4	341.79	117399	16.4	0.45	146
16.5	326.11	112011	16.5	0.41	133
16.6	311.14	106869	16.6	0.37	120
16.7	296.86	101960	16.7	0.33	109
16.8	283.22	97276	16.8	0.30	99
16.9	270.21	92805	16.9	0.28	90
17	257.79	88538	17	0.25	82
17.1	245.94	84466	17.1	0.23	74
17.2	234.63	80580	17.2	0.21	67
17.3	223.83	76871	17.3	0.19	61
17.4	213.53	73332	17.4	0.17	55
17.5	203.70	69955	17.5	0.15	50
17.6	194.32	66732	17.6	0.14	46
17.7	185.37	63656	17.7	0.13	41
17.8	176.82	60721	17.8	0.11	38
17.9	168.67	57921	17.9	0.10	34
18	160.89	55249	18	0.09	31
18.1	153.47	52700	18.1	0.09	28
18.2	146.39	50267	18.2	0.08	25
18.3	139.63	47946	18.3	0.07	23
18.4	133.18	45731	18.4	0.06	21
18.5	127.03	43618	18.5	0.06	19
18.6	121.16	41602	18.6	0.05	17
18.7	115.56	39679	18.7	0.05	16
18.8	110.22	37844	18.8	0.04	14
18.9	105.12	36094	18.9	0.04	13

19	100.26	34424	19	0.04	12
19.1	95.62	32830	19.1	0.03	11
19.2	91.20	31310	19.2	0.03	10
19.3	86.97	29860	19.3	0.03	9
19.4	82.95	28477	19.4	0.02	8
19.5	79.10	27158	19.5	0.02	7
19.6	75.44	25899	19.6	0.02	7
19.7	71.94	24698	19.7	0.02	6
19.8	68.61	23553	19.8	0.02	5
19.9	65.43	22461	19.9	0.01	5
20	62.39	21419	20	0.01	4
20.1	59.50	20425	20.1	0.01	4
20.2	56.73	19476	20.2	0.01	4
20.3	54.10	18572	20.3	0.01	3
20.4	51.59	17710	20.4	0.01	3
20.5	49.19	16887	20.5	0.01	3
20.6	46.91	16102	20.6	0.01	2
20.7	44.73	15354	20.7	0.01	2
20.8	42.65	14640	20.8	0.01	2
20.9	40.67	13959	20.9	0.01	2
21	38.78	13310	21	0.01	2
21.1	36.97	12691	21.1	0.00	2
21.2	35.25	12101	21.2	0.00	1
21.3	33.61	11537	21.3	0.00	1
21.4	32.05	11000	21.4	0.00	1
21.5	30.56	10488	21.5	0.00	1
21.6	29.13	10000	21.6	0.00	1
21.7	27.78	9534	21.7	0.00	1
21.8	26.48	9090	21.8	0.00	1
21.9	25.25	8666	21.9	0.00	1
22	24.07	8262	22	0.00	1
22.1	22.95	7877	22.1	0.00	1
22.2	21.88	7510	22.2	0.00	1
22.3	20.86	7159	22.3	0.00	0
22.4	19.89	6825	22.4	0.00	0
22.5	18.96	6507	22.5	0.00	0
22.6	18.07	6203	22.6	0.00	0
22.7	17.23	5914	22.7	0.00	0
22.8	16.43	5638	22.8	0.00	0

22.9	15.66	5374	22.9	0.00	0
23	14.93	5123	23	0.00	0
23.1	14.23	4884	23.1	0.00	0
23.2	13.57	4656	23.2	0.00	0
23.3	12.93	4438	23.3	0.00	0
23.4	12.33	4231	23.4	0.00	0
23.5	11.75	4033	23.5	0.00	0
23.6	11.20	3844	23.6	0.00	0
23.7	10.68	3665	23.7	0.00	0
23.8	10.18	3493	23.8	0.00	0
23.9	9.70	3330	23.9	0.00	0
24	9.25	3174	24	0.00	0
Total		2765650000	Total		4635554155