

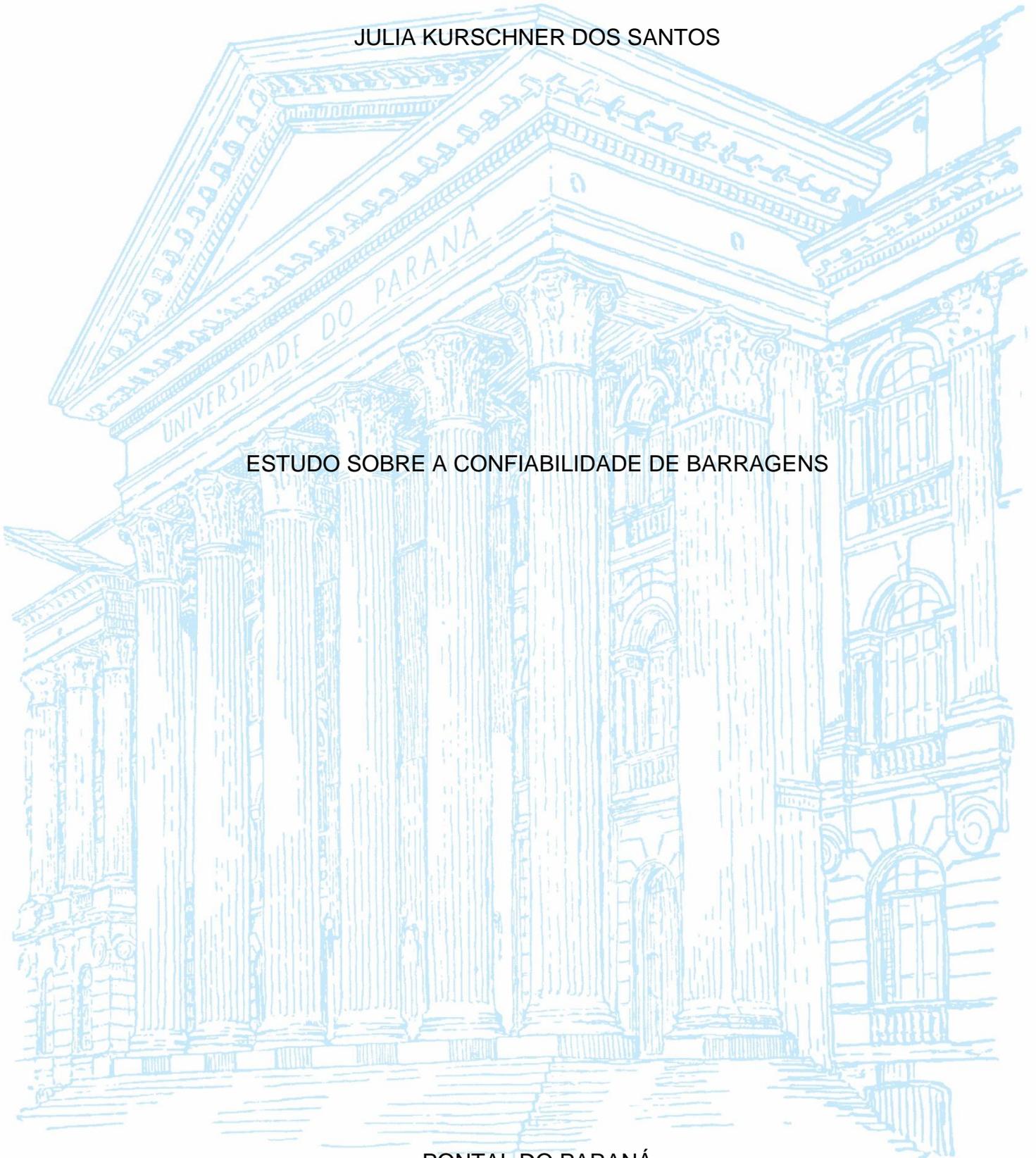
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIA KURSCHNER DOS SANTOS

ESTUDO SOBRE A CONFIABILIDADE DE BARRAGENS

PONTAL DO PARANÁ

2024



JULIA KURSCHNER DOS SANTOS

ESTUDO SOBRE A CONFIABILIDADE DE BARRAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Campus Pontal do Paraná da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz

Pontal do Paraná

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

Santos, Julia Kurschner dos  
S237e Estudo sobre a confiabilidade de barragens / Julia Kurschner dos Santos. – Pontal do  
Paraná, 2024.  
1 arquivo [63 f.] : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do  
Paraná, Centro de Estudos do Mar, Curso de Engenharia Civil.

1. Barragens de concreto. 2. Metodo de Monte Carlo. I. Kroetz, Henrique Machado. II.  
Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD – 627.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

JULIA KURSCHNER DOS SANTOS

**“ESTUDO SOBRE A CONFIABILIDADE DE BARRAGENS”**

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz

Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Carlos Eduardo Rossigali

CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

CPP-CEM/UFPR

Pontal do Paraná, 05 de julho de 2024



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO DE PAULA KIRINUS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/07/2024, às 19:42, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS EDUARDO ROSSIGALI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/07/2024, às 19:47, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **HENRIQUE MACHADO KROETZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2024, às 18:30, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **6799386** e o código CRC **2409B592**.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram a buscar conhecimento e me apoiaram em cada etapa da minha jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço ao orientador, Henrique, por sua orientação e suporte ao longo destes três anos, desde a iniciação científica. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a conclusão deste estudo.

Aos meus colegas e amigos, pelo companheirismo durante todos os momentos de dificuldades e desafios enfrentados ao longo do curso. Vocês tornaram essa jornada muito mais leve. Especialmente a Vitória e Mayara.

À minha família, pelo amor incondicional, compreensão e suporte em todas as etapas da minha vida acadêmica. Agradeço aos meus pais, Alexia Kurschner e Rosnei dos Santos, e à minha irmã, Fernanda Kurschner, por acreditarem em mim e me motivarem a sempre seguir em frente.

Um agradecimento especial a Lukas Ribeiro, por seu apoio constante, paciência e encorajamento. Sua presença foi essencial para que eu pudesse superar os momentos difíceis e continuar avançando.

“Não é o trabalho, e sim o propósito que o torna especial” (YOUNG, 2007,  
p.119)

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a confiabilidade de barragens utilizando diferentes modelos de representação para avaliar seu comportamento sob condições estáticas. São considerados três modelos de barragens, e para isso, a simulação de Monte Carlo é empregada - uma técnica que utiliza números aleatórios para resolver problemas complexos a partir da função de distribuição de probabilidade. Os parâmetros dessas simulações são avaliados a fim de garantir uma representação adequada do estado limite das barragens e sua segurança. A análise foca na comparação das representações obtidas pelos diferentes modelos e na avaliação das tendências de comportamento dos sistemas de barragens em resposta às variações dos parâmetros de entrada.

**Palavras-chave:** barragens, simulação de Monte Carlo, estabilidade estrutural, modelos de barragem, análise probabilística.

## ABSTRACT

The present study aims to analyze the reliability of dams using different representation models to assess their behavior under static conditions. Three dam models are considered, and for this purpose, Monte Carlo simulation is employed, a technique that uses random numbers to solve complex problems based on probability distribution functions. The parameters of these simulations are evaluated to ensure an adequate representation of the limit state of dams and their safety. The analysis focuses on comparing the representations obtained by the different models and evaluating the trends in the behavior of dam systems in response to variations in input parameters.

**Keywords:** dams, Monte Carlo simulation, structural stability, dam models, probabilistic analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subdivisão das barragens de terra de acordo com o material .....	23
Figura 2 - Subdivisão das barragens de enrocamento de acordo com o material.....	24
Figura 3 – Principais tipos de barragens de concreto .....	27
Figura 4 - Flutuação .....	28
Figura 5 - Tombamento .....	30
Figura 6 - Deslizamento .....	31
Figura 7 - Dimensões e forças: Barragem 1 .....	44
Figura 8 - Dimensões e forças: Barragem 2.....	46
Figura 9 - Imagem da barragem analisada com os parâmetros utilizados .....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de barragens .....	22
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de segurança.....	32
Tabela 2 - Fatores de redução e casos de carregamento .....	33
Tabela 3 - Fatores de segurança e casos de carregamento .....	33
Tabela 4 - Valores específicos da barragem.....	35
Tabela 5 - Pesos específicos .....	37
Tabela 6 - Parâmetros de dimensionamento das barragens.....	54
Tabela 7 - Resultados obtidos nas simulações .....	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVOS.....	19
1.3.1	Objetivo geral.....	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	BARRAGENS.....	20
2.1.1	Classificações.....	21
2.1.1.1	<i>Classificações quanto a agregação de materiais.....</i>	<i>22</i>
2.1.1.2	<i>Classificações quanto ao material.....</i>	<i>22</i>
2.1.1.3	<i>Classificações quanto ao fluxo que ela represa.....</i>	<i>24</i>
2.1.1.4	<i>Classificações quanto à submergência.....</i>	<i>25</i>
2.1.2	Barragens de concreto.....	25
2.1.2.1	<i>Definição a partir do ambiente.....</i>	<i>25</i>
2.1.2.2	<i>Métodos de construção.....</i>	<i>25</i>
2.1.2.3	<i>Especificações dos tipos.....</i>	<i>26</i>
2.1.2.4	<i>Modos de falha global.....</i>	<i>27</i>
	2.1.2.4.1 Flutuação.....	27
	2.1.2.4.2 Tombamento.....	29
	2.1.2.4.3 Deslizamento.....	30
2.1.2.5	<i>Condições de carregamento.....</i>	<i>31</i>
2.1.2.6	<i>Dimensões de acordo com a literatura.....</i>	<i>34</i>
2.1.2.7	<i>Parâmetros de acordo com a literatura.....</i>	<i>36</i>
2.2	EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO .....	37
2.3	CONFIABILIDADE .....	38
2.3.1	Probabilidade de falha.....	39
2.3.2	Monte Carlo.....	39
2.3.3	Distribuições De Probabilidade.....	40
2.3.4	Variáveis Aleatórias e Função de Estado Limite.....	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>

3.1	FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE.....	43
3.1.1	Barragem 1 .....	43
3.1.1.1	<i>Caracterizando a função</i> .....	44
3.1.1.2	<i>Equação referência para segurança</i> .....	45
3.1.2	Barragem 2 .....	46
3.1.2.1	<i>Caracterizando a função</i> .....	46
3.1.2.2	<i>Equação referência para segurança</i> .....	48
3.1.3	Barragem 3 .....	48
3.1.3.1	<i>Flutuação</i> .....	49
3.1.3.2	<i>Tombamento</i> .....	50
3.2	DEFINIÇÃO DE VALORES UTILIZADOS.....	52
3.2.1	Parâmetros dos dimensionamentos e materiais, variáveis aleatórias e tipos de distribuições .....	52
3.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO .....	54
3.4	ELABORAÇÃO DO CÓDIGO.....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>60</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	60

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Considerando o Brasil como detentor do maior potencial hídrico do planeta, o desenvolvimento da hidroeletricidade tem se mantido contínuo ao longo dos anos, impulsionando o desenvolvimento de barragens e hidrelétricas. Nesse sentido, é possível afirmar que as barragens são algumas das estruturas mais importantes do país, sendo responsáveis por armazenar água para diversos fins, como geração de energia elétrica e irrigação de cultivos.

Devido à complexidade e grandeza dessas estruturas, torna-se imperativo que sua construção e operação atendam a altos padrões de segurança. Isso requer um enfoque em projetos e simulações antecipadas, visando garantir a segurança contra eventos adversos, como falhas estruturais que poderiam causar sérios danos nos arredores. A confiabilidade é crucial neste processo, uma vez que permite encontrar ótimos desempenhos em problemas relacionados às barragens, utilizando métodos probabilísticos.

Além disso, o uso de métodos que focam na confiabilidade, como a simulação de Monte Carlo, uma técnica de simulação que utiliza números aleatórios para resolver problemas complexos a partir da função de distribuição de probabilidade conjunta do problema, ajuda a avaliar os parâmetros dessas simulações, garantindo uma representação precisa do estado limite da barragem e sua segurança.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante dos recentes rompimentos de barragens no Brasil, que resultaram em graves consequências ambientais, sociais e econômicas, e considerando que os cálculos normalmente são realizados com base em métodos determinísticos, se torna interessante explorar a aplicação de métodos probabilísticos na análise da confiabilidade das barragens. Esses métodos podem fornecer uma compreensão mais abrangente e precisa das condições de segurança das barragens, contribuindo para a prevenção de futuros desastres e para a verificação dos possíveis riscos.

### 1.3 OBJETIVOS

Após contextualizar o problema, são estabelecidos os objetivos gerais e específicos.

#### 1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar e compreender a aplicação da confiabilidade em barragens, utilizando o método de Monte Carlo. Para tal, serão utilizados diversos modelos de representação com o intuito de avaliar o comportamento das barragens sob condições estáticas.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Apresentar os conteúdos teóricos e práticos relacionados com o tema de estudo;
- Descrever três diferentes modelos de barragens com diferentes complexidades e determinar modelo matemático da equação de estado limite;
- Avaliar, determinar e classificar os parâmetros de entrada dos modelos de barragens;
- Identificar o tipo de distribuição de probabilidade utilizado nos modelos;
- Aplicar o método de Monte Carlo;
- Analisar a probabilidade de falha e o coeficiente de variação para cada modelo de barragem;
- Realizar uma análise abrangente de todas as barragens estudadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se descrições sobre a definição de barragem, suas funções, tipos de estruturas e os aspectos proeminentes na fase de seleção dessas estruturas. Além disso, são detalhados os componentes e elementos de cada tipo de barragem, destacando suas características e os critérios utilizados para o dimensionamento. Também são abordados, conteúdos relacionados à análise numérica, estatística, utilização de equações de equilíbrio, equações de projeto determinadas por normas, distribuição de probabilidade e simulação de Monte Carlo para a obtenção da confiabilidade da estrutura.

### 2.1 BARRAGENS

Barragens são estruturas construídas com o objetivo de retenção permanente ou temporária de líquidos ou misturas de líquidos e sólidos, sendo que a sua finalidade pode variar dependendo da localização e da utilização pretendida. Como cita Setti *et al.* (2000), as barragens são usadas para uma série de propósitos, incluindo a geração de energia elétrica, irrigação de culturas agrícolas, fornecimento de água potável, controle de enchentes e preservação ambiental.

A construção dessas estruturas evoluiu consideravelmente em dimensão e propósito. Durante a história, as barragens apresentaram uma evolução notável em relação aos materiais e técnicas construtivas utilizadas. Segundo Romanescu *et al.* (2014), a história da construção de barragens e reservatórios inicia há milhares de anos, quando os antigos egípcios construíram barragens para controlar as cheias do Nilo. Durante a Idade Média, as barragens foram usadas principalmente para fornecer água para moinhos, mas foi somente no século XIX que a construção de barragens começou a evoluir significativamente, com o advento da indústria e a necessidade crescente de energia elétrica. No século XX, as barragens alcançaram um novo patamar com projetos monumentais, como a barragem de Aswan no Egito, construída para controlar as cheias do Nilo e fornecer água para irrigação, e a barragem de Glen Canyon nos Estados Unidos, voltada para a geração de energia elétrica e fornecimento de água para a região de Arizona e Novo México. No Brasil, a história da construção de barragens hidrelétricas está intimamente ligada ao desenvolvimento

econômico do país, desde a construção da Usina Hidrelétrica de Furnas na década de 1930 até projetos mais recentes como a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, destacando sua importância para as transformações sociais, econômicas e tecnológicas.

O aumento progressivo nas dimensões e complexidade das barragens tem trazido consigo novos desafios e preocupações relacionados à segurança. Faz-se necessário realizar uma avaliação minuciosa da segurança das barragens antes de sua construção e ao longo de sua vida útil, visando, garantir que a estrutura seja capaz de resistir a eventos extremos, tais como a elevação do nível da água, terremotos e deslizamentos de terra. Segundo a Seção II do Plano de Segurança da Barragem, prevista na Lei nº 14.066/2020, é necessário realizar a "Identificação e avaliação dos riscos, com definição das hipóteses e dos cenários possíveis de acidente ou desastre" (Lei nº 14.066/2020, Art. 8º - X).

As normas brasileiras para barragens são estabelecidas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e pela Agência Nacional de Águas (ANA). Essas normas incluem requisitos técnicos para o projeto, construção, operação e manutenção de barragens, além de procedimentos para a avaliação da segurança dessas estruturas (ANA, 2024). Também, a compilação de regras e situações pode ser encontrada no "Manual de Critérios de Projetos Cíveis de Usinas Hidrelétricas", publicado pela SA-ELETROBRÁS (2003).

Ainda segundo, Romanescu *et al.* (2014), a construção de barragens continua a ser uma atividade importante e relevante na atualidade, com a utilização de tecnologias avançadas para garantir a segurança e eficiência dessas estruturas.

### 2.1.1 Classificações

A seleção do tipo de barragem é um processo complexo e crítico para o desenvolvimento de projetos, envolvendo uma análise de diversos critérios técnicos, ambientais, econômicos e sociais. Dessa forma, fatores como topografia local, geologia, hidrologia e condições socioeconômicas influenciam significativamente essa escolha. A variedade de tipos de barragens disponíveis requer uma análise criteriosa das características de cada alternativa, levando em conta as demandas específicas do local e os objetivos do empreendimento.

### 2.1.1.1 Classificações quanto a agregação de materiais

Conforme Possan (2015), as barragens podem ser categorizadas como estruturas rígidas e não rígidas. As barragens de concreto são exemplos de estruturas rígidas, enquanto as barragens de aterro são classificadas como não rígidas, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de barragens

<b>Rigidez</b>	<b>Material de construção</b>	<b>Forma</b>
Rígida	Concreto	Gravidade
		Gravidade aliviada
		Arco
		Arco gravidade
		Contraforte
Não Rígida	Terra	-
	Terra e enrocamento	
	Enrocamento com face de concreto	

Fonte: Possan (2015).

### 2.1.1.2 Classificações quanto ao material

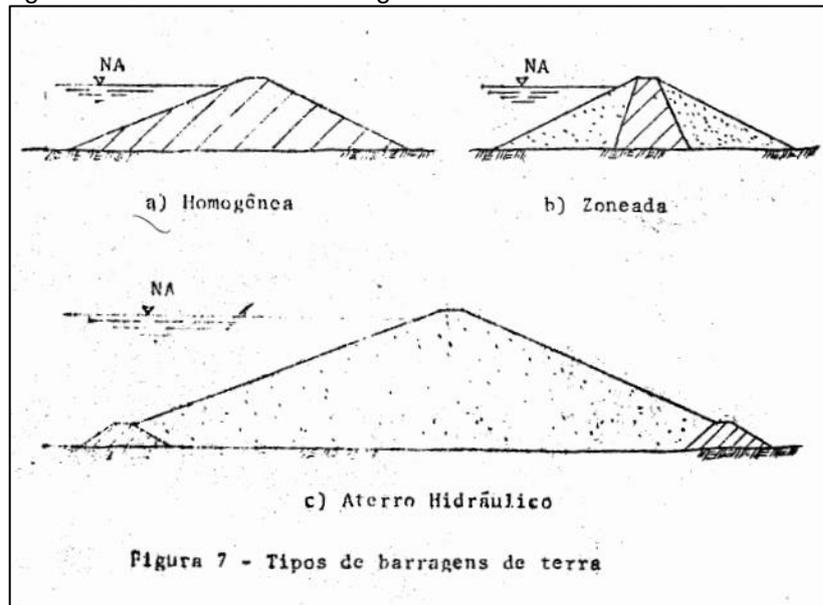
A seleção do material para a construção de barragens é influenciada pela disponibilidade de material na região e pela localização das áreas de empréstimo. Costa (2016) relata que as barragens convencionais podem ser classificadas com base nos materiais empregados em sua construção. Entre as variedades mais frequentes, mencionam-se as barragens de concreto, terra, enrocamento e mistas.

As barragens de concreto são constituídas de materiais granulares e acréscimos de aditivos químicos. Essas estruturas podem ser subdivididas de acordo com a sua forma, em barragens de gravidade, gravidade aliviada, contraforte, arco e arco a gravidade (MARANGON, 2004).

As barragens de terra são estruturas que utilizam recursos locais disponíveis na área de construção. Essas estruturas podem ser categorizadas, de acordo com a Figura 1, como: barragens de terra homogênea, quando construídas com um único

tipo de material, barragens de terra zonada, quando empregam mais de um tipo de material, geralmente, com a inserção de um material diferente no núcleo da estrutura, e aterro hidráulico (GAIOTO, 1982).

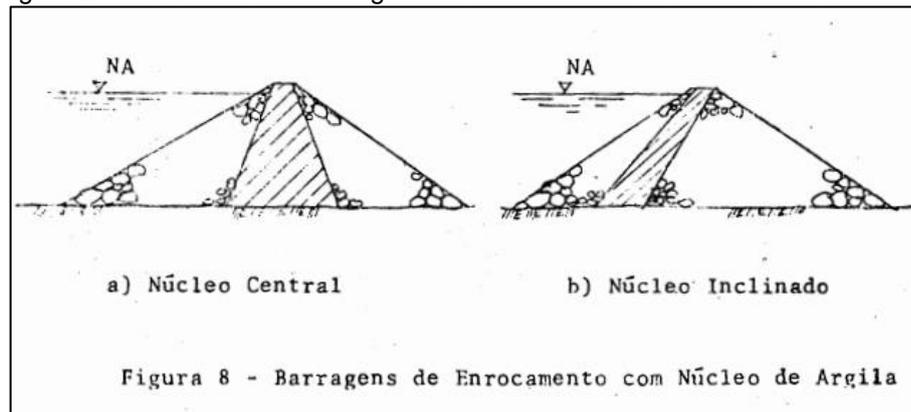
Figura 1 - Subdivisão das barragens de terra de acordo com o material



Fonte: Gaioto (1982).

As barragens de enrocamento são estruturas predominantemente compostas por uma proporção significativa de grandes pedras e rochas, sendo especialmente adequadas para locais onde esses materiais são abundantes (ENGEMINAS, 2021). A diferenciação e classificação dessas barragens se dão pela presença de materiais distintos e de menor permeabilidade, geralmente encontrados no núcleo ou na face da estrutura. Costa (2016) propõe uma classificação dessas barragens com base na natureza do material e na permeabilidade, podendo incluir categorias como enrocamento com núcleo central, núcleo inclinado, com face de concreto e com chapa de aço. Por outro lado, Gaioto (1982) classifica com núcleo central e núcleo inclinado. Essa subdivisão pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2 - Subdivisão das barragens de enrocamento de acordo com o material



Fonte: Gaioto (1982)

### 2.1.1.3 Classificações quanto ao fluxo que ela represa

Conforme descrito por Da Silva *et al.* (2007), as barragens podem ser rapidamente classificadas com base no tipo de fluxo que contêm, sendo distinguidas entre barragens de fluxo superficial e subterrâneo. As barragens de fluxo superficial retêm a água acima do relevo do terreno, formando reservatórios que são visíveis na superfície. Essas estruturas são amplamente utilizadas para o armazenamento de água para diversos fins, incluindo abastecimento urbano, irrigação e geração de energia hidrelétrica. Elas são projetadas para captar e armazenar as águas provenientes de rios e chuvas, garantindo um suprimento constante mesmo em períodos de seca. As barragens superficiais desempenham um papel crucial na gestão de recursos hídricos, particularmente em regiões com variações sazonais significativas na precipitação.

Por outro lado, as barragens subterrâneas, também detalhadas por Da Silva *et al.* (2007), bloqueiam o fluxo no subsolo de um curso d'água. Constituídas por uma parede impermeável, elas armazenam água da chuva no solo, visando à exploração agrícola e à subirrigação. Essas barragens são eficazes em regiões semiáridas, ajudando a manter o solo úmido por mais tempo e reduzindo as perdas por evaporação. Além disso, contribuem para a recarga dos aquíferos e a conservação de água durante períodos de seca.

#### 2.1.1.4 *Classificações quanto à submergência*

Costa (2016) cita que as barragens classificadas como submersíveis ou galgáveis são aquelas que permitem a passagem controlada de água sobre sua crista, que é o ponto mais elevado da estrutura, direcionando o fluxo da montante para a jusante por meio de transbordamento. Em contrapartida, as barragens classificadas como não submersíveis não possuem essa capacidade, o que as torna suscetíveis a rupturas em caso de transbordamento.

#### 2.1.2 Barragens de concreto

##### 2.1.2.1 *Definição a partir do ambiente*

Segundo Possan (2015), a construção de barragens de concreto é frequentemente induzida por um ambiente que demanda infraestrutura para controle e uso de recursos hídricos. Esse contexto pode ser marcado por necessidades de abastecimento de água, geração de energia elétrica ou controle de enchentes, impulsionando a implementação dessas estruturas. A escolha pelo concreto como material de construção é justificada pela sua durabilidade, resistência e versatilidade.

##### 2.1.2.2 *Métodos de construção*

A construção de barragens de concreto de gravidade segue um processo rigoroso e estruturado, composto por diversas etapas bem definidas. Inicialmente, ocorre a preparação do terreno, que inclui a retirada da camada superficial do solo, a compactação para a formação da base da barragem e escavações para a instalação dos equipamentos hidromecânicos. Segue-se então a realização da fundação com a execução de uma camada de concreto para servir como base do maciço da barragem. A execução do maciço é realizada em camadas, utilizando formas e armaduras de aço, com o concreto lançado e compactado, enquanto são realizados ensaios de resistência para verificar a conformidade com os requisitos da estrutura. Durante todo o processo, é crucial controlar a temperatura do concreto para evitar fissuras. Para assegurar a estabilidade, todas as etapas seguem normas técnicas e de segurança

rigorosas, incluindo a instalação dos equipamentos hidromecânicos para o controle do fluxo de água após a conclusão do maciço (DE AMORIM COELHO *et al.* 2016).

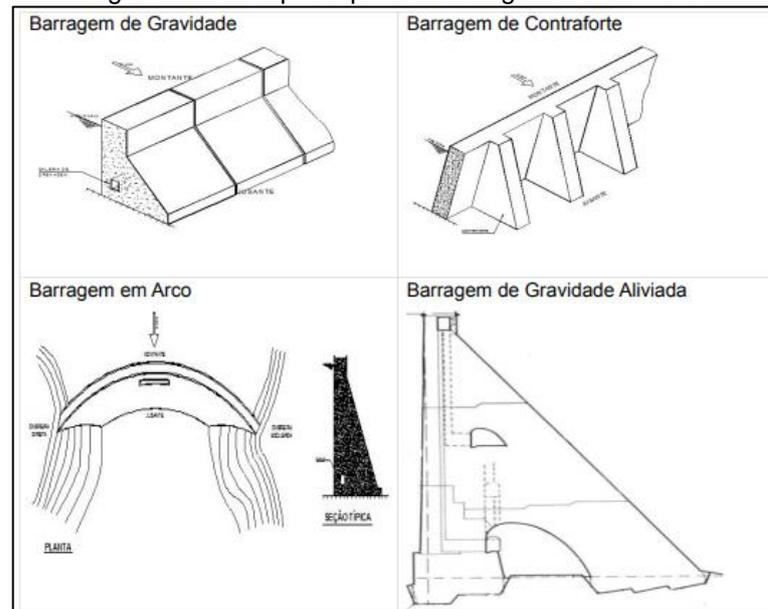
### 2.1.2.3 *Especificações dos tipos*

Possan (2015) descreve uma barragem de gravidade como uma estrutura de concreto maciço, composta por vários blocos separados por juntas de contração para aliviar os efeitos das tensões térmicas. Essas barragens possuem uma forma quase trapezoidal e são projetadas para resistir às pressões hidrostáticas e outras solicitações. A resultante das forças é transmitida ao solo do leito do rio através da base da barragem, enquanto sua segurança global é garantida por condições de estabilidade em relação ao tombamento, deslizamento e flutuação.

Ainda conforme a autora, a barragem em arco é uma estrutura de concreto massa ou armado curvada para montante na direção do reservatório. Essa configuração é particularmente adequada para vales estreitos onde há um suporte sólido do arco no maciço rochoso das ombreiras. A geometria em arco aproveita a capacidade das estruturas de resistir eficientemente a cargas uniformemente distribuídas sobre sua superfície. Em barragens desse tipo, os esforços provenientes da pressão da água do reservatório são predominantemente transferidos para as margens ou ombreiras, com uma menor parcela direcionada para o fundo do rio.

Além disso, segundo Schreiber (1977), as barragens de contraforte são estruturas em forma de pilares que suportam o empuxo do paramento de montante, transferindo essa carga para as fundações. A vedação é composta por lajes de concreto armado apoiadas nesses contraforte ou por abóbadas cilíndricas, frequentemente em forma de semicírculo. A Figura 3, ilustra esse tipo de estrutura.

Figura 3 – Principais tipos de barragens de concreto



Fonte: VIEIRA JUNIOR e SALLES (2011).

#### 2.1.2.4 Modos de falha global

De acordo com SA-ELETROBRÁS (2003), deve ser dada especial atenção às verificações correspondentes ao estado limite último de perda de equilíbrio global ou parcial das estruturas, admitidas como corpo rígido, conforme as análises de estabilidade em projetos de barragens. Estas análises visam avaliar a segurança global contra movimentos de corpo rígido, tais como deslizamento em qualquer plano, tombamento, flutuação; tensões na base da fundação e na estrutura, estabilidade elástica (flambagem), deformações e recalques, e vibrações.

##### 2.1.2.4.1 Flutuação

A flutuação em uma estrutura pode ocorrer quando as forças externas verticais são maiores em comparação com a força da estrutura tentando mantê-la no chão, ou seja, quando há um desequilíbrio entre essas forças. No momento, não sendo necessário abordar coesão ou o atrito entre a estrutura e a fundação (SA-ELETROBRÁS, 2003).

O fator de segurança contra flutuação pode ser calculado pela Equação 1:

$$FSF = \frac{\sum V}{\sum U} \quad (1)$$

Onde:

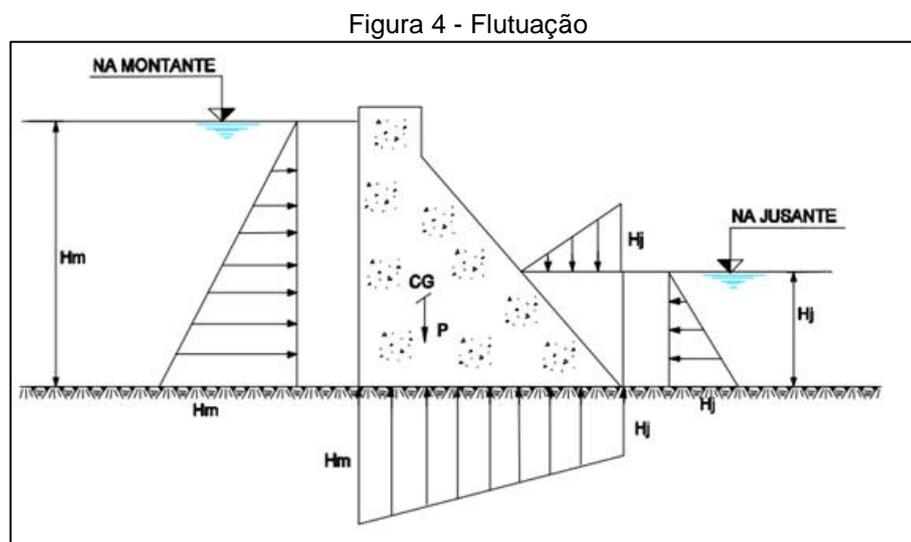
$FSF$  = Fator de segurança à flutuação;

$\sum V$  = Somatório das forças gravitacionais;

$\sum U$  = Somatório das forças de subpressão.

As forças gravitacionais abrangem as cargas permanentes mínimas, as quais incluem o peso próprio da estrutura, determinado pelo peso específico do material utilizado, e outras cargas diversas, como o peso de elementos construtivos fixos, conforme tabelado pela ABNT NBR 6120:2019 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Ações variáveis devem ser ignoradas. Neste contexto, será considerado apenas o peso próprio da estrutura.

A subpressão atua sobre toda a área base da estrutura. Na extremidade de montante, essa subpressão é igual à altura hidrostática montante ( $H_m$ ), enquanto na extremidade de jusante, é equivalente à altura hidrostática de jusante ( $H_j$ ), a partir dos níveis d'água especificados para ambos. A Figura 4 demonstra essas distribuições.



Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

#### 2.1.2.4.2 Tombamento

SA-ELETROBRÁS (2003) explica que o tombamento em uma estrutura pode ocorrer quando as forças externas verticais e horizontais são maiores em comparação com a força da estrutura tentando mantê-la no chão, resultando em um desequilíbrio entre essas forças. Para avaliar o tombamento, são considerados os momentos de estabilidade e de tombamento, levando em conta um ponto ou linha efetiva de rotação, que é o local mais provável de ocorrer a rotação, determinado com base na geometria e nas condições de carregamento da estrutura. No entanto, não sendo necessário abordar coesão ou o atrito entre a estrutura e a fundação.

O fator de segurança contra tombamento pode ser calculado pela Equação 2:

$$FST = \frac{\sum M_e}{\sum M_t} \quad (2)$$

Onde:

$FST$  = Fator de segurança ao tombamento;

$\sum M_e$  = Somatório dos momentos estabilizantes atuantes sobre a estrutura;

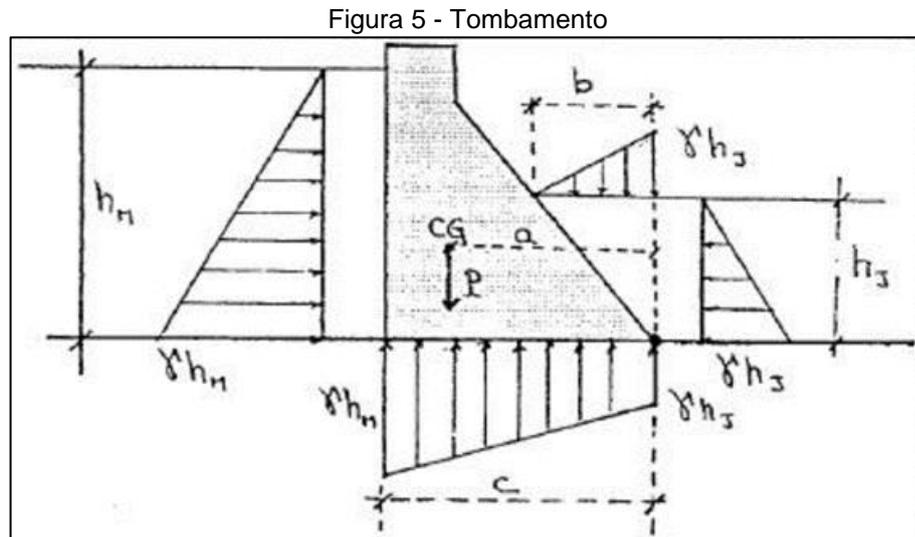
$\sum M_t$  = Somatório dos momentos de tombamento, devido a atuação de cargas desestabilizantes.

O somatório dos momentos estabilizantes que atuam sobre a estrutura abrange as cargas permanentes mínimas, as quais incluem o peso próprio da estrutura, determinado pelo peso específico do material utilizado, e outras cargas diversas, como o peso de elementos construtivos fixos, conforme tabelado pela NBR 6120:2019. Ações acidentais devem ser ignoradas. Neste contexto, será considerado apenas o peso próprio da estrutura.

O somatório dos momentos desestabilizantes que atuam sobre a estrutura inclui diversos fatores. Primeiramente, a pressão hidrostática advinda do contato direto lateralmente com a água, a qual atua sobre as paredes laterais da estrutura. Além disso, a subpressão é um aspecto importante, agindo sobre toda a área da base da estrutura. Na extremidade de jusante, essa subpressão corresponde à altura hidrostática de jusante ( $H_j$ ), enquanto na extremidade de montante, equivale à altura

hidrostática montante (Hm), ambos a partir dos níveis d'água especificados para os respectivos pontos. Por fim, os empuxos de terra também devem ser considerados na avaliação dos momentos desestabilizantes que podem influenciar no tombamento da estrutura.

Considera-se o ponto de verificação ao tombamento na extremidade inferior da jusante, sendo o ponto mais crítico da barragem. A Figura 5 ilustra esse ponto de verificação, pesos e devida distribuição de carregamentos.



Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

#### 2.1.2.4.3 Deslizamento

De acordo com SA-ELETROBRÁS (2003), assim como os outros tipos de falhas globais, o deslizamento também aborda a relação entre as forças resistentes e as forças atuantes sobre a estrutura. No entanto, no caso do deslizamento, há uma variedade maior de parâmetros que devem ser analisados. Isso ocorre porque o deslizamento envolve o movimento lateral de uma parte da estrutura em relação à outra, geralmente ao longo de uma superfície de falha. A Figura 6 ilustra.

O fator de segurança contra deslizamento pode ser calculado pela Equação 3:

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i t g(\phi_i)}{FSD_\phi} + \frac{\sum C_i A_i}{FSD_c}}{\sum T_i} \geq 1,0 \quad (3)$$

Onde:

$FSD$  = Fator de segurança ao deslizamento;

$FSD\phi$  = Fator de redução da resistência ao atrito;

$FSDc$  = Fator de redução da resistência à coesão;

$SNi$  = Somatório das forças normais à superfície de deslizamento, em análise;

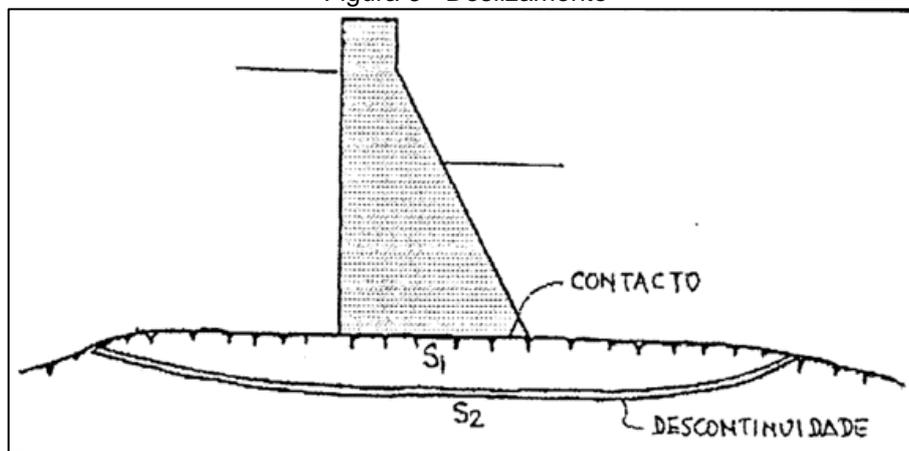
$\phi i$  = Ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento, em análise;

$Ci$  = Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento;

$Ai$  = Área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise;

$STi$  = Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

Figura 6 - Deslizamento



Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

#### 2.1.2.5 Condições de carregamento

O conceito de condição de carregamento, conforme definido pela SA-ELETROBRÁS (2003), é fundamental na análise estrutural para considerar diferentes cenários de carga ao longo da vida útil de uma estrutura. As condições de carregamento normal, excepcional, limite e de construção devem ser consideradas nos estudos de estabilidade global e nos cálculos dos esforços internos.

A condição de carregamento normal (CCN) engloba todas as combinações de ações que têm alta probabilidade de ocorrer durante a operação regular ou manutenção de rotina da estrutura, em condições hidrológicas normais.

Enquanto isso, a condição de carregamento excepcional (CCE) representa situações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, geralmente envolvendo apenas uma ação excepcional, como condições hidrológicas extremas, falhas no sistema de drenagem, efeitos sísmicos, entre outros, combinados com as ações normais.

A condição de carregamento limite (CCL) refere-se a situações com probabilidade muito baixa de ocorrência, envolvendo mais de uma ação excepcional, como condições hidrológicas extremas, falhas no sistema de drenagem, efeitos sísmicos, entre outros, combinados com as ações normais.

Por fim, a condição de carregamento de construção (CCC) abrange todas as combinações de ações que podem ocorrer durante a execução da obra, como cargas de equipamentos de construção, estruturas parcialmente construídas e carregamentos anormais durante o transporte de equipamentos permanentes. Essas condições ocorrem durante períodos curtos em relação à vida útil da estrutura.

Portanto, SA-ELETROBRÁS (2003) também destaca a necessidade de levar em conta coeficientes de segurança específicos para o dimensionamento de barragens de concreto, os quais variam conforme cada condição de carregamento, conforme exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de segurança

CASO DE CARREGAMENTO	TIPO DE ESTRUTURA	VERIFICAÇÃO	COEFICIENTES		
			$\gamma_f$	$\gamma_c$	$\gamma_s$
CCN	a) Estrutura de concreto massa	Ausência de Armadura	2,0	-	-
		Necessidade de Armadura	1,4	1,4	1,15
	b) Estrutura de concreto armado ou protendido	Estado Limite Último	1,4	1,4	1,15
		Estado de Utilização	1,00	1,00	1,00
CCC, CCE, CCL	a) Estrutura de concreto massa	Ausência de Armadura	1,6	1,4	-
		Necessidade de Armadura	1,1	1,4	1,15
	b) Estrutura de concreto armado ou protendido	Estado Limite Último	1,1	1,4	1,15

Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

As estruturas requerem um grau de estabilidade mínimo, e, para isso, SA-ELETROBRÁS (2003) traz a definição a partir dos coeficientes de segurança e das tensões admissíveis.

É essencial considerar os fatores de redução da resistência do atrito e da coesão, analisando as respectivas condições de carregamento. Quando o conhecimento sobre os materiais ou suas resistências for limitado, ou se os materiais apresentarem um comportamento inconsistente, é recomendável adotar valores usados nas análises para garantir a segurança, utilizando os valores tabelados entre parênteses. Isso é evidenciado pelas informações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de redução e casos de carregamento

FATORES DE REDUÇÃO	CASOS DE CARREGAMENTOS			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSD <sub>c</sub>	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
FSD <sub>ø</sub>	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)

Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

Além disso, os fatores de segurança ao tombamento e à flutuação são cruciais para garantir a estabilidade e segurança das estruturas. Estes são elucidados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fatores de segurança e casos de carregamento

COEFICIENTE DE SEGURANÇA	CASOS DE CARREGAMENTOS			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FLUTUAÇÃO - FSF	1,3	1,1	1,1	1,2
TOMBAMENTO - FST	1,5	1,2	1,1	1,3

Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

Além disso, quando se fala de esforços externos e condições de carregamento, é de extrema importância considerar o pior dos casos para a realização de cálculos e verificações, incluindo a consideração de cargas variáveis em termos de sua intensidade e direção, sob a perspectiva mais desfavorável. As ações variáveis, uniformemente distribuídas ou concentradas, são integradas na combinação mais desvantajosa, levando em conta não apenas sua intensidade, mas também sua localização, direção e sentido.

Adicionalmente, são destacadas as combinações mais desfavoráveis do nível d'água no lado montante e jusante das estruturas, juntamente com os respectivos diagramas de subpressão. As peças e elementos estruturais localizados na região da fundação e no interior das estruturas são analisados tanto com quanto sem a presença

de subpressão. A consideração dos empuxos de terra nas estruturas é realizada levando em consideração a eventual existência de lençol freático.

A subpressão refere-se à pressão exercida pela água que está presente nos espaços entre as partículas do solo, influenciando diretamente a estabilidade de estruturas como barragens, fundações e taludes. A subpressão afeta a resistência do solo, podendo reduzir a capacidade de suporte e aumentar o risco de liquefação em solos saturados.

Os esforços provenientes das ondas podem ser negligenciados nos estudos de estruturas de grande porte, porém são incorporados no dimensionamento de estruturas menores, como comportas, para garantir uma abordagem abrangente. Por fim, para barragens de contraforte, gravidade aliviada e em arco, é recomendada a consideração dos efeitos térmicos sobre as estruturas, a fim de assegurar uma análise completa das influências ambientais sobre o comportamento estrutural.

#### 2.1.2.6 *Dimensões de acordo com a literatura*

A importância dos valores de dimensionamento escolhidos para barragens é fundamental para o projeto e a operação segura dessas estruturas, a determinação dessas medidas é crucial para a gestão de recursos hídricos e para a prevenção de desastres naturais.

De acordo com as diretrizes da SA-ELETROBRÁS (2003), as alturas do reservatório em barragens são classificadas em três níveis distintos: o nível máximo normal, o nível mínimo normal e o nível de máxima enchente, este último também conhecido como nível máximo maximorum. O nível máximo normal é determinado por meio de estudos energéticos, levando em consideração uma variedade de fatores ambientais relevantes. Da mesma forma, o nível mínimo normal é estabelecido através de análises energéticas, considerando também os condicionantes ambientais pertinentes.

Quanto ao nível de máxima enchente, este é resultado da projeção da cheia projetada da barragem, onde as comportas são operadas para manter constante o nível do reservatório até que a vazão afluente atinja a capacidade máxima do vertedouro, com o reservatório no nível máximo normal. A partir desse ponto, a laminação da cheia ocorre de forma automática, sem considerar o efeito do vento.

No que diz respeito à borda livre da barragem, é importante entender que ela engloba diversos conceitos, incluindo a borda livre normal e a borda livre mínima. A borda livre normal é estabelecida de acordo com as características estruturais do tipo de barragem e é destinada a absorver o efeito das ondas geradas pelo vento. Por outro lado, a borda livre mínima refere-se ao menor espaço necessário para garantir a segurança da estrutura da barragem. Essa dimensão varia conforme o tipo de barragem, e em barragens de concreto, a borda livre mínima deve ser de 0,5 metros acima do nível de máxima enchente do reservatório (SA-ELETROBRÁS, 2003)

SA-ELETROBRÁS (2003) também apresenta definições relacionadas aos conceitos de jusante. Os níveis de água a jusante são estabelecidos com base na curva-chave específica determinada para o local em questão. O nível mínimo no canal de fuga é determinado com base na vazão sanitária ou na vazão de engolimento nominal de uma máquina.

Além das restrições que auxiliam no dimensionamento da barragem, estudos de caso em barragens reais são fundamentais para a coleta de dados previamente analisados. Nesse contexto, Pires *et al.* (2019) apresentam um estudo detalhado sobre uma barragem específica, explorando valores reais de características de barragens, como altura máxima, largura na crista, materiais de construção e outras características relevantes. Esses dados incluem informações sobre a altura da água a montante e a jusante, as dimensões da barragem (altura, comprimento e largura), bem como detalhes sobre sua construção, como o espaçamento das juntas de contração e as características do paramento de montante e de jusante. Tais informações podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores específicos da barragem

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDADE
Altura da barragem	72,5	metros (m)
Largura da crista	7,5	metros (m)
Largura barragem	20	metros (m)
Comprimento da barragem	54,87	metros (m)
Paramento de montante	70-71,5	metros (m)
Paramento de jusante	0,96-8,66	metros (m)

Fonte: Pires *et al.* (2019).

### 2.1.2.7 *Parâmetros de acordo com a literatura*

Para a definição e dimensionamento de uma barragem, é essencial considerar não apenas os valores que determinam suas dimensões, mas também os parâmetros que influenciam os cálculos, como o peso específico dos materiais. A importância de valores específicos e a escolha adequada desses parâmetros são fundamentais para garantir a estabilidade e a durabilidade das barragens. Diversas obras abordam esses fatores, com destaque para os trabalhos de Baptista e Lara (2010), Westberg (2010) e as diretrizes da SA-ELETROBRÁS (2003).

Baptista e Lara (2010) enfatizam que a resistência das barragens de concreto é proporcionada pela gravidade, contrabalançada pela pressão hidrostática da água na base da barragem, diretamente relacionada à massa específica da água, que é aproximadamente  $1000 \text{ kg/m}^3$ . A massa específica do concreto, variando entre  $2400$  e  $2800 \text{ kg/m}^3$ , desempenha um papel crucial na estabilidade da estrutura. Eles destacam que a qualidade dos agregados, a densidade do concreto e sua resistência à compressão são fatores fundamentais para garantir a estabilidade e a longevidade da barragem.

A geometria da barragem é planejada para distribuir uniformemente o peso sobre a fundação rochosa, assegurando sua estabilidade, conforme discutido por Westberg (2010). Ele também destaca a importância do uso de concreto de alta resistência à compressão na construção de barragens, essencial para suportar o peso da água represada sem deformações significativas. Além disso, aditivos são comumente empregados para melhorar a trabalhabilidade e durabilidade do concreto.

As diretrizes da SA-ELETROBRÁS (2003), estabelecem valores para o peso específico do concreto armado convencional ( $\gamma_c$ ), conforme indicado na Tabela 5. E cita que na falta de determinação experimental, os critérios e valores estabelecidos pela NBR 6120:2019 devem ser utilizados.

Tabela 5 - Pesos específicos

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (kN/m <sup>3</sup> )
CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL	25
CONCRETO MASSA - CCR e concreto simples	21 a 26 (depende do tipo de agregados)
AÇO	78,5
MADEIRA	5 a 10
ÁGUA	10

Fonte: SA-ELETROBRÁS (2003).

## 2.2 EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

As equações de equilíbrio são fundamentais na análise estática de estruturas e sistemas mecânicos. Segundo Beer (2019), essas equações são baseadas no princípio de que um corpo em equilíbrio estático deve satisfazer duas condições: a soma das forças atuando sobre ele deve ser igual a zero e a soma dos momentos em relação a qualquer ponto deve ser igual a zero.

A primeira equação de equilíbrio, conhecida como equação de equilíbrio translacional, pode ser escrita como a soma vetorial das forças atuando sobre um corpo. De acordo com Beer (2019), essa equação é expressa da seguinte forma:  $\Sigma F = 0$ , onde  $\Sigma F$  é a soma das forças e o resultado deve ser igual a zero para que o corpo esteja em equilíbrio translacional.

A segunda equação de equilíbrio, conhecida como equação de equilíbrio rotacional, pode ser escrita como a soma vetorial dos momentos das forças atuando sobre um corpo em relação a um ponto. Segundo o autor, essa equação é expressa como  $\Sigma M = 0$ , onde  $\Sigma M$  é a soma dos momentos e o resultado também deve ser igual a zero para que o corpo esteja em equilíbrio rotacional.

Considerando estruturas bidimensionais, as equações de equilíbrio podem ser escritas a partir das equações escalares. Sendo, somatório de forças verticais (Equação 5), somatório de forças horizontais (Equação 4) e somatório dos momentos fletores (Equação 6), e o momento de uma força pode ser representado pela Equação 7.

$$\sum F_x = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (5)$$

$$\sum M = 0 \quad (6)$$

$$M = r \times F \quad (7)$$

Onde,  $r$  é o vetor que indica a distância entre a força e o local que momento foi aplicado, e  $F$  é a força aplicada.

### 2.3 CONFIABILIDADE

A confiabilidade se refere à capacidade de uma estrutura resistir a falhas e desempenhar adequadamente sua função ao longo de sua vida útil. Carvajalino (2010) menciona que a confiabilidade está relacionada à probabilidade de a resistência da estrutura superar as cargas aplicadas durante seu período de operação. O autor enfatiza que a confiabilidade é essencial para avaliar a probabilidade de falha estrutural devido às incertezas tanto na resistência da estrutura quanto nas cargas aplicadas. Isso permite medir a probabilidade de a resistência da estrutura ser maior do que o efeito das cargas ao longo do tempo, garantindo que a estrutura permaneça segura e funcional durante toda a sua vida útil.

Os métodos de projeto estrutural podem ser classificados em cinco níveis, com base na quantidade de informações disponíveis sobre o problema estrutural:

- Nível 1: Métodos determinísticos, que não consideram incertezas.
- Nível 2: Métodos que consideram a variabilidade nas propriedades do material.
- Nível 3: Métodos que incorporam a variabilidade de carga.
- Nível 4: Métodos que consideram incertezas de modelagem.
- Nível 5: Métodos probabilísticos, que contabilizam incertezas de resistência e carregamento.

Nesse contexto, o cálculo da probabilidade de falha torna-se viável e um dos métodos que podem ser utilizados é o método de Monte Carlo. Este método pode ser utilizado para a análise de confiabilidade e, conseqüentemente, está relacionado com conceitos como métodos estatísticos, probabilidade, distribuição, média e variável

aleatória. As variáveis aleatórias representam os possíveis resultados, sendo fundamentais na teoria da probabilidade e estatística. As distribuições descrevem como as probabilidades são alocadas entre os valores possíveis de uma variável aleatória, facilitando a compreensão da incerteza na análise de dados

### 2.3.1 Probabilidade de falha

Carvajalino (2010) afirma que o cálculo da Probabilidade de Falha (POF) baseia-se na função de desempenho do sistema, conhecida como função de estado limite ou de falha. Assim, a POF é expressa pela Equação 8, considerando as incertezas das propriedades dos materiais e das cargas aplicadas. Para isso, podem ser utilizados métodos como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), o Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (SORM), o Novo Algoritmo FORM de Low e Tang (FORM-LT) e a Simulação de Monte Carlo.

$$POF = P(g(x) \leq 0) \quad (8)$$

### 2.3.2 Monte Carlo

Segundo Gentle (2009), o método de Monte Carlo é inteiramente probabilístico e envolve o uso de valores aleatórios para estimar valores de uma função descrita por uma distribuição de probabilidade. Pode ser usado para problemas de otimização e de integração, onde este último envolve a transformação de um problema de integração em um cálculo médio por meio de simulação.

O método de Monte Carlo pode ser subdividido em simulação e integração de Monte Carlo. As etapas para a simulação incluem decompor a função de interesse para incluir uma função de densidade de probabilidade, identificar o valor esperado da função, utilizar uma amostra aleatória da distribuição de probabilidade para estimar o valor esperado, transformar o problema de integração em um cálculo de média por meio de simulação, e certificar-se de que a variância do estimador com base na amostragem de importância seja pequena para garantir a precisão dos resultados (Gentle, 2009)

Beck (2014) se refere ao método como método de simulação de Monte Carlo, sendo uma técnica de simulação que utiliza números aleatórios para resolver problemas complexos. Explica também que o valor esperado da probabilidade de falha pode ser estimado com base em uma amostra de tamanho finito, como demonstrado na Equação 9:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{n_{si}} \sum_{i=1}^{n_{si}} I[x_i] = \frac{n_f}{n_{si}} \quad (9)$$

Onde:

$\hat{P}_f$  indica uma estimativa da probabilidade de falha;

$n_f$  é o número de pontos no domínio de falha;

$n_{si}$  é o número de simulações;

Além disso, Beck (2014) cita o coeficiente de variação da probabilidade de falha ( $CV_{P_f}$ ), sendo que a avaliação de uma probabilidade de falha  $10^{-p}$ , precisa de  $10^{p+2}$  simulações quando o coeficiente de variação da probabilidade de falha está abaixo de 10%. Podendo ser caracterizado pela Equação 10.

$$CV_{P_f} = \frac{\sqrt{\text{Var}[P_f]}}{E[P_f]} \approx \frac{1}{\sqrt{n_{si}P_f}} \quad (10)$$

Onde:

$n_{si}$  corresponde ao número de simulações;

$P_f$  é a probabilidade de falha.

### 2.3.3 Distribuições De Probabilidade

Para realizar a simulação de Monte Carlo, é essencial definir as distribuições de probabilidade. Segundo Beck (2014) para variáveis contínuas, distribuições como a normal ou exponencial são geralmente apropriadas. Já para variáveis discretas, as

distribuições binomial ou de Poisson são mais adequadas. Dessa forma, fica claro que a escolha da distribuição de probabilidade depende de sua adequação para um conjunto de dados.

Para determinar a distribuição de probabilidade apropriada, deve ser considerada a natureza dos dados e o processo subjacente que está sendo modelado, ou seja, se torna necessário o conhecimento dos parâmetros analisados e de seus respectivos intervalos. A distribuição binomial é adequada para variáveis discretas com um número fixo de ensaios e dois resultados possíveis. Por outro lado, a distribuição exponencial está relacionada às variáveis contínuas e ao processo de Poisson. A distribuição de Poisson modela o número de eventos que ocorrem em um intervalo fixo de tempo ou espaço. Além disso, a distribuição normal, também conhecida como distribuição gaussiana, é comumente usada para modelar variáveis contínuas com uma curva simétrica em forma de sino (Equação 11).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

Sendo:

$x$  é a variável aleatória;

$\mu$  é a média da distribuição;

$\sigma$  é o desvio padrão da distribuição, que é a raiz quadrada da variância ( $\sigma^2$ ).

Segundo Portnoi (2010), no estudo das distribuições de probabilidade, diferentes tipos de distribuições são utilizados para modelar comportamentos distintos dos dados. A distribuição normal, cuja variável aleatória associada é contínua, é usada quando os dados tendem a se concentrar em torno de um valor central, sem viés à esquerda ou à direita. Enquanto isso, a distribuição log-normal, também associada a uma variável aleatória contínua, é utilizada quando os dados são positivamente assimétricos (não podem ser negativos) e modela fenômenos como preços de ativos financeiros. A distribuição uniforme pode ser associada tanto a variáveis aleatórias discretas quanto contínuas, onde todos os resultados são igualmente prováveis, como exemplificado pelo lançamento de um dado justo. Por fim, a distribuição determinística

não envolve aleatoriedade, sendo o resultado certo e não associado a nenhuma variável aleatória, exemplificado pelo tempo exato para um evento ocorrer. Essas distribuições são fundamentais na teoria da probabilidade e são amplamente aplicadas em várias áreas, incluindo estatística, economia e engenharia, para modelar diferentes tipos de incertezas e variabilidades nos dados.

#### 2.3.4 Variáveis Aleatórias e Função de Estado Limite

Segundo Beck (2014), uma variável aleatória é uma função real que atribui um valor real a cada ponto amostral em um espaço amostral, onde o evento  $\{X \leq x\}$  é considerado um evento para qualquer número real, sendo  $X$  uma variável aleatória real e  $x$  um número real. Além disso, a ocorrência de eventos associados a variáveis aleatórias só pode ser determinada em termos de probabilidades.

Além disso, o autor descreve os estados limites e os modos de falha de estruturas e elementos estruturais através de equações de estado limite  $g(\mathbf{X})$ , onde cada equação é formulada em termos das variáveis de projeto  $\mathbf{X}$ . Essas equações são definidas de modo que valores negativos indiquem falha estrutural e valores positivos indiquem não falha. Dessa forma, as equações de estado limite estabelecem as fronteiras entre os domínios de falha e não falha, ou entre os estados desejáveis e indesejáveis da estrutura. A Equação 12 exemplifica as variáveis aleatórias, enquanto a Equação 13 caracteriza a equação de estado limite considerando a resistência e solicitações da estrutura.

$$\mathbf{X} = X_1, X_2, \dots, X_n \quad (12)$$

$$g(\mathbf{X}) = R - S \quad (13)$$

### 3 METODOLOGIA

Para o presente trabalho, foram escolhidas barragens influenciadas por diferentes quantidades de esforços em sua estrutura. A primeira e a segunda barragem foram caracterizadas como barragens de concreto em forma retangular, utilizando equações de equilíbrio para a realização das equações de estado limite. Já a terceira estrutura de análise foi caracterizada como uma barragem de concreto em formato de trapézio retângulo, utilizando equações de projeto referentes a deslizamento e tombamento para a realização das equações de estado limite.

As condições de carregamento (Seção 2.1.2.5), estão associadas às equações de projeto, delimitando a segurança. No entanto, neste trabalho, as equações de projeto foram utilizadas para elaborar a equação de estado limite, e a análise referente à segurança foi abordada por essa equação.

Foi fundamental compreender a sequência e o objetivo principal da aplicação. Com esse entendimento, utilizaram-se variáveis aleatórias e aplicaram-se conceitos de distribuição de probabilidade. Primeiramente, determinou-se quais seriam as variáveis aleatórias dos parâmetros das equações de estado limite definidas. Em seguida, estabeleceram-se as médias e desvio-padrão das variáveis e utilizaram-se distribuições de probabilidade adequadas, para assim aplicar a simulação de Monte Carlo.

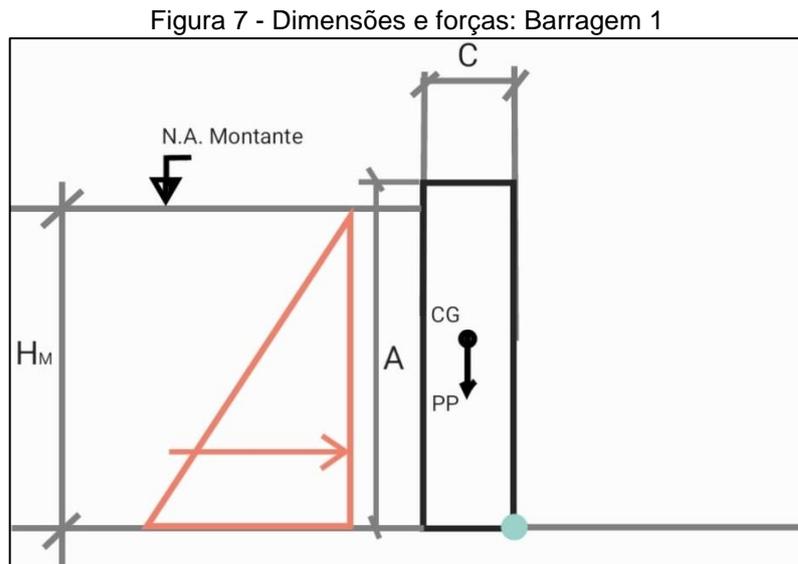
#### 3.1 FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE

Primeiramente, foram desenvolvidas as equações de estado limite. Essa etapa inicial teve como objetivo determinar equações específicas para cada barragem, visando encontrar a diferença entre a resistência da estrutura e a solicitação aplicada sobre ela. Foram elaboradas equações de estado limite para cada barragem - barragem 1, barragem 2 e barragem 3 considerando o tombamento e a flutuação.

##### 3.1.1 Barragem 1

O primeiro modelo foi caracterizado por uma barragem de concreto com forma retangular. Considerou-se tanto o peso próprio da barragem quanto a altura da água

a montante. No eixo X, orientado verticalmente para baixo, a barragem foi sujeita à influência de seu próprio peso. No entanto, no eixo Y, orientado horizontalmente, observou-se a interação da ação da massa de água a montante, aplicando uma força da esquerda para a direita. Não houve influência de água no sentido oposto, ou seja, da direita para a esquerda. A representação dessas interações pode ser visualizada na Figura 7.



Fonte: A autora (2024).

### 3.1.1.1 Caracterizando a função

Para caracterizar a função foram levadas em consideração as forças verticais, horizontais e, por fim, o momento. Dessa forma:

Sendo  $\Sigma V = 0$ :

$$P_p = \gamma_c A C \quad (14)$$

Sendo  $\Sigma H = 0$ :

$$H_m H_m \frac{\gamma_w}{2} \quad (15)$$

$$H_m^2 \frac{\gamma_w}{2} \quad (16)$$

Sendo  $\Sigma M = 0$ :

$$\gamma_c A C d_1 - H_m^2 \frac{\gamma_w}{2} d_2 \quad (17)$$

$$d_1 = \frac{C}{2} \quad (18)$$

$$d_2 = \frac{H_m}{3} \quad (19)$$

$$\gamma_c A C \frac{C}{2} - H_m^2 \frac{\gamma_w}{2} \frac{H_m}{3} \quad (20)$$

$$\gamma_c A \frac{C^2}{2} - H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \quad (21)$$

Onde:

$P_p$ : Peso próprio da estrutura;

$A$ : Altura da barragem;

$C$ : Comprimento da barragem;

$\gamma_c$ : Peso específico do concreto;

$\gamma_w$ : Peso específico da água;

$U$ : Subpressão;

$H_j$ : Altura da jusante;

$H_m$ : Altura da montante.

Logo, a função das variáveis de projeto pode ser caracterizada por:

$$g(\mathbf{X}) = \gamma_c A \frac{C^2}{2} - H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \quad (22)$$

### 3.1.1.2 Equação referência para segurança

Quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada segura:

$$Ds = \gamma_c A \frac{C^2}{2} - H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} > 0 \quad (23)$$

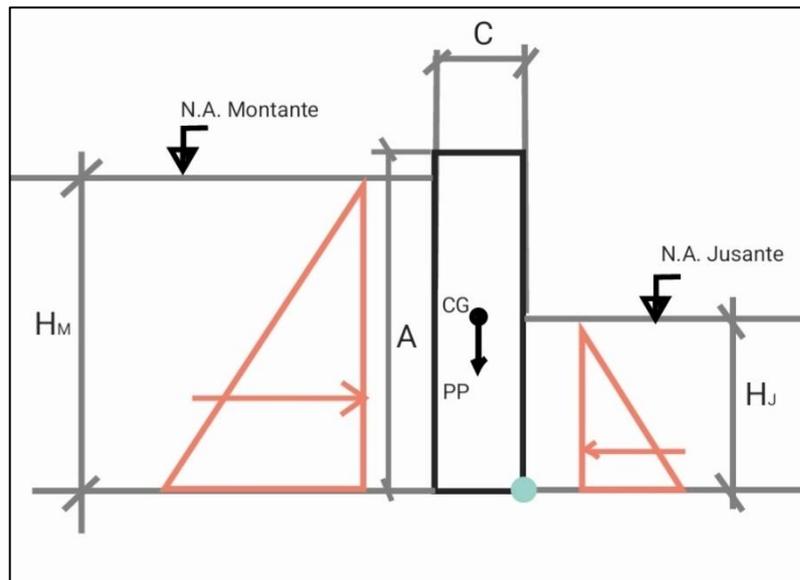
E, quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada insegura:

$$Df = \gamma_c A \frac{C^2}{2} - H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \leq 0 \quad (24)$$

### 3.1.2 Barragem 2

O segundo modelo foi caracterizado por uma barragem de concreto com forma retangular, considerando tanto o peso próprio da barragem quanto a altura da água a montante e a jusante. No eixo X, orientado verticalmente para baixo, a barragem foi sujeita à influência de seu próprio peso. No entanto, ao considerar o eixo Y, orientado horizontalmente, observou-se a interação da ação proveniente da massa de água a montante e a jusante, aplicando uma força da esquerda para a direita e uma força da direita para a esquerda. A representação dessas interações pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Dimensões e forças: Barragem 2



Fonte: A autora (2024).

#### 3.1.2.1 Caracterizando a função

Para caracterizar a função foi levado em consideração as forças verticais, horizontais e, por fim, o momento. Dessa forma:

Sendo  $\Sigma V = 0$ :

$$P_p = \gamma_c A C \quad (25)$$

Sendo  $\Sigma H = 0$ :

$$H_m H_m \frac{\gamma_w}{2} \quad (26)$$

$$H_m^2 \frac{\gamma_w}{2} \quad (27)$$

$$H_j H_j \frac{\gamma_w}{2} \quad (28)$$

$$H_j^2 \frac{\gamma_w}{2} \quad (29)$$

Sendo  $\Sigma M = 0$ :

$$\gamma_c A C d_1 + H_j^2 \frac{\gamma_w}{2} d_3 - H_m^2 \frac{\gamma_w}{2} d_2 \quad (30)$$

$$d_1 = \frac{C}{2} \quad (31)$$

$$d_2 = \frac{H_m}{3} \quad (32)$$

$$d_3 = \frac{H_j}{3} \quad (33)$$

$$\gamma_c A C \frac{C}{2} + H_j^2 \frac{\gamma_w}{2} \frac{H_j}{3} - H_m^2 \frac{\gamma_w}{2} \frac{H_m}{3} \quad (34)$$

$$\gamma_c A \frac{C^2}{2} + H_j^3 \frac{\gamma_w}{6} - H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \quad (35)$$

Logo, a função das variáveis de projeto pode ser caracterizada por:

$$g(\mathbf{X}) = \gamma_c A \frac{C^2}{2} + H_j^3 \frac{\gamma_w}{6} - H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \quad (36)$$

Onde:

$P_p$ : Peso próprio da estrutura;

$A$ : Altura da barragem;

$C$ : Comprimento da barragem;

$\gamma_c$ : Peso específico do concreto;

$\gamma_w$ : Peso específico da água;

$U$ : Subpressão;

$H_j$ : Altura da jusante;

$H_m$ : Altura da montante.

### 3.1.2.2 Equação referência para segurança

Quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada segura:

$$D_s = \left\{ \left[ \gamma_c \left( A \frac{C^2}{2} \right) \right] \right\} + \left\{ \left[ H_j^3 \frac{\gamma_w}{6} \right] \right\} - \left\{ \left[ H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \right] \right\} > 0 \quad (37)$$

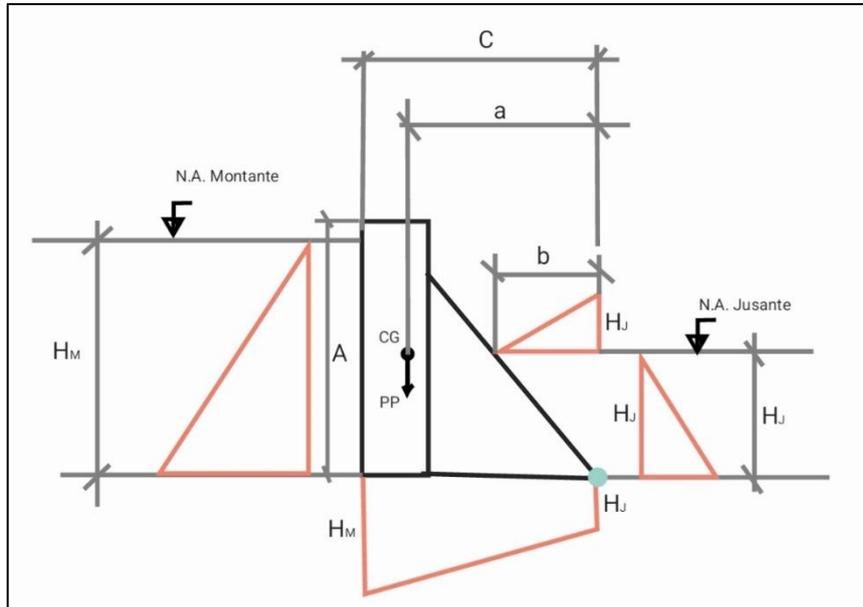
E, quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada insegura:

$$D_f = \left\{ \left[ \gamma_c \left( A \frac{C^2}{2} \right) \right] \right\} + \left\{ \left[ H_j^3 \frac{\gamma_w}{6} \right] \right\} - \left\{ \left[ H_m^3 \frac{\gamma_w}{6} \right] \right\} \leq 0 \quad (38)$$

### 3.1.3 Barragem 3

O terceiro modelo foi caracterizado por uma barragem em forma trapezoidal de concreto. Neste caso, foram levados em consideração os parâmetros e dimensões definidos na Seção 2.1.2.4, os quais foram compilados e detalhados em uma única imagem para melhor visualização. A representação dessas interações pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 - Imagem da barragem analisada com os parâmetros utilizados



Fonte: A autora (2024).

### 3.1.3.1 Flutuação

Para caracterizar a equação referente a falha estrutural de flutuação foi levado em consideração, de acordo com a Seção 2.2, o somatório das forças gravitacionais e o somatório das forças de subpressão. Dessa forma:

Sendo  $\Sigma V = 0$ :

$$P_P = \gamma_C A C \quad (39)$$

$$U = (H_m + H_j) \frac{C}{2} \gamma_w \quad (40)$$

Substituindo na equação de estado limite e englobando o fator de segurança definido na Seção 2.1.2.4.1.

$$g(x) = FS(X) - 1 \quad (41)$$

$$g(x) = \frac{\Sigma V}{\Sigma U} - 1 \quad (42)$$

$$g(x) = \frac{\gamma_c A C}{(H_m + H_j) \frac{C}{2}} - 1 \quad (43)$$

$$g(x) = \frac{2 \gamma_c A}{(H_m + H_j) \gamma_w} - 1 \quad (44)$$

Onde:

$P_p$ : Peso próprio da estrutura;

$A$ : Altura da barragem;

$C$ : Comprimento da barragem;

$\gamma_c$ : Peso específico do concreto;

$\gamma_w$ : Peso específico da água;

$U$ : Subpressão;

$H_j$ : Altura da jusante;

$H_m$ : Altura da montante.

Quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada segura:

$$Ds = \mathbf{X} \mid g(\mathbf{X}) > 0 \quad (45)$$

E, quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada insegura:

$$Df = \mathbf{X} \mid g(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (46)$$

### 3.1.3.2 Tombamento

Para caracterizar a equação referente a falha estrutural de tombamento, foi necessário levar em consideração, de acordo com a Seção 2.2, o somatório dos momentos estabilizadores e o somatório dos momentos de tombamento. Dessa forma:

$$P_p a = \gamma_c A C a \quad (47)$$

Levando em consideração a subpressão, pressão hidrostática a montante e jusante:

$$U = \left[ d_1(H_j C) + d_2(H_m - H_j) \frac{C}{2} \right] \gamma_w \quad (48)$$

$$d_1 = \frac{C}{2} \quad (49)$$

$$d_2 = \frac{2}{3} C \quad (50)$$

$$U = \left( \frac{C^2}{3} H_m + \frac{C^2}{6} H_j \right) \gamma_w \quad (51)$$

$$M_m = \frac{1}{6} (H_m^3 \gamma_w) \quad (52)$$

$$M_j = \frac{1}{6} (H_j^3 \gamma_w) + \frac{1}{6} (H_j \gamma_w b^2) \quad (53)$$

$$\frac{C^2}{3} H_m \gamma_w + \frac{C^2}{6} H_j \gamma_w + \frac{1}{6} H_m^3 \gamma_w + \frac{1}{6} H_j^3 \gamma_w + \frac{1}{6} H_j \gamma_w b^2 \quad (54)$$

Substituindo na equação de estado limite e incluindo o fator de segurança definido na Seção 2.1.2.4.2:

$$g(x) = FS(X) - 1 \quad (55)$$

$$g(x) = \frac{\Sigma M_e}{\Sigma M_t} - 1 \quad (56)$$

$$g(x) = \frac{\gamma_c A C a}{\left( \frac{C^2}{3} H_m \gamma_w + \frac{C^2}{6} H_j \gamma_w + \frac{1}{6} H_m^3 \gamma_w + \frac{1}{6} H_j^3 \gamma_w + \frac{1}{6} H_j \gamma_w b^2 \right)} - 1 \quad (57)$$

Onde:

$P_p$ : Peso próprio da estrutura;

$A$ : Altura da barragem;

$C$ : Comprimento da barragem;

$\gamma_c$ : Peso específico do concreto;

$\gamma_w$ : Peso específico da água;

$U$ : Subpressão;

$H_j$ : Altura da jusante;

$H_m$ : Altura da montante.

Quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada segura:

$$Ds = X \mid g(X) > 0 \quad (58)$$

E, quando a estrutura atender o seguinte critério, pode ser considerada insegura:

$$Df = X \mid g(X) \leq 0 \quad (59)$$

### 3.2 DEFINIÇÃO DE VALORES UTILIZADOS

A descrição dos valores coletados e definidos nesta etapa visou demonstrar a lógica por trás de sua seleção e aplicação, considerando os parâmetros específicos para o dimensionamento da barragem, e as características dos materiais utilizados.

Além disso, foram caracterizadas as variáveis aleatórias associadas, juntamente com suas distribuições correspondentes.

#### 3.2.1 Parâmetros dos dimensionamentos e materiais, variáveis aleatórias e tipos de distribuições

Visando à aplicação do método de Monte Carlo, foi necessário realizar a coleta de parâmetros relacionados aos materiais e ao dimensionamento das barragens, dado que se trata de um estudo de caso.

Como observado na Seção 2.1.2.4, SA-ELETROBRÁS (2003) impõe restrições para o dimensionamento de barragens, permitindo as delimitações de acordo com valores estabelecidos ou condições predefinidas. Dentro deste contexto, diversos parâmetros delineados foram identificados, tais como a altura de água a montante, a altura de água a jusante e a borda livre. Além disso, o material apresenta uma série de nomenclaturas destinadas a definir as dimensões essenciais da estrutura. A análise das Figuras 4, 5 e 6, além do estudo prévio demonstrado na Figura

9, permitiu considerar as descrições dos parâmetros com suas respectivas nomenclaturas, conforme mostrado na Tabela 4.

Para garantir a estabilidade da estrutura, foram considerados os cenários menos favoráveis. Com base nas nomenclaturas da SA-ELETROBRÁS (2003) e nas especificações dimensionais de Pires *et al.* (2019) apresentadas na Seção 2.1.2.6, além das informações da Seção 2.1.2.7 sobre os parâmetros dos materiais, os valores foram coletados e apresentados na Tabela 6, identificados na coluna "valor principal".

Os valores de dimensionamento adotados foram baseados nos parâmetros estabelecidos por Pires *et al.* (2019), abrangendo a altura da barragem, largura da barragem e largura da crista. Nos casos específicos da jusante e do comprimento da barragem, foram realizados arredondamentos conforme os valores de Pires *et al.* (2019). Os cálculos relativos à altura da montante de água foram ajustados em conformidade com as normas da SA-ELETROBRÁS (2003).

Dessa forma, com esses valores coletados e listados, foi possível realizar a introdução de variáveis aleatórias. Ademais, foram escolhidos os seguintes parâmetros: peso específico do concreto ( $Y_c$ ), peso específico da água ( $Y_w$ ), altura da água a montante ( $H_m$ ), e altura da água a jusante ( $H_j$ ), pois influenciam diretamente na equação do solicitante.

Com as variáveis aleatórias definidas, foi crucial estudar o tipo de distribuição mais apropriado para aplicação. Optou-se pela distribuição normal simples, e para sua implementação, foram definidos as médias e os desvios padrões correspondentes a cada um desses parâmetros. Na Tabela 6, são apresentados os valores atribuídos aos parâmetros determinísticos, referidos como "valores principais", e os valores atribuídos aos parâmetros da distribuição normal simples, especificados como "média".

Tabela 6 - Parâmetros de dimensionamento das barragens

DESCRIÇÃO	NOMENCLATURA	UNIDADE	VALOR PRINCIPA	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	TIPO DE DISTRIBUIÇÃO
Altura da barragem	A	m	72,5	-	-	DETERMINÍSTICO
Comprimento da barragem	C	m	55	-	-	DETERMINÍSTICO
Largura da barragem	L	m	20	-	-	DETERMINÍSTICO
Comprimento da barragem	c	m	10	-	-	DETERMINÍSTICO
Altura de água da montante	$H_m$	m	72	36	1	NORMAL SIMPLES
Altura de água da jusante	$H_j$	m	10	5	1	NORMAL SIMPLES
Entre a montante e a altura final da barragem	-	m	0,5	-	-	DETERMINÍSTICO
Distância do Centro Geométrico ao ponto de	a	m	16	-	-	DETERMINÍSTICO
Distância do ponto à esquerda da jusante ao ponto de	b	m	8	-	-	DETERMINÍSTICO
Peso específico do concreto	$\gamma_c$	kN/m <sup>3</sup>	25	25	7	NORMAL SIMPLES
Peso específico da água	$\gamma_w$	kN/m <sup>3</sup>	10	10	1	NORMAL SIMPLES

Fonte: A autora (2024).

### 3.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

Após a definição dos parâmetros e das distribuições de probabilidade, o método de Monte Carlo foi implementado. Esta etapa envolveu a execução de um milhão (1.000.000) de simulações. Durante cada simulação, os parâmetros foram aleatoriamente sorteados de acordo com as distribuições definidas, e os valores resultantes foram inseridos nas equações de estado limite das barragens, criando diferentes cenários.

Com os resultados dos diferentes cenários gerados, foi possível realizar análises detalhadas utilizando os cálculos de probabilidade de falha (Equação 9) e do coeficiente de variação (Equação 10). Esses cálculos foram realizados com o objetivo de obter resultados para a análise da confiabilidade das estruturas.

### 3.4 ELABORAÇÃO DO CÓDIGO

O código foi desenvolvido em Python para realizar uma análise de segurança estrutural utilizando o método de Monte Carlo. Foram importadas as bibliotecas *NumPy*, e a função *norm* da biblioteca *SciPy* para lidar com distribuições normais.

Foram definidas quatro funções principais para calcular medidas de segurança para diferentes casos de barragens: “B1”, “B2”, “B3flutuação” e

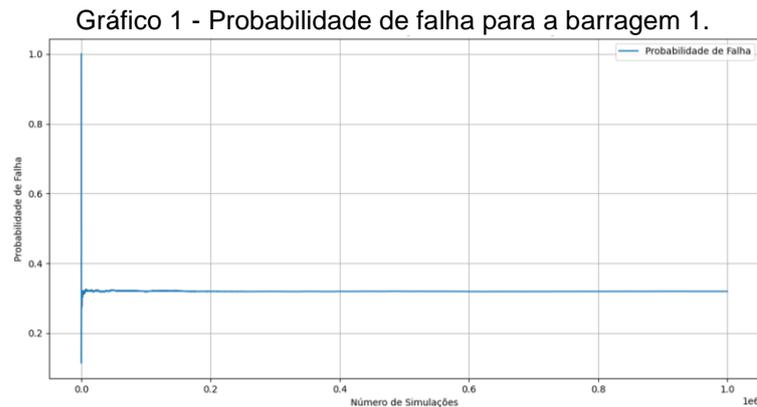
“B3tombamento”. Cada função recebe parâmetros específicos que influenciam diretamente no cálculo do índice de segurança.

Para simular o comportamento dessas funções sob variações aleatórias de parâmetros, implementou-se a função “simulacao\_monte\_carlo”. Esta função executa um número definido de simulações (n), gerando valores aleatórios para os parâmetros usando as distribuições normais configuradas anteriormente. Os resultados de cada simulação são armazenados para posterior análise estatística.

Após a execução das simulações, os resultados foram avaliados para determinar a segurança de cada função. Além disso, foram calculadas estatísticas como a porcentagem de simulações seguras, a contagem de resultados menores e maiores que zero, a probabilidade de falha e o coeficiente de variação da probabilidade de falha.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

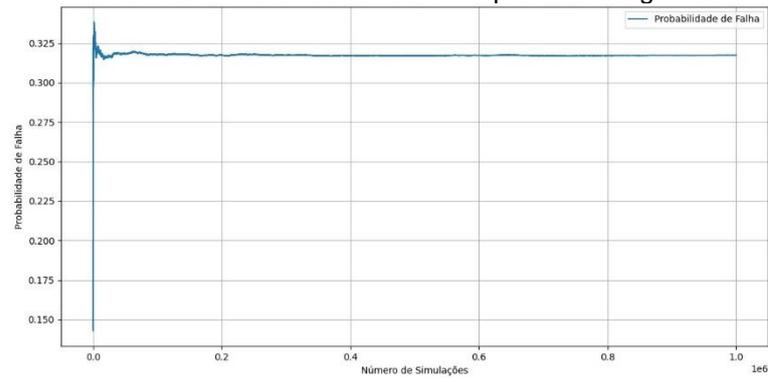
A barragem 1 (B1) apresentou uma probabilidade de falha (Pf) de 0,319585 e um coeficiente de variação (COV) de 0,00177, que está dentro do limite desejado de 10%, indicando uma probabilidade de falha relativamente alta e uma boa consistência nos resultados das simulações, como pode ser visualizado na Tabela 7 e Gráfico 1.



Fonte: A autora (2024).

Para a barragem 2 (B2), a Pf foi de 0,317376 e o COV foi de 0,00178, também dentro do limite desejado de 10%, indicando uma probabilidade de falha semelhante e estabilidade nos resultados, como pode ser visualizado na Tabela 7 e Gráfico 2. Ambas as barragens (B1 e B2), analisadas por meio de equações de equilíbrio, mostraram desempenhos e níveis de segurança semelhantes, com alta consistência nos resultados. As duas estruturas possuem o mesmo dimensionamento e características idênticas na face montante, diferenciando-se apenas pela aplicação de forças na jusante: em uma delas existe carga nessa região, enquanto a outra não apresenta forças na jusante. Essa diferença justifica a semelhança observada nos resultados.

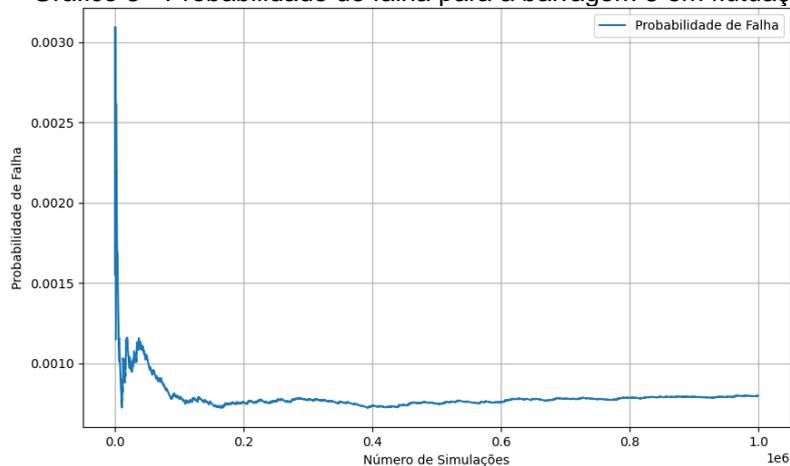
Gráfico 2 - Probabilidade de falha para a barragem 2.



Fonte: A autora (2024).

A Barragem 3 foi avaliada em dois cenários: flutuação (B3flutuação) e tombamento (B3tombamento). No cenário de flutuação, a Probabilidade de Falha (Pf) foi de 0,000798 e o Coeficiente de Variação (COV) calculado foi de 0,0354. Embora o COV fosse ligeiramente maior, ainda estava dentro dos limites aceitáveis, como pode ser visualizado na Tabela 7 e Gráfico 3.

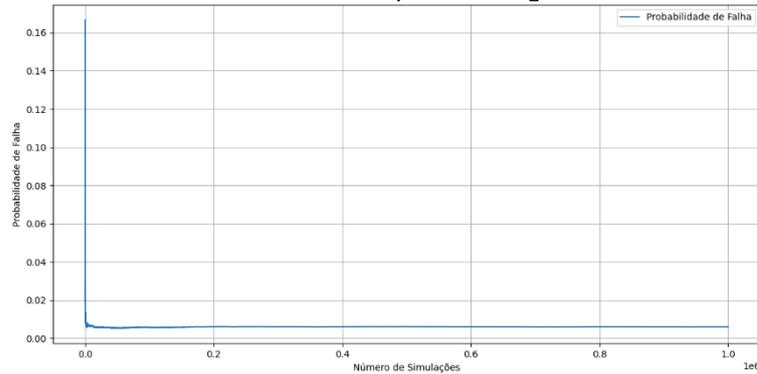
Gráfico 3 - Probabilidade de falha para a barragem 3 em flutuação



Fonte: A autora (2024).

No cenário de tombamento, a Pf foi de 0,00601 e o COV foi de 0,0129 novamente dentro do limite desejado, indicando boa confiabilidade contra tombamento, como pode ser visualizado na Tabela 7 e Gráfico 4.

Gráfico 4 - Probabilidade de falha par a barragem 3 em tombamento



Fonte: A autora (2024).

Dessa forma, as barragens apresentaram coeficientes de variação que atenderam ao limite estabelecido de 10%, sugerindo uma estabilidade adequada nas estimativas. No entanto, a Barragem 3 (flutuação) demonstrou a menor probabilidade de falha, embora com um coeficiente de variação mais elevado em comparação com as demais barragens. A Barragem 3 (tombamento) apresentou uma probabilidade de falha menor em relação a B1 e B2, com um coeficiente de variação que se situou entre os valores observados para as demais barragens.

Tabela 7 - Resultados obtidos nas simulações

Barragem	Probabilidade de falha (Pf)	Coefficiente de variação (COV)	Situação
Barragem 1	0,31959	0,00177	O COV está dentro do limite desejado de 10%.
Barragem 2	0,31738	0,00178	O COV está dentro do limite desejado de 10%.
Barragem 3 - referente à flutuação	0,00080	0,03540	O COV está dentro do limite desejado de 10%.
Barragem 3 - referente ao tombamento	0,00601	0,01290	O COV está dentro do limite desejado de 10%.

Fonte: A autora (2024).

Em todas as barragens, a probabilidade de falha diminuiu rapidamente nas primeiras simulações e estabilizou-se posteriormente, indicando que o modelo de simulação é robusto e convergiu bem com um número suficiente de simulações.

As diferenças observadas nos resultados podem ser atribuídas às metodologias de cálculo empregadas: as barragens B1 e B2 foram avaliadas exclusivamente com base em equações de equilíbrio, sem recorrer a equações normativas. Nessas análises, o momento foi calculado levando em consideração

simultaneamente as forças verticais e horizontais. Demonstrando alta consistência nos resultados.

Em contraste, a barragem B3 foi analisada utilizando equações de projeto fundamentadas em normas e literatura, com subsequente aplicação das equações de equilíbrio. Neste caso, o cálculo do momento foi realizado de forma segmentada, considerando o tombamento com forças verticais e horizontais, e a flutuação com apenas as forças verticais. Essa abordagem resultou em menores probabilidades de falha para a B3, especialmente em cenários de flutuação, introduzindo maior variabilidade nos resultados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar a confiabilidade de barragens por meio de diferentes modelos de representação para avaliar seu comportamento sob condições estáticas. Utilizando a simulação de Monte Carlo, foram estudados parâmetros críticos que influenciam a integridade estrutural das barragens.

Os resultados mostraram que todas as barragens analisadas apresentaram probabilidades de falha relativamente baixas e coeficientes de variação dentro dos limites aceitáveis, indicando boa consistência nas simulações. A barragem B3, avaliada sob a condição de flutuação, foi a mais segura em termos de probabilidade de falha, enquanto a barragem B1 apresentou, dentro dos limites aceitáveis, maior variabilidade nos resultados. Esses achados demonstram um bom nível de segurança e confiabilidade em todas as barragens analisadas, com pequenas variações entre elas.

A aplicação da simulação de Monte Carlo mostrou-se eficaz na avaliação da estabilidade das barragens, permitindo a identificação de situações desfavoráveis e a avaliação das diferentes condições de carregamento e dimensões das estruturas. Este estudo contribui para o aprimoramento das práticas de engenharia voltadas para a segurança e confiabilidade das barragens, destacando a importância da análise probabilística no desenvolvimento de projetos e na gestão de riscos associados a essas grandes estruturas.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar a análise para incluir diferentes tipos de barragens e suas variáveis operacionais específicas.
- Investigar o impacto de diferentes métodos de simulação na precisão dos resultados, além da simulação de Monte Carlo.
- Desenvolver estudos que integrem outras variantes para prever e mitigar o impacto de eventos extremos nas barragens.
- Explorar a utilização de novas tecnologias e materiais na construção e manutenção de barragens para aumentar a segurança e a eficiência.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Segurança de Barragens, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/seguranca-de-barragens>>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120:2019: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BAPTISTA, M; LARA, M. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.
- BECK, A. T. Confiabilidade Estrutural. São Carlos, SP, agosto de 2014.
- BEER, F. Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática.
- BRASIL. Lei nº 14.066, de 22 de julho de 2020. Dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens, altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e revoga a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 jul. 2020.
- CARVAJALINO, J. Acoplamento de Estados Limites na Avaliação da Confiabilidade Estrutural de Dutos e Estruturas. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico da PUC-Rio, 2010.
- CIA. The World Factbook - Mozambique. 2021. Disponível em: <<https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/mozambique/>>. Acesso em: 16 jan. 2021.
- COSTA, W D. Geologia de Barragens. Oficina de Textos, 2016.
- DA SILVA, M. S. L.; MENDONÇA, C. E. S.; ANJOS, J. B. dos; HONÓRIO, A. P. M.; SILVA, A. de S.; BRITO, L. T. de L. Barragem Subterrânea: Água para Produção de Alimentos. 2007.
- DA SILVA, R. S. A.; MEDEIROS, A. B. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. P.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F. Acidentes e Incidentes em Barragens Brasileiras: Uma Análise dos Dados Disponíveis nos Relatórios de Segurança de Barragens e da Legislação Vigente. Holos, v. 6, p. 1-17, 2021.
- DE AMORIM COELHO, N; PEDROSO, L. J; NEPOMUCENO, A. A. A Influência das Propriedades Térmicas do Concreto na Construção de Barragens de Gravidade.
- ENGEMINAS. Tipos de Barragens. 2021. Disponível em: <<https://engeminas.com.br/tipos-de-barragens/>>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- GAIOTO, Nélío. Barragens de Terra e Enrocamento. 1982.

GENTLE, J. Monte Carlo methods are experiments. 2009. Disponível em: <[http://cursos.leg.ufpr.br/ce089/06\\_MC\\_intro.html](http://cursos.leg.ufpr.br/ce089/06_MC_intro.html)>. Acesso em: 30 jun. 2024.

VIEIRA JUNIOR, L. P.; SALLES, F. M. A Tecnologia do Concreto Aplicada ao Projeto de Barragens. Melhores Práticas Tecnologia do Concreto. São Paulo: Concreto e Construções, p. 15-23, 2011.

MARANGON, M. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Universidade Federal de Juiz de Fora – Departamento de Transportes e Geotecnia, Juiz de Fora, 2004.

PIRES, K. O. BECK, A. T. BITTENCOURT, T. N. FUTAI, M. M. Análise de Confiabilidade de Barragem de Concreto Construída. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2019.

PORTNOI, M. Probabilidade, Variáveis Aleatórias, Distribuição de Probabilidades e Geração Aleatória. s.d. 2010.

POSSAN, E. Curso de Segurança de Barragens, Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnico. 2020.

RIBEIRO, P. A. Análise sobre a (in)efetividade da Lei nº 14.066/20 nos Processos de Exploração Minerária em Minas Gerais: Agravo de Instrumento 1005721-49.2018. 8.13.0000 MG. 2021.

ROMANESCU, G.; ROMANESCU, A. M.; ROMANESCU, G. Building the Main Dams and Reservoirs. "Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi, Faculty of Geography and Geology, Department of Geography. Abstract. 2014.

SA-ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro, 2003.

SETTI, A. A; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2ª ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

SCHREIBER, G.P. Usinas Hidrelétricas. São Paulo: Edgard Blucher, 1977

VIEIRA JUNIOR, L. P.; SALLES, M. F. A tecnologia do concreto aplicada ao projeto de barragens. Melhores práticas tecnologia do concreto. Concreto & Construções, 2014.

WESTBERG, M. Reliability-based Assessment of Concrete Dam Stability. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural) – Division of Structural Engineering, 2010.