

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Brunella Scaquete Neves

**Análise de Confiabilidade Estrutural  
de uma Barragem de Gravidade de Concreto**

Florianópolis

2022

Brunella Scaquete Neves

**Análise de Confiabilidade Estrutural  
de uma Barragem de Gravidade de Concreto**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Wellison José de Santana Gomes, Dr.

Florianópolis

2022

Neves, Brunella Scaquete

Análise de Confiabilidade Estrutural de uma Barragem de Gravidade de Concreto / Brunella Scaquete Neves ; orientador, Wellison José de Santana Gomes, 2022. 60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. análise de confiabilidade. 3. barragens de gravidade de concreto. 4. simulação de Monte Carlo. I. Gomes, Wellison José de Santana . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Brunella Scaquete Neves

**Análise de Confiabilidade Estrutural de uma Barragem de Gravidade de Concreto**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2022.



Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



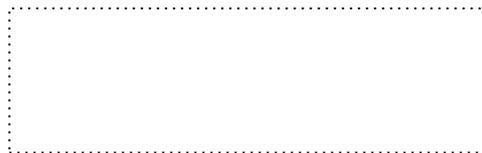
Prof. Wellison José de Santana Gomes, Dr.

Orientador



Prof. Jano D'Araújo Coelho, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Civil Alexandre Caio Martins

Florianópolis, 2022.

*Dedico este trabalho a Deus, sem ele nada seria possível, aos meus pais e à minha irmã, pilares da minha formação como ser humano.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui.

À minha família por estarem sempre me apoiando e me dando todo o suporte necessário. Nada disso seria possível se vocês, mesmo com o coração apertado e sem minha presença física nos almoços de domingo, não tivessem me incentivado a voar para uma ilha cerca de 1800 km distante da nossa casa, em busca do sonho de me tornar engenheira civil. À minha mãe Dirlene, meu exemplo de força e determinação, por sempre lutar por mim, pela minha felicidade e, às vezes ter adiado os seus sonhos para que os meus se realizassem. Obrigada ao meu pai Adenilson, por me proteger e tornar a vida mais leve e engraçada, dono das melhores brincadeiras e piadas (mesmo só você rindo). À Francielly, meu primeiro exemplo de inteligência e o coração mais bondoso que já conheci. Foi observando a tua trajetória que eu aprendi a lutar e a ir atrás dos meus sonhos.

Ao orientador Professor Wellison Gomes pela orientação precisa e objetiva, estando sempre disponível a esclarecer minhas dúvidas. Ademais, obrigada pela confiança depositada em mim e no meu trabalho. Ao engenheiro Alexandre Caio pelas explicações referentes a área estrutural de barragens.

Aos colegas da turma 17.1 que viveram esse ciclo comigo e tornaram os dias muito mais leves. Em especial: Joana, Letícia, Miriam, Leila, Luiza, Alice, Gustavo, Igor, Cazula e Oliver. E também as amigas Laura, Karenn e Mariana.

A todas as entidades e laboratórios que fiz parte: EPEC, Betonada, GTSIG e Labtrans, que foram fundamentais no meu desenvolvimento pessoal e profissional e me apresentaram pessoas incríveis, em especial, Marcelo, Thayná, Paulo, Julia, Phelype, Vitor, Adriel e Lucas. À empresa Nova Engevix, por me ensinar tanto nesses últimos 2 anos, em especial a equipe de hidráulica e hidrologia e aos profissionais que me acompanharam de perto: Fernando, Anne, Alana e Paulo.

À ELEJOR – Centrais Elétricas do Rio Jordão S.A. pela autorização do uso de dados da barragem de Santa Clara neste trabalho, não podendo serem utilizados em outras pesquisas sem a devida autorização (Licença Creative Commons BY NC ND).

E, por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina, pelo ensino de qualidade, e a todos os professores que tanto me ensinaram durante a minha trajetória.

*“A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

(EINSTEIN, Albert)

## RESUMO

As barragens são estruturas sujeitas a níveis elevados de incertezas, e o projeto de barragens de concreto à gravidade usualmente se utiliza de métodos semi-probabilísticos, especificados nos códigos de projeto, que não consideram diretamente o efeito dessas incertezas na segurança da estrutura. A partir da aplicação da teoria e dos métodos de confiabilidade estrutural é possível quantificar o impacto das incertezas inerentes a essas estruturas em termos de probabilidades de falha e dos respectivos índices de confiabilidade estrutural. Este trabalho apresenta a análise de confiabilidade estrutural aplicada ao estudo de caso de uma barragem de gravidade de concreto existente e a discussão de quais são os modos de falha e os parâmetros de projeto com maior influência na segurança da estrutura. Os resultados são obtidos empregando o Método de Monte Carlo simples, a partir dos quais são comparados os índices de confiabilidade obtidos para várias condições de carregamento. Os resultados mostram que o deslizamento é o modo de falha dominante, em relação aos modos de falha por tombamento e por flutuação, que tiveram resultados de probabilidade de ocorrência significativamente menores.

**Palavras-chave:** análise de confiabilidade; barragens de gravidade de concreto; simulação de Monte Carlo.

## ABSTRACT

Dams are structures subjected to high levels of uncertainties. The design of gravity dams commonly employs semi-probabilistic methods specified in the design codes, which do not directly consider the effect of these uncertainties on structural safety. By applying the theory and methods of structural reliability, it is possible to quantify the impact of the uncertainties inherent to these structures in terms of failure probabilities and the respective structural reliability indices. The present study applies structural reliability analyses to the case study of an existing gravity dam and discusses the failure modes and the design parameters with the greatest influence on the safety of the structure. The failure probabilities are estimated via Simple Monte Carlo method for different loading conditions. The results show that sliding is the dominant failure mode when compared to the failure modes of overturning and floating, for which significantly lower failure probabilities are obtained.

**Keywords:** reliability analysis; concrete gravity dams; Monte Carlo simulation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Função de estado limite e domínios de falha e segurança .....	23
FIGURA 2 – Simulação de Monte Carlo - Convergência da $P_f$ .....	25
FIGURA 3 – Rompimento do açude de Orós .....	28
Figura 4 – Rompimento da barragem de Camará .....	28
FIGURA 5 – Rompimentos das barragens de Brumadinho e de Mariana ....	29
FIGURA 6 – Seção Típica da Barragem de Concreto .....	30
FIGURA 7 – Representação das forças atuantes no modo de falha por deslizamento .....	37
FIGURA 8 – Representação das forças atuantes no modo de falha por tombamento .....	39
FIGURA 9 – Representação das forças atuantes no modo de falha por flutuação.....	40
FIGURA 10 – Mapa de Localização da Barragem Santa Clara .....	41
FIGURA 11 – Barragem de Santa Clara (UHE Santa Clara).....	42
FIGURA 12 – Localização do bloco nº 16 e locação dos furos de testemunhos .....	43
FIGURA 13 – Geometria da Soleira Vertente .....	47
FIGURA 14 – Índice de confiabilidade relativo ao deslizamento .....	52
FIGURA 15 – CV da probabilidade em função do nº simulações do tombamento - CCL .....	53
FIGURA 16 – Índice de Confiabilidade em função do Peso Específico do Concreto.....	54

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Funções de Densidade de Probabilidade .....	20
TABELA 2 – Fatores de Redução da Resistência da Coesão e do Atrito.....	33
TABELA 3 – Valores Mínimos dos fatores de segurança .....	34
TABELA 4 – Dados da densidade do testemunho do bloco nº 16.....	43
TABELA 5 – Resumo das variáveis aleatórias .....	44
TABELA 6 – Parâmetros determinísticos comuns a todas as condições de carregamento .....	47
TABELA 7 – Parâmetros determinísticos da CCN e da CCE2 .....	48
TABELA 8 – Parâmetros determinísticos da CCE e da CCL.....	49
TABELA 9 – Parâmetros determinísticos específicos do deslizamento e do tombamento .....	49
TABELA 10 – Resultados relativos ao deslizamento.....	51
TABELA 11 – Resultados relativos ao tombamento .....	51
TABELA 12 – Resultados relativos a flutuação .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CCE	Condição de Carregamento Excepcional
CCL	Condição de Carregamento Limite
CCN	Condição de Carregamento Normal
CEN	Comitê Europeu de Normatização
CMB	Comissão Mundial de Barragens
CNN	<i>Cable News Network</i>
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
JCSS	<i>Joint Committee on Structural Safety</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
USBR	<i>U.S. Bureau of Reclamation</i>
USACE	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	LIMITAÇÕES .....	17
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>2</b>	<b>CONFIABILIDADE ESTRUTURAL</b> .....	<b>19</b>
2.1	VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	19
2.1.1	<b>Funções de Densidade de Probabilidade</b> .....	<b>20</b>
2.1.2	<b>Valor Esperado</b> .....	<b>21</b>
2.1.3	<b>Variância</b> .....	<b>21</b>
2.1.4	<b>Desvio padrão e coeficiente de variação</b> .....	<b>21</b>
2.2	PROBABILIDADE DE FALHA E ÍNDICE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL .....	22
2.3	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	24
<b>3</b>	<b>SEGURANÇA DE BARRAGENS</b> .....	<b>27</b>
3.1	CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO.....	31
3.2	DESLIZAMENTO .....	32
3.3	TOMBAMENTO .....	33
3.4	FLUTUAÇÃO .....	34
<b>4</b>	<b>FUNÇÕES DE ESTADO LIMITE</b> .....	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>41</b>
5.1	DESCRIÇÃO GERAL DA BARRAGEM .....	41
5.2	CONDIÇÕES DAS ANÁLISES.....	43
5.3	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	44
5.3.1	<b>Peso Específico do Concreto</b> .....	<b>45</b>
5.3.2	<b>Ângulo de Atrito Interno e Coesão do Contato Concreto-rocha</b> .....	<b>45</b>
5.3.3	<b>Coeficiente de Ineficiência Hidráulica</b> .....	<b>46</b>
5.4	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DETERMINÍSTICOS .....	46
5.5	VALORES ALVO.....	49

5.6	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO .....	50
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As incertezas estão presentes em todos os sistemas de engenharia, afetando de forma particular o desempenho e a segurança de sistemas estruturais. Elas se classificam em dois grandes grupos: as epistêmicas, que são aquelas que podem ser reduzidas ou até mesmo eliminadas; e as intrínsecas, que são aquelas que fazem parte da natureza do sistema estrutural e/ou das condições a ele aplicadas, não sendo possível eliminá-las. Essas incertezas implicam em risco, que é por definição o produto da probabilidade de ocorrência do evento pelas consequências desse evento (BECK, 2014).

Segundo Altarejos-García, Escuder-Bueno, Serrano-Lombillo e Membrillera-Ortuño (2012), a probabilidade de um evento adverso ocorrer é chamada de probabilidade de falha ( $P_f$ ), e a confiabilidade estrutural está diretamente ligada com o cálculo e o prognóstico dessa probabilidade em qualquer estágio de vida útil da estrutura analisada (MELCHERS *et. al.*, 2018). Essa teoria é utilizada em normas internacionais, como a norma norte-americana ACI 318 e a europeia Eurocode.

As barragens são estruturas usualmente sujeitas a níveis elevados de incerteza. Elas estão entre as grandes obras da engenharia, e a sua construção é tão antiga quanto a história do homem, constando em praticamente todas as culturas (MORANO, 2003). Conforme Jansen (1983), os registros das primeiras obras datam de aproximadamente 5000 anos, sendo que as ruínas dessas barragens ainda podem ser encontradas em países como Índia e Egito.

De acordo com a Lei 12.334/10 (BRASIL, 2010), da Política Nacional de Segurança de Barragens, as barragens consistem em quaisquer estruturas posicionadas em um curso permanente ou temporário de água, seja para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas, ou de misturas de líquidos e sólidos. Elas são fundamentais para a sociedade, possuindo finalidades como abastecimento de água; irrigação; geração de energia; controle de cheias; entre outros (CMB, 2000).

As barragens podem ser classificadas com relação ao tipo de material, como de terra, de enrocamento, concreto, borracha ou gabião. Sendo que as de concreto classificam-se como de gravidade, de gravidade aliviada, contraforte ou arco (MARANGON, 2004). No presente trabalho, o foco está nas barragens de concreto

compactado a rolo do tipo gravidade, que são aquelas cuja estabilidade deve ser garantida pelo peso próprio da estrutura.

No Brasil, o projeto de barragens de gravidade de concreto ainda hoje segue métodos semi-probabilísticos, especificados nos critérios de projeto, e que acabam não quantificando diretamente o efeito das incertezas na segurança da estrutura. A nível internacional, manuais e livros tais como *Design of Small Dams* do *United States Bureau of Reclamation* (USBR, 1987) e *Handbook of Hydroelectric Engineering* de Nigam (1978) também seguem os mesmos métodos. Entretanto, nas últimas décadas discussões relacionadas à segurança de barragens têm sido apresentadas na literatura, como nos programas *Safety Evaluation on Existing Dams* e *Safety of Dams*, desenvolvidos pelo *Bureau of Reclamation* (BUREC) (1978), e na Lei 12.334 (BRASIL, 2010) sobre a Segurança de Barragens (CBDB, 2010), sobretudo considerando falhas estruturais que ocorreram nas barragens de *Saint Francis*, de *Malpasset*, e de *Camará*, nos Estados Unidos, na França e no Brasil, respectivamente. Tais atualizações têm levado à busca de alternativas em termos de métodos para o projeto estrutural. Os métodos de confiabilidade estrutural têm ganhado destaque neste contexto, podendo ser encontrados em estudos conduzidos na *University of South Wales*; *ANCOLD*; *BC Hydro*; *SPANCOLD* e *United States Army Corps of Engineers*. A partir da aplicação da teoria e dos métodos de confiabilidade estrutural é possível quantificar o impacto das incertezas inerentes a essas estruturas em termos de probabilidades de falha, que servem para tomar decisões no que diz respeito ao nível de segurança das estruturas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a confiabilidade estrutural de uma barragem de concreto compactado a rolo, de acordo com parâmetros que influenciam as probabilidades de deslizamento, flutuação e tombamento, estimando o nível de segurança da barragem.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar os principais modos de falha;
- b) Definir funções de estado limite;
- c) Caracterizar as incertezas envolvidas com base na literatura;
- d) Calcular a confiabilidade estrutural da barragem do estudo de caso;
- e) Comparar e analisar os resultados obtidos entre si, e relacioná-los aos resultados obtidos pela aplicação de métodos determinísticos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto estrutural de barragens de gravidade de concreto se utiliza usualmente de métodos semi-probabilísticos, especificados nos critérios de projeto. Estes métodos não consideram diretamente as incertezas do problema, o que faz com que projetos diferentes possam resultar em diferentes níveis de segurança, mesmo que fatores de segurança iguais sejam considerados.

Sendo assim, a principal justificativa do presente trabalho é a necessidade de quantificar e garantir a segurança estrutural, em relação a cada um de seus principais modos de falha, aplicando a confiabilidade estrutural e comparando os resultados com as verificações de segurança adotadas tradicionalmente.

## 1.3 LIMITAÇÕES

A análise de estabilidade do presente estudo foi limitada aos modos de falha relacionados ao deslizamento, tombamento e flutuação, por conta de o foco ser a aplicação do método da confiabilidade estrutural. Dessa forma, não foram incluídas as análises de tensões e deformações para todos os elementos estruturais e de fundações. Além disso, não foram consideradas as ações devido aos efeitos de sismos nas condições de carregamento definidas, por não serem necessárias nas análises e comparações realizadas. Entende-se que o comportamento das variáveis aleatórias definidas é observado de maneira satisfatória com os cenários escolhidos.

## 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente, foi realizada a revisão de literatura sobre os temas referentes à confiabilidade estrutural e ao projeto de estruturas de barragem, permitindo a apresentação de conceitos fundamentais para a formulação do problema. Com isso, também foram definidos os parâmetros para a realização das análises de confiabilidade. Em seguida, buscou-se na literatura e em projetos de estabilidade de barragens as funções analíticas que descrevem os modos de falha em termos dos parâmetros definidos. Verificou-se também quais as condições de carregamento usualmente analisadas e, dentre as barragens selecionadas, quais delas possuíam dados suficientes para que fosse realizada a análise de confiabilidade. Posteriormente à definição da barragem de estudo, foram coletadas as informações das variáveis aleatórias e dos parâmetros determinísticos para cada condição de carregamento definido para a estrutura.

Com todos esses dados e essas informações foi possível aplicar o método de Simulação de Monte Carlo, utilizando o programa de análise de risco *Risk Tools (Rt)*, desenvolvido por *Mahsuli e Haukaas (2013)*, e obter os resultados dos índices de confiabilidade para cada cenário. Por fim, esses índices foram comparados entre si, para cada modo de falha. Outros resultados, como os fatores de segurança, foram comparados com os valores mínimos indicados na Eletrobrás (2003).

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. O segundo e o terceiro se referem à revisão da literatura, abordando os conceitos de confiabilidade estrutural e de segurança de barragens, respectivamente. No quarto capítulo são apresentadas as funções de estado limite que definem quando ocorre ou não falha, evidenciando os dados de entrada necessários para cada uma delas. No quinto capítulo é apresentado o estudo de caso, com as informações da barragem. No sexto têm-se os resultados obtidos a partir das simulações, incluindo discussões a respeito. Por fim, no sétimo e último capítulo, são apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho.

## 2 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Um projeto estrutural deve atender requisitos de segurança e requisitos econômicos, de modo que a segurança não seja tão elevada a ponto de comprometer a viabilidade econômica, e nem insuficiente a ponto de oferecer riscos à sociedade e levar a possíveis catástrofes. É necessário conhecer as resistências dos materiais e os valores das solicitações, para que se possa garantir um nível adequado de segurança. Entretanto, há incertezas tanto do ponto de vista das resistências quanto das solicitações (EL HAMI e RADI, 2013). A confiabilidade estrutural surge com o propósito de considerar as incertezas inerentes aos parâmetros de resistência e solicitação, analisando o impacto destas incertezas na segurança de estruturas.

Segundo Beck (2014), a confiabilidade é o grau de confiança de que um sistema estrutural não falhe dentro do período de sua vida útil. Dessa forma, a finalidade da análise de confiabilidade estrutural é estimar a probabilidade de ocorrência de qualquer tipo de catástrofe, colapso, ruína ou qualquer condição indesejada da estrutura. Para isso é necessário considerar as incertezas relacionadas ao problema, sendo que as variáveis aleatórias são uma das maneiras mais utilizadas de representá-las.

### 2.1 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Fürst (2017) cita que se um experimento é realizado diversas vezes sob mesmas condições e os resultados obtidos não são iguais entre si, trata-se de um experimento envolvendo variáveis aleatórias. Se os resultados fossem sempre idênticos, as variáveis tratadas seriam de natureza determinística. Ainda em relação a essa definição, Montgomery e Runger (2002) conceituam que uma variável aleatória é uma função que atribui um número real a cada resultado no espaço amostral do experimento. As variáveis aleatórias podem ser classificadas como discretas, quando podem assumir um número finito ou infinito contável de valores, ou contínuas, quando a elas podem ser atribuídos quaisquer valores reais dentro de seus respectivos intervalos.

Em um problema estrutural, as variáveis fundamentais que definem e caracterizam o comportamento e a segurança são denominadas variáveis básicas. Cada variável básica pode ser descrita por uma distribuição de probabilidade

apropriada, caracterizada por parâmetros e representada por momentos estatísticos (MELCHERS, 1999). Em algumas circunstâncias, se a informação disponível a respeito das incertezas não for suficiente para estimar todos os momentos estatísticos, pode ser apropriado representar a variável apenas por uma estimativa de sua média, ou valor esperado, e sua variância (MELCHERS *et. al.*, 2018).

A partir da próxima seção há a apresentação dos conceitos e definições de funções de densidade de probabilidade, valor esperado, variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

### 2.1.1 Funções de Densidade de Probabilidade

Segundo Casella e Berger (2002), a probabilidade de que a variável aleatória  $X$  assumira qualquer valor igual ou menor que  $x$ , é chamada de função de distribuição acumulada de probabilidades:

$$F_X(x) = P[\{X \leq x\}]. \quad (2.1)$$

A derivada da Equação (2.1), em relação a  $x$ , é conhecida como função de densidade de probabilidades e dada por:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}. \quad (2.2)$$

As variáveis aleatórias são completamente caracterizadas por suas respectivas funções de densidade de probabilidade, que têm por objetivo descrever a distribuição de probabilidades dessas variáveis. Dentre as diversas funções existentes na literatura, na TABELA 1 estão apresentadas algumas das funções mais usuais e que são utilizadas no presente trabalho.

TABELA 1 – Funções de Densidade de Probabilidade

Distribuição	$f_X(x)$	Média ( $\mu$ )	Variância ( $\sigma^2$ )
Uniforme	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\mu$	$\sigma^2$

Distribuição	$f_X(x)$	Média ( $\mu$ )	Variância ( $\sigma^2$ )
Gumbel	$\beta \cdot \exp[-\beta \cdot (x - u_n) - e^{-\beta \cdot (x - u_n)}]$	$u_n + \frac{\gamma}{\beta} (*)$	$\frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\beta}$
Lognormal	$\frac{1}{\xi \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\xi}\right)^2\right]$	$\exp(\gamma + 0,5 \xi^2)$	$\mu [\exp(\xi^2) - 1]$

FONTE: Adaptado de ANG e TANG (2007) e de DEVORE (2005).

NOTA: (\*)  $\gamma = 0,577216$  (constante de Euler- Mascheroni).

### 2.1.2 Valor Esperado

A média de uma variável aleatória  $X$ , também conhecida como valor esperado ou esperança matemática, usa o modelo de probabilidade para ponderar os valores possíveis dessa variável, podendo ser descrito como o centro da função densidade de probabilidade. O valor esperado é dado por (WALPOLE *et. al.*, 2009):

$$E(X) = \mu_X = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Variância

A variância mede a dispersão dos dados em torno de sua média, sendo uma medida de dimensão igual ao quadrado da dimensão dos dados. Ela é definida por (BUSSAB e MORETTIN, 2009):

$$Var(X) = E[X - E(X)]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f_X(x) dx \quad (2.4)$$

### 2.1.4 Desvio padrão e coeficiente de variação

O desvio padrão também é uma medida de dispersão dos dados em torno de sua média, definida como a raiz quadrada positiva da variância, conforme (DEVORE, 2005):

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)} \quad (2.5)$$

Trata-se de uma medida que é muito afetada por mudanças de uma pequena porção dos dados, assim como a média amostral. Devido a essa característica, é possível comparar a variabilidade de dois conjuntos de dados, por meio do coeficiente de variação, que é dado pela razão entre o desvio padrão e a média amostral, de acordo com a Equação (2.6) (BUSSAB e MORETTIN, 2009):

$$CV = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (2.6)$$

## 2.2 PROBABILIDADE DE FALHA E ÍNDICE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Para que sejam estimadas probabilidades de estados indesejados da estrutura é necessário definir o que são os estados indesejados. Com esse propósito, é comum utilizar funções de estado limite, uma para cada modo de falha, que levam às respectivas equações de estado limite. Cada equação de estado limite corresponde a uma fronteira entre falha e segurança (NOWAK e COLLINS, 2000).

A Equação (2.7) pode ser utilizada para descrever um problema de confiabilidade estrutural, onde  $R(\mathbf{X})$  e  $S(\mathbf{X})$  representam a função de resistência e de solicitação da estrutura, respectivamente.  $\mathbf{X}$  é um vetor que agrupa as variáveis aleatórias utilizadas para descrever as incertezas do problema. Caso a função  $g(\mathbf{x})$  resulte menor ou igual a zero, significa que ocorre a falha da estrutura, enquanto que resultados positivos implicam a segurança da estrutura (BECK, 2014).

$$g(\mathbf{x}) = R(\mathbf{X}) - S(\mathbf{X}) \quad (2.7)$$

A função de estado limite  $g$  de uma estrutura, representada na Equação (2.7), é definida pelas variáveis aleatórias  $R$  e  $S$ . A partir dessa função, é possível definir a fronteira entre a falha e a sobrevivência da estrutura e, conseqüentemente, dividir o domínio estocástico em dois domínios complementares, conforme apresentados na Equação (2.8) e na Equação (2.9) (MELCHERS *et. al*, 2018):

- Domínio de segurança da estrutura:

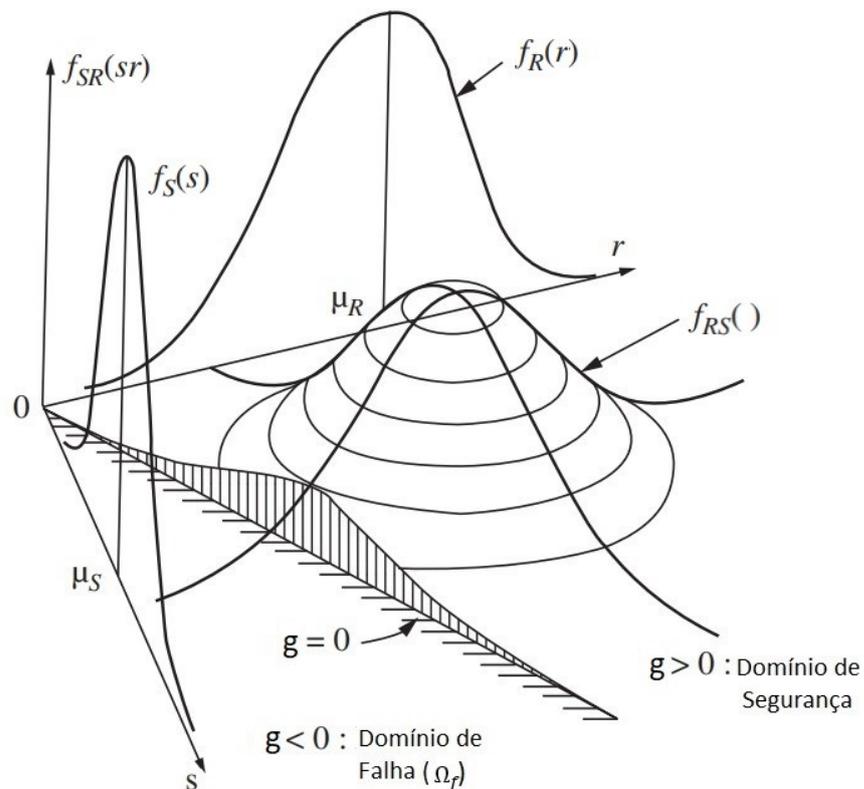
$$\Omega_s = \{ \mathbf{x} | g(\mathbf{x}) > 0 \} \quad (2.8)$$

- Domínio de falha da estrutura:

$$\Omega_f = \{x | g(x) \leq 0\} \quad (2.9)$$

A probabilidade de falha consiste na probabilidade de violação do estado limite, sendo definida pela Equação (2.9), que está relacionada à parte à esquerda da equação de estado limite,  $g(\mathbf{x})=0$ , correspondente ao domínio  $\Omega_f$ , na FIGURA 1.

FIGURA 1 – Função de estado limite e domínios de falha e segurança



FONTE: Adaptado de Melchers e Beck (2018).

A probabilidade de falha consiste na integração do conteúdo de probabilidades de todos os pontos que pertencem ao domínio de falha ( $\Omega_f$ ), como pode ser observado na Equação (2.10) (LEMAIRE, 2009):

$$P_f = P[\{R - S \leq 0\}] = P[\{g \leq 0\}] = \int_{\Omega_f} f_X(x) dx \quad (2.10)$$

A solução dessa integral pode ser obtida por meio de diversos métodos. Porém, como a função de densidade conjunta de probabilidade,  $f_X(x)$ , e o domínio de falha podem apresentar uma alta complexidade de determinação, muitas vezes os

resultados não podem ser obtidos por expressões matemáticas definidas (MELCHERS, 1999), sendo necessário utilizar métodos de confiabilidade estrutural. Dentre os métodos de solução, têm-se os métodos que utilizam simulação numérica, como a Simulação de Monte Carlo, empregada no presente trabalho.

Além disso, outra medida de segurança estrutural bastante utilizada na prática consiste no índice de confiabilidade,  $\beta$ . Ele está diretamente relacionado à probabilidade de falha, conforme dado pela Equação (2.11) (Ang e Tang, 1990).

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2.11)$$

### 2.3 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Segundo Beck (2014), a Simulação de Monte Carlo é uma simulação que envolve a utilização de números aleatórios, permitindo a solução de problemas extremamente complexos por não haver limite no número de variáveis do problema e na complexidade do modelo. O fator limitante para esse método consiste geralmente no alto custo computacional que, no entanto, tem melhorado exponencialmente nos últimos anos.

Também denominado de Monte Carlo direto ou simples, esse método consiste na realização de um elevado número de experimentos a partir da amostragem aleatória, de forma a simular um determinado evento (MELCHERS, 2010). Utiliza-se a separação do domínio de falha e do domínio de segurança por meio da definição de uma função indicadora  $I$ , tendo  $\mathbf{x}$  como o vetor dos valores atribuídos às variáveis aleatórias do experimento (Equação (2.12)).

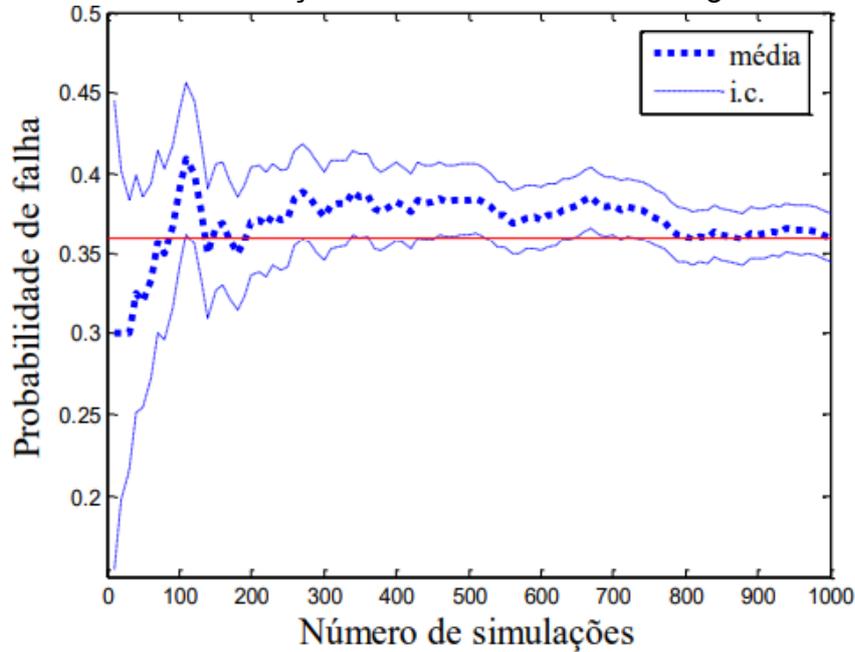
$$\begin{aligned} I[\mathbf{x}] &= 1, \text{ se } \mathbf{x} \in \Omega_f (g(\mathbf{x}) \leq 0) \\ I[\mathbf{x}] &= 0, \text{ se } \mathbf{x} \in \Omega_s (g(\mathbf{x}) > 0) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Após a execução de  $N$  experimentos, o valor da probabilidade de falha pode ser estimado de acordo com a Equação (2.13), que identifica o número de experimentos em que a falha acontece, por meio da soma dos valores  $I[\mathbf{x}_i]$ , e em seguida, divide pelo número total de experimentos.

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[x_i] \quad (2.13)$$

Com o aumento do tamanho da amostra, a probabilidade de falha aproximada tende a convergir para o valor teórico exato. Ou seja, um maior número de simulações tende a levar a resultados mais precisos, como exposto na FIGURA 2. Nessa figura, apresenta-se um intervalo de valores proveniente de estatísticas de amostras, conhecido como i.c. (intervalo de confiança). No caso ilustrado, esse intervalo é de 95%, o que implica que o valor estimado tem uma probabilidade de 95% de estar dentro do intervalo.

FIGURA 2 – Simulação de Monte Carlo - Convergência da  $P_f$



FONTES: Ricardo (2015).

Segundo Torii *et. al.* (2022), como a equação (2.13) está baseada em uma amostra de tamanho finito, está sujeita a um erro estatístico ou incerteza, dado pela variância de  $P_f$ , conforme a equação (2.14). Observa-se ainda nessa equação que essa incerteza diminui com o aumento do número de simulações  $N$ , tendendo a zero com  $N \rightarrow \infty$ .

$$Var[P_f] = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sqrt{P_f - P_f^2}}{P_f} \quad (2.14)$$

De acordo com Ditlevsen e Madsen (2007), utiliza-se o coeficiente de variação da probabilidade de falha dado pela equação (2.15) quando se pretende estimar o erro dos resultados simulados em termos estatísticos. Nela, nota-se que a avaliação de uma probabilidade de falha da ordem de  $10^{-p}$  com  $CV_{P_f} \leq 10\%$  requer cerca de  $10^{p+2}$  simulações. Ou seja, é necessário um elevado número de simulações para se obter alguns poucos pontos no domínio de falha, sendo que poucos pontos no domínio de falha geram uma grande variância dos resultados. Para problemas de confiabilidade estrutural, nos quais as probabilidades de falha são usualmente bastante pequenas, é comum serem necessárias milhões ou mesmo centenas de milhões de simulações.

$$CV_{P_f} = \frac{\sqrt{\text{Var}[P_f]}}{E [P_f]} \approx \frac{1}{\sqrt{NP_f}} \quad (2.15)$$

### 3 SEGURANÇA DE BARRAGENS

De acordo com Souza (2013), as primeiras barragens do Brasil foram construídas na região Nordeste e tiveram como função o combate à seca e a regularização de vazões de rios para irrigação. Dentre essas, a barragem mais antiga que se tem notícia em território brasileiro é conhecida nos dias de hoje como Açude Apipucos, provavelmente construída no final do século XVI e onde atualmente há a área urbana de Recife - Pernambuco (ANA, 2019).

Segundo Veról (2010), a partir do século XX houve um aumento significativo na quantidade de grandes barragens que, conforme classificação da ICOLD (*International Commission on Large Dams*), são aquelas com alturas superiores a 15 metros ou com altura entre 5 e 15 metros e reservatório com mais de 3 km<sup>2</sup>. Este aumento aconteceu principalmente por conta do crescimento populacional e da demanda gerada pelo desenvolvimento industrial. Nos dias atuais, em conformidade com os dados mais recentes da Comissão Internacional de Grandes Barragens, existem no mundo 58713 grandes barragens cadastradas, sendo que cerca de 1365 estão no Brasil (ICOLD, 2020).

Apesar das barragens contribuírem de forma singular para o desenvolvimento das civilizações, a segurança absoluta desse tipo de estrutura não é garantida, sendo o risco de rompimento um dos fardos inevitáveis que a civilização carrega, e uma responsabilidade básica da engenharia a de minimizar riscos como esse (JANSEN, 1983). Ainda em relação aos riscos, Menescal (2009) pontua que as barragens estão entre as estruturas civis mais perigosas — obtendo um dos níveis de incerteza mais altos de acordo com seu desempenho previsto. Essa informação baseia-se na complexidade da barragem, do ponto de vista da interação entre a sua estrutura e a sua fundação; em suas particularidades, onde cada uma é única, com tipos, porte e comportamentos individuais; e no fato delas sofrerem alta exposição às transformações da natureza.

Dentre os acidentes com barragens que aconteceram no Brasil, o pior deles foi a ruptura do açude de Orós no Ceará em 1960, apresentado na FIGURA 3. Nesse rompimento, a formação de uma brecha na estrutura gerou um galgamento, que destruiu o vale a jusante e se estendeu por aproximadamente 338 quilômetros, atingindo o Oceano Atlântico. Além disso, cerca de 1000 pessoas morreram (VERÓL, 2010).

FIGURA 3 – Rompimento do açude de Orós



FONTE: Rastelli (2010).

Em 2004, a barragem Camará de concreto compactado a rolo localizada a cerca de 150 quilômetros da capital João Pessoa, apresentou problemas na fundação devido a mau projeto e mau acompanhamento durante operação, que gerou uma onda de cheia, provocando 6 mortes e deixando mais de 3000 pessoas desabrigadas (VALENCIO, 2006).

Figura 4 – Rompimento da barragem de Camará



FONTE: Santos (sem data).

Mais recentemente, em 2019, ocorreu a ruptura da barragem de rejeitos do Córrego do Feijão em Brumadinho (MG). O acontecimento deixou cerca de quase 300 vítimas humanas e é considerado o maior acidente em relação a impacto social dos últimos anos (FIGURA 5(a)). No que diz respeito ao impacto ambiental, o rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG) ocorrido em 2015 é considerado o maior (FIGURA 5(b)). Nesse rompimento, a lama percorreu aproximadamente 663 quilômetros até chegar à costa marítima no estado do Espírito Santo (POLITIZE, 2019).

FIGURA 5 – Rompimentos das barragens de Brumadinho e de Mariana

(a) Rompimento da Barragem de Brumadinho



(b) Rompimento da Barragem de Mariana

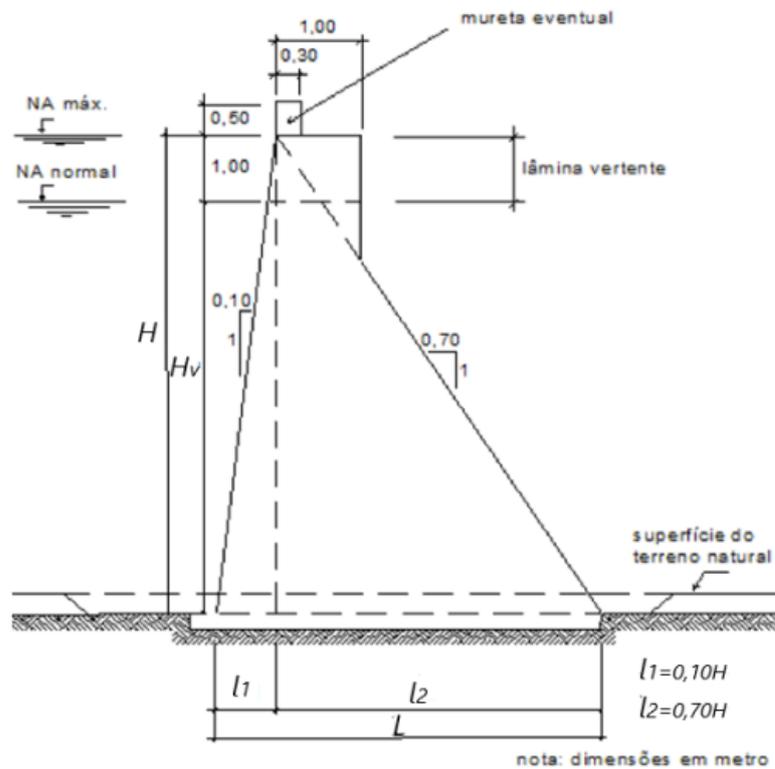


FONTE: (a) CNN Brasil (2021), (b) CNPEM (2020).

Com o intuito de minimizar o risco de rompimento dos barramentos para projetos de barragens de concreto, adota-se no Brasil como referência para dimensionamento, os Critérios de Projeto Cívico de Usinas Hidrelétricas, elaborado pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS, 2003), que é regido pelos princípios estabelecidos na norma brasileira “Ações e Segurança das Estruturas – NBR 8681/84”. Segundo esse referencial, a estabilidade global de barragens de concreto deve ser analisada para os modos de falha relacionados ao deslizamento, tombamento e flutuação, além das análises de tensões e deformações para todos os elementos estruturais e de fundações (ELETROBRÁS, 2003).

A seção típica para uma barragem de concreto é apresentada na FIGURA 6, sendo que, na maioria dos casos, adota-se uma seção com paramento de montante vertical em função dos cálculos de estabilidade (ELETROBRÁS, 2000).

FIGURA 6 – Seção Típica da Barragem de Concreto



Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2000).

sendo:

$H$  = altura da barragem;

$H_v$  = altura até a lâmina vertente;

$L$  = largura da base;

$l_1$  = distância entre o paramento de montante e o eixo vertical, na base;

$l_2$  = distância entre o paramento de jusante e o eixo vertical, na base.

A verificação da segurança segundo o documento anteriormente indicado se dá por critérios semi-probabilísticos, onde valores característicos são considerados para algumas variáveis de resistência e de solicitação e fatores de segurança são fundamentados em modelos e experimentos apresentados nos manuais *Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams*, do USBR e do *U.S. Department of the Interior*, além de terem como referências teóricas diversos livros e guias da Comissão Nacional Regional de Segurança de Barragens e de concessionárias de energia elétrica (ELETROBRÁS, 2003).

Por sua vez, a nível nacional e internacional, vários trabalhos relacionados à confiabilidade estrutural de barragens têm sido desenvolvidos, como *Reliability in*

*dams and the effects of spillway dimensions on risk levels* (YENIGUN E ERKEK, 2006); Análise de confiabilidade estrutural aplicada às barragens de concreto (KRUGER, 2012); *Reliability-Based Analysis of Concrete Dams* (BAYONA e FOUHY, 2014); Análise de confiabilidade de barragem de concreto construída (PIRES *et. al.*, 2019) e, por fim; *Study of structural stability of a concrete gravity dam using a reliability approach* (KERKAR E MIHOUBI, 2022).

Para que a estrutura seja verificada no que diz respeito à sua segurança, é necessário considerar as várias condições de carregamento que provavelmente ocorrerão ao longo de sua vida útil. Além disso, é necessário verificar a segurança em relação a cada um dos modos de falha mais significativos aos quais a estrutura está sujeita. Tais condições e modos de falha são brevemente descritos a partir da próxima seção.

### 3.1 CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Segundo o Manual de Critérios de Projetos de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), são considerados quatro casos de combinações de carregamentos para análise de estabilidade, sendo eles:

- a) Carregamento Normal (CCN), que corresponde a todas as combinações de ações que apresentem grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, considerando condições hidrológicas normais, durante a operação normal ou manutenção normal da obra;
- b) Carregamento Excepcional (CCE), que representa quaisquer ações de cargas de ocorrência eventual de baixa probabilidade, considerando apenas uma ação excepcional, tais como: condições hidrológicas excepcionais; falha no sistema de drenagem; manobra de caráter excepcional; efeito sísmico; etc.;
- c) Carregamento Limite (CCL), que retrata as combinações de ações com muito baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, considerando mais de uma ação excepcional dentre as ações citadas no tópico anterior;
- d) Carregamento de Construção (CCC), que se refere às combinações de ações com probabilidade de ocorrência durante a construção da obra — considerados como períodos curtos em relação à vida útil da estrutura e com

boas condições de controle. Como exemplo, há os próprios equipamentos de construção; carregamentos anormais durante o transporte de equipamentos permanentes; etc.

### 3.2 DESLIZAMENTO

Em um barramento, há muitas cargas horizontais ou com componentes na horizontal que são resistidas pela fricção ou pelas forças resistentes de cisalhamento ao longo do plano horizontal no corpo dessa estrutura; na sua fundação; nas juntas horizontais ou próximas delas. O colapso por deslizamento acontece quando as forças de solicitações no sentido horizontal são maiores do que as forças resistentes nesse mesmo sentido, sendo que essa resistência pode ser devido ao atrito ou também ao atrito combinado à resistência ao cisalhamento da ligação barragem-fundação (USBR, 1976).

Segundo o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2003), a verificação da estabilidade das estruturas ao deslizamento deve ocorrer selecionando as superfícies de ruptura de forma a incluir todos os planos de menor resistência possível, ou aqueles submetidos nas tensões críticas da estrutura, seja na fundação ou no contato estrutura-fundação. Em relação às análises dos fatores de segurança contra o deslizamento, deve-se incluir a coesão na resistência ao cisalhamento dos materiais rochosos ou no contato concreto-rocha, utilizando como valores básicos os parâmetros geomecânicos extraídos de ensaios e investigações preliminares.

Conforme o *Criteria For Design Of Solid Gravity Dams* (USBR, 1976) e o Livro de Critérios da Eletrobrás (ELETROBRÁS, 2003), o fator de segurança para deslizamento é definido por meio da equação:

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i t g(\phi_i)}{FSD\phi} + \frac{\sum C_i A_i}{FSDc}}{\sum T_i} \geq 1 \quad (3.1)$$

sendo:

$FSD$  = fator de segurança ao deslizamento;

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

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

$\sum Ni$  = somatório das forças normais à superfície de deslizamento, em análise;  
 $\phi_i$  = ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento, em análise;  
 $C_i$  = coesão característica ao longo da superfície de deslizamento;  
 $A_i$  = área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise;  
 $\sum Ti$  = somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

Pontua-se ainda que os fatores de redução da resistência ao atrito e a coesão a serem utilizados na verificação são aqueles apresentados na TABELA 2 (ELETROBRÁS, 2003).

TABELA 2 – Fatores de Redução da Resistência da Coesão e do Atrito

Fator de Redução	Condições de carregamento			
	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>φ</sub>	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)

FONTE: Eletrobrás (2003).

Esses valores devem ser adotados considerando os parâmetros de resistência dos materiais envolvidos. Mas caso o conhecimento desses materiais seja precário, ou não apresentem constância no comportamento, deve-se adotar os valores indicados entre parênteses (ELETROBRÁS, 2003).

### 3.3 TOMBAMENTO

A resistência ao tombamento é calculada ao considerar todas as forças verticais e laterais para cada condição de carregamento da barragem e realizando a soma dos momentos causados pelas forças resultantes num ponto localizado na posição mais extrema a jusante, na base da barragem (*US Army Corps Of Engineers*, 1995). Segundo Kruger (2008), os momentos estabilizadores incluem o momento resultante do peso próprio da estrutura, das cargas permanentes mínimas e de possíveis equipamentos permanentes instalados. Já os momentos tombadores são os gerados pelo peso próprio da pressão hidrostática, subpressão e empuxos da terra. O manual Critérios de Projeto Civil para Usinas Hidrelétricas (2003) define o fator de segurança de estabilidade contra tombamento pela Equação (3.2):

$$FST = \frac{\sum Me}{\sum Mt} \quad (3.2)$$

onde:

$FST$  = fator de segurança ao tombamento;

$\sum Me$  = somatório dos momentos estabilizantes;

$\sum Mt$  = somatório dos momentos de tombamento.

### 3.4 FLUTUAÇÃO

Segundo Broberg e Thorwid (2015), a flutuação é o fenômeno que acontece quando as forças que agem na base da barragem, de baixo pra cima, são maiores que as forças resultantes do peso próprio, ou seja, quando os esforços de subpressão são muito grandes. O fator de segurança a flutuação é definido pela Equação (3.3) (ELETROBRÁS, 2003):

$$FST = \frac{\sum V}{\sum U} \quad (3.3)$$

sendo:

$FSF$  = fator de segurança à flutuação;

$\sum V$  = somatório das forças gravitacionais;

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

Ainda conforme Eletrobrás (2003), os valores mínimos aceitáveis dos fatores de segurança são aqueles apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 – Valores Mínimos dos fatores de segurança

Fator de Segurança	Condições de carregamento			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSD	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$
FST	1,5	1,2	1,1	1,3
FSF	1,3	1,1	1,1	1,2

FONTE: Adaptado de Eletrobrás (2003).

## 4 FUNÇÕES DE ESTADO LIMITE

Considerando as informações apresentadas nos tópicos anteriores sobre as características do conjunto barragem-fundação, as condições de carregamento e os modos de falha, neste capítulo são apresentadas as funções de estado limite. A formulação aqui apresentada baseia-se ainda em um artigo sobre análise de confiabilidade de uma barragem de concreto construída (PIRES *et. al.*, 2019).

Partindo da equação (2.7), tem-se que a função de estado limite para o deslizamento ao longo da superfície em análise é definida por:

$$g_1 = T_R - T_S \quad (4.1)$$

sendo:

$T_R$  = somatório das forças resistentes na superfície de escorregamento;

$T_S$  = somatório das forças atuantes paralelas à superfície de escorregamento.

Considerando as diferentes parcelas de força resistente, são obtidas as seguintes expressões:

$$g_1 = N' \tan \phi_i + cA - T_S \quad (4.2)$$

$$g_1 = (V_c \gamma_c + W_{w1} - U - U_c + W_{w2}) \tan \phi_i + cA - T_S \quad (4.3)$$

sendo:

$N'$  = somatório das forças normais à superfície de escorregamento;

$\phi_i$  = ângulo de atrito interno da interface concreto-rocha;

$c$  = coesão da interface concreto-rocha;

$A$  = área efetiva comprimida;

$\gamma_c$  = peso específico do concreto;

$V_c$  = volume de concreto;

$W_{w1}$  = peso de água a montante;

$U$  = somatório das forças de subpressão atuantes;

$U_c$  = subpressão atuante na abertura de fissura, quando houver;

$W_{w2}$  = peso de água a jusante.

O somatório das forças de subpressão atuantes ( $U$ ) é obtido de acordo com a equação:

$$U = \left( \frac{x_{d1} (h_1 + h_3)}{2} + \frac{x_{d2} (h_3 + h_2)}{2} \right) \gamma_w \quad (4.4)$$

sendo:

$x_{d1}$  = distância entre os drenos e o paramento de montante ou final da fissura quando houver;

$x_{d2}$  = distância entre os drenos e o paramento de jusante;

$h_1$  = altura de água a montante;

$h_2$  = altura de água a jusante;

$h_3$  = a altura de água equivalente a subpressão na linha de drenagem, que pode ser obtida pelas expressões:

$$h_3 = k (h_1 - h_4) + h_4 \quad (\text{para nível normal do reservatório}) \quad (4.5)$$

$$h_3 = k [(h_1 + i_u h_{y1}) - h_4] + h_4 \quad (\text{para nível máximo do reservatório}) \quad (4.6)$$

sendo:

$k$  = coeficiente de ineficiência hidráulica;

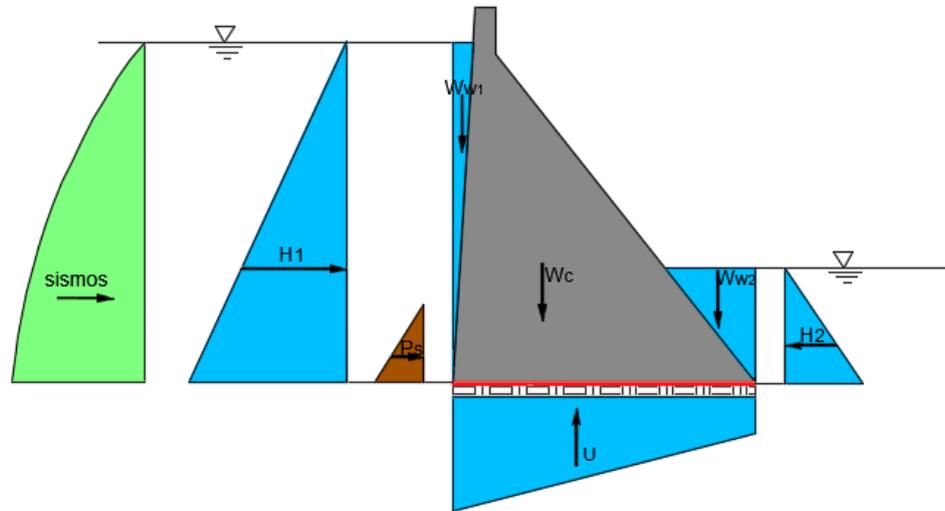
$h_4$  = altura da galeria de drenagem em relação a interface concreto-rocha;

$i_u$  = coeficiente de incremento de subpressão;

$h_{y1}$  = diferença de altura entre o nível máximo e o nível normal do reservatório.

Na FIGURA 7 há uma representação das forças envolvidas ao analisar o modo de falha por deslizamento, considerando o plano horizontal em vermelho como a superfície de escorregamento. O somatório das forças normais na superfície é dado pelo peso do concreto da barragem ( $W_c$ ), da água a montante ( $W_{w1}$ ), e a jusante ( $W_{w2}$ ) e das forças de subpressão ( $U$ ), e o somatório das forças atuantes paralelas à superfície de escorregamento por sismos, empuxo hidrostático a montante ( $H_1$ ) e a jusante ( $H_2$ ), e assoreamento ( $P_s$ ).

FIGURA 7 – Representação das forças atuantes no modo de falha por deslizamento



FONTE: Elaborado pela autora por meio da plataforma *AutoCAD* (2022).

Para o tombamento, a função de estado limite em relação ao ponto mais extremo a jusante da superfície em análise é definida pela equação:

$$g_2 = M_R - M_S \quad (4.7)$$

onde:

$M_R$  = somatório dos momentos resistentes;

$M_S$  = somatório dos momentos solicitantes que sejam favoráveis ao tombamento.

Substituindo pelos momentos envolvidos na análise em questão, tem-se que:

$$g_2 = (M_{w_{w1}} + M_{w_c} + M_{w_{w2}} + M_{H_2}) - (M_U + M_{U_c} + M_{H_1}) \quad (4.8)$$

sendo:

$W_{w1}$  = peso de água a montante;

$W_c$  = peso do concreto da barragem;

$W_{w2}$  = peso de água a jusante;

$H_2$  = empuxo hidrostático a jusante;

$U$  = subpressão;

$U_c$  = subpressão atuante na abertura da fissura quando houver;

$H_1$  = empuxo hidrostático a montante.

Expandindo a Equação (4.8), a função de estado limite para o tombamento é escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 g_2 = & (W_{w1}l_{w1}) + (W_c l_{wc}) + (W_{w2}l_{w2}) + \left(\frac{h_2^3}{6} \gamma_w\right) \\
 & - \left[ \frac{x_{d1}^2}{6} (h_3 + 2h_1) + \frac{x_{d1}x_{d2}}{2} (h_1 + h_3) + \frac{x_{d2}^2}{6} (h_2 + 2h_3) \right] \gamma_w \quad (4.9) \\
 & - (h_1 L_c \gamma_w l_c) - \left(\frac{h_1^3}{6} \gamma_w\right)
 \end{aligned}$$

onde:

$l_{w1}$  = distância horizontal entre o centro de massa de água a montante e o paramento de jusante na superfície de referência;

$l_{wc}$  = distância horizontal entre o centro de massa do concreto da barragem e o paramento de jusante na superfície de referência;

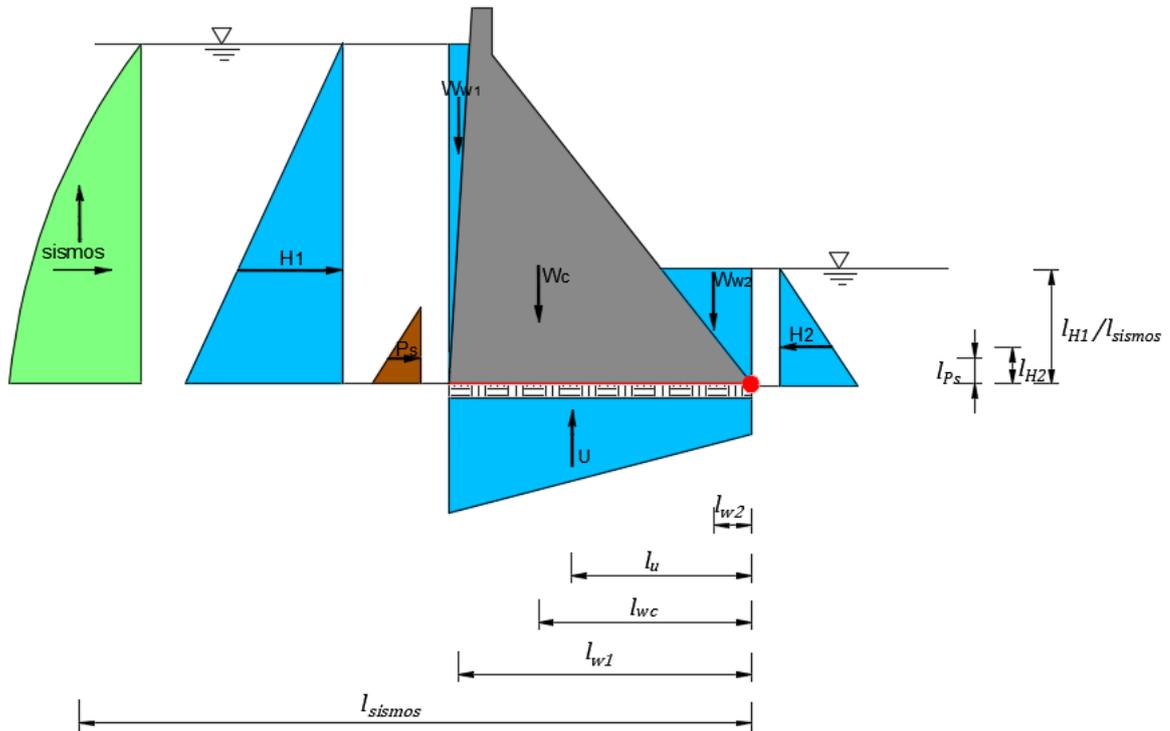
$l_{w2}$  = distância horizontal entre o centro de massa de água a jusante e o paramento de jusante na superfície de referência;

$L_c$  = comprimento da fissura quando houver;

$l_c$  = distância horizontal entre o centro da fissura e o paramento de jusante na superfície de referência.

Na FIGURA 8 há uma representação das forças que geram os momentos no modo de falha por tombamento, considerando o círculo em vermelho como o ponto em análise, e dos respectivos braços de alavanca em relação a esse ponto. O somatório dos momentos resistentes é dado pelas forças do peso do concreto da barragem ( $W_c$ ), da água a montante ( $W_{w1}$ ), e a jusante ( $W_{w2}$ ) e do empuxo hidrostático a jusante ( $H_2$ ), o somatório dos momentos solicitantes é dado pelas forças de forças de subpressão ( $U$ ), do empuxo hidrostático a montante ( $H_1$ ), dos sismos e do assoreamento ( $P_s$ ).

FIGURA 8 – Representação das forças atuantes no modo de falha por tombamento



FONTE: Elaborado pela autora por meio da plataforma AutoCAD (2022).

O último modo de falha analisado no presente estudo, a flutuação em relação a superfície em análise, tem função de estado limite definida pela expressão:

$$g_3 = N - U \quad (4.10)$$

$$g_3 = W_c + W_{w1} + W_{w2} - U - U_c \quad (4.11)$$

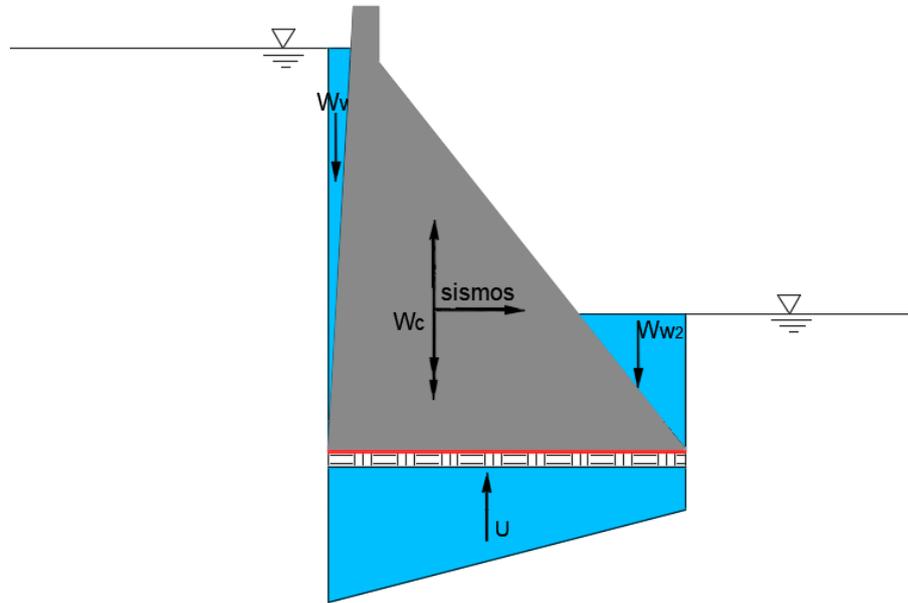
sendo:

$N$  = somatório das forças gravitacionais;

$U$  = somatório das forças subpressão atuantes.

Na FIGURA 9 há uma representação das forças envolvidas no modo de falha por flutuação, e é possível observar que as forças da análise são apenas na direção vertical. O somatório das forças gravitacionais é dado pelas forças do peso do concreto da barragem ( $W_c$ ), da água a montante ( $W_{w1}$ ), e a jusante ( $W_{w2}$ ), contra o somatório das forças de subpressão ( $U$ ).

FIGURA 9 – Representação das forças atuantes no modo de falha por flutuação



Fonte: Elaborado pela autora por meio da plataforma *AutoCAD* (2022).

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 DESCRIÇÃO GERAL DA BARRAGEM

A Usina Hidrelétrica (UHE) Santa Clara, empreendimento da ELEJOR - Centrais Elétricas do Rio Jordão, fica localizada na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, sub-bacia do rio Paraná, tendo à sua margem direita o município de Candói, e à margem esquerda o município de Pinhão, ambos pertencentes ao estado do Paraná.

FIGURA 10 – Mapa de Localização da Barragem Santa Clara



FONTE: Adaptado de *Google Satellite* e *ESRI Terrain* (2022).

O empreendimento foi concebido de modo a aproveitar a queda natural existente ao longo da curva em forma de “U” que o rio Jordão faz para a esquerda, a jusante do local da barragem.

A estrutura do barramento está dividida em três trechos: a barragem da margem direita, o vertedouro de soleira livre em degraus e a barragem da margem esquerda. Maior parte dela é feita em concreto compactado com rolo (CCR), do tipo gravidade. Possui altura máxima de aproximadamente 67 metros, e comprimento total da crista (com vertedouro) de 618 metros, estando na cota 811,00 metros. A barragem é composta por um total de 33 blocos de concreto separados por juntas de contração.

FIGURA 11 – Barragem de Santa Clara (UHE Santa Clara)



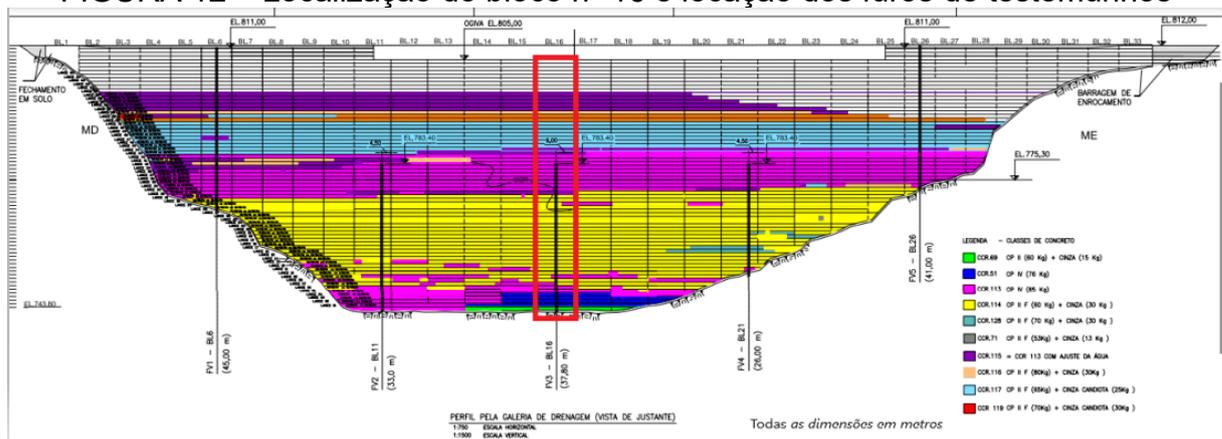
FONTE: ELEJOR (sem data).

O vertedouro foi dimensionado para a cheia decamilenar, compreende uma soleira livre vertente de 251,0 metros e declividade a jusante de 0,75H:1,0V disposta sobre o maciço de CCR. Do tipo soleira vertente, não apresenta comporta para controle de vazão, e possui crista na elevação 805,00 metros. Com o intuito de reduzir a energia do escoamento e facilitar a construção da barragem, a calha do vertedouro apresenta degraus com altura de 0,60 metros e largura de 0,90 metros.

Para a realização deste estudo, adotou-se o bloco nº 16 da barragem. Tal preferência é justificada por sua localização no centro do barramento (FIGURA 12),

na soleira vertente, uma região considerada mais crítica quando comparada com as ombreiras devido à altura da lâmina d'água no bloco. Ademais, ainda nessa figura, têm-se a localização dos furos de testemunhos, onde no bloco nº 16 o furo correspondente é o FV-3.

FIGURA 12 – Localização do bloco nº 16 e localização dos furos de testemunhos



FONTE: ELEJOR (2005)

Ainda em relação ao bloco adotado na análise, este possui largura de 18 metros por ser um bloco do vertedouro, e essa ser a largura dos blocos localizados no vertedouro neste estudo de caso. Já a altura é variada, a depender da situação que se encontra a fundação, como por exemplo, irregularidade no topo rochoso. Além disso, ele está assentado sobre rocha basáltica. Na TABELA 4 estão expostos os resultados relacionados à caracterização da densidade deste bloco.

TABELA 4 – Dados da densidade do testemunho do bloco nº 16

TESTEMUNHO	Informações do ensaio	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
FV-3	Amostras ensaiadas	140,00
	Valor Médio	2603,24
	Valor Máximo	2684,52
	Valor Mínimo	2411,06
	Desvio Padrão	40,19
	Coefficiente de Variação (CV)	0,02

FONTE: ELEJOR (2005).

## 5.2 CONDIÇÕES DAS ANÁLISES

O presente trabalho se delimita às verificações de estabilidade para condição de carregamento normal (CCN), condições de carregamento excepcional (CCE) e

condição de carregamento limite (CCL), de forma a avaliar os modos de falha ao deslizamento, tombamento e a flutuação.

A CCN considera a estrutura submetida aos carregamentos referentes ao nível de água do reservatório normal (NA 805,00 m) e subpressão com drenagem operante. A CCE1 considera a estrutura submetida aos carregamentos referentes ao nível de água do reservatório normal (NA 805,00 m) e subpressão com drenagem inoperante. A CCE2 considera a estrutura submetida aos carregamentos referentes ao nível de água do reservatório máximo (NA 810,15 m) e subpressão com drenagem operante. Por fim, a CCL considera a estrutura submetida aos carregamentos referentes ao nível de água do reservatório máximo (NA 810,15 m) e subpressão com drenagem inoperante. Pontua-se ainda que as análises não consideraram os carregamentos devido a eventos de sismo, neste trabalho.

Na elevação máxima, o nível de água do reservatório corresponde a uma coluna de água de 67,23 m a montante ( $h_1$ ) e 6,28 m a jusante ( $h_2$ ) da barragem. Por outro lado, o nível de água do reservatório na elevação normal corresponde a uma coluna d'água de 62,08 m a montante e inexistente a jusante da barragem. Esse nível a jusante se deve ao fato de que quando o reservatório está em seu nível normal, não há vertimento e o volume de água que passa é normalmente pequeno, devido a vazão sanitária. A coluna d'água fica praticamente na mesma altura da fundação, sendo irrisória a ponto de não interferir na estabilidade da estrutura.

### 5.3 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Na TABELA 5 são apresentadas as variáveis aleatórias definidas para a análise em questão, na qual foi utilizada como referência a Avaliação dos Resultados dos Corpos de prova da barragem de CCR; o relatório das Análises Geotécnicas elaboradas pela Nova Engevix (2022) e os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2003). Nesta tabela também são descritas as respectivas distribuições estatísticas e seus parâmetros de média e desvio padrão.

TABELA 5 – Resumo das variáveis aleatórias

Variáveis aleatórias (V.A.)	Unidade	Distribuição	Média	SD	CV (%)
Peso específico do concreto ( $\gamma_c$ )	kN/m <sup>3</sup>	Normal	25,50	1,38	5
Ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ )	-	Normal	45	12,15	27

Variáveis aleatórias (V.A.)	Unidade	Distribuição	Média	SD	CV (%)
Coesão do contato concreto-rocha (c)	kN/m <sup>2</sup>	Lognormal	800	320,00	40
Coefficiente de ineficiência hidráulica (k)	-	Normal	0,33	0,10	30

FONTE: Adaptado de ELEJOR (2005), de Nova Engevix (2022) e de China Electricity Council (2000).

A seguir é apresentada uma breve discussão a respeito de cada uma dessas variáveis.

### 5.3.1 Peso Específico do Concreto

Os parâmetros estatísticos da distribuição de probabilidades do peso específico do concreto foram definidos conforme informações e dados do documento de Avaliação dos Resultados dos Corpos de Prova da Barragem de CCR, elaborado pelo consórcio Triunfo, Intertechne e IMPSA em 2005, no qual o peso específico é de 25,5 kN/m<sup>3</sup>. De acordo com as 140 amostras ensaiadas cujos resultados são apresentados nesse documento, o desvio padrão adotado foi de 1,38, o que corresponde a um coeficiente de variação de 5%.

### 5.3.2 Ângulo de Atrito Interno e Coesão do Contato Concreto-rocha

Os parâmetros geomecânicos da fundação, ângulo de atrito interno e coesão do contato concreto-rocha utilizados nas análises de estabilidade estão indicados no Relatório de Avaliação da Fundação da Barragem e entorno do Reservatório, Usina e Acessos, elaborado pela Nova Engevix em 2022. Nele, o valor de 45° para o ângulo de atrito foi o adotado a favor da segurança, por ser o menor ângulo de atrito (referente ao concreto) dentre os materiais envolvidos, no contato concreto x rocha. Para a coesão, o valor adotado é de 800 kN/m<sup>2</sup>. Os coeficientes de variação de 27% para o ângulo de atrito interno e de 40% para a coesão têm como referência o *China Electricity Council* (2000).

### 5.3.3 Coeficiente de Ineficiência Hidráulica

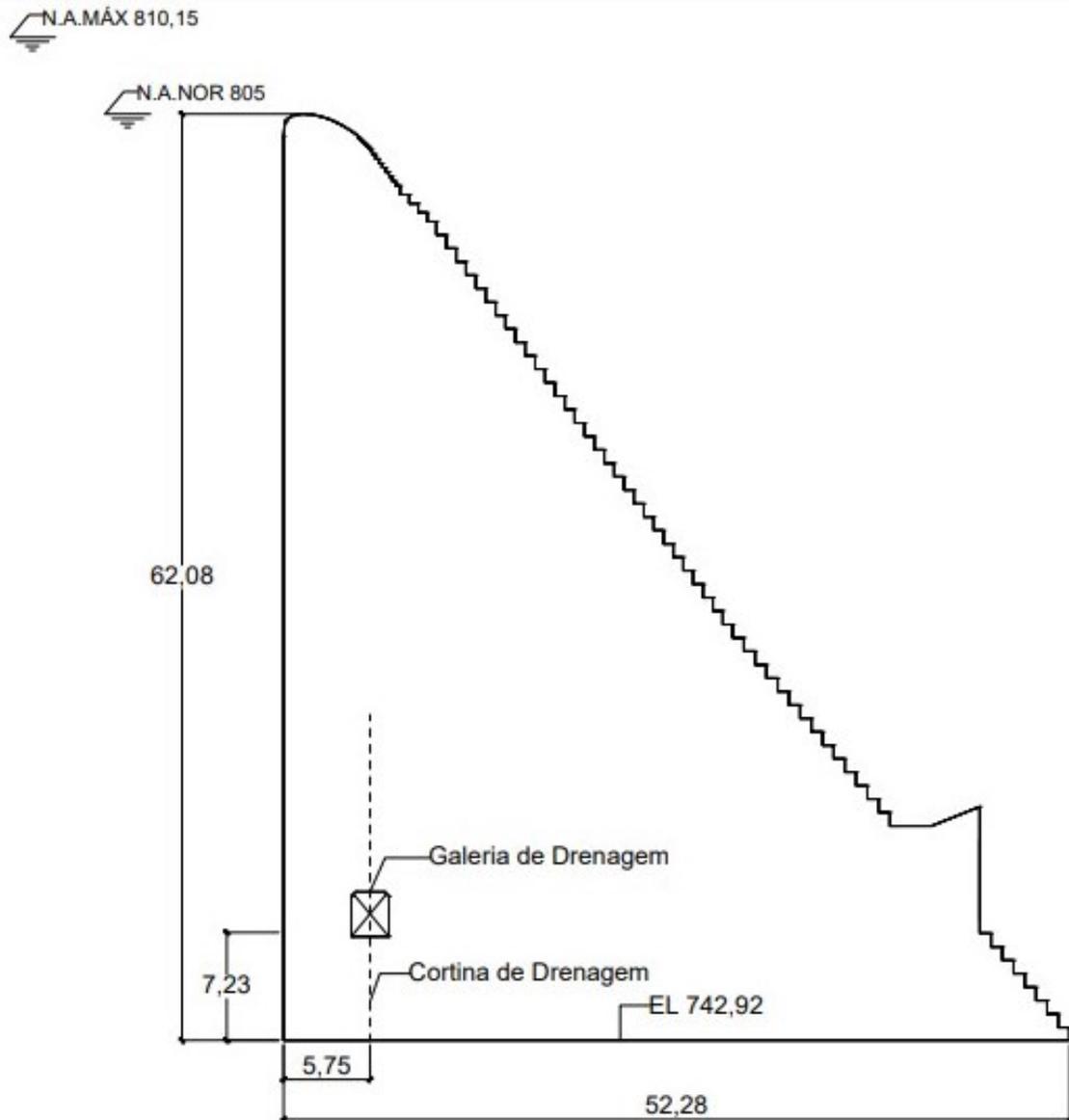
Segundo Pires, Futai, Bittencourt e Beck (2019), os cálculos da subpressão atuante na fundação das barragens de concreto normalmente são baseados na lei de Darcy, que prevê a redução linear de pressão de montante para a jusante. Além disso, quando não há sistema de drenagem na fundação da barragem ou está inoperante, não ocorre uma redução do diagrama das subpressões em função da operação e existência do sistema de drenagem.

Para situações normais de drenagem, a Eletrobrás (2003) adota um coeficiente de ineficiência hidráulica de 0,33 que consiste em critérios semelhantes aos estabelecidos pelo USBR (1976), no manual *Design of Gravity Dams*. Como não há informações do histórico de dados de monitoramento da subpressão atuante na fundação do barramento, optou-se por utilizar o mesmo coeficiente de variação do barramento analisado em Pires, Futai, Bittencourt e Beck (2019), que é de 30%.

## 5.4 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DETERMINÍSTICOS

Na FIGURA 13 é apresentada a geometria da seção transversal da soleira vertente e, com isso, realiza-se a definição dos parâmetros determinísticos da estrutura em análise. Ressalta-se que se optou por utilizar um trecho representativo de largura unitária conforme usualmente efetuado em projetos pelas características da estrutura, bem como para atender as necessidades do presente estudo.

FIGURA 13 – Geometria da Soleira Vertente



Todas as dimensões em metros

FONTE: Elaborado pela autora por meio da plataforma *AutoCAD* (2022).

Na TABELA 6, por sua vez, são apresentados os parâmetros determinísticos comuns a todas as condições de carregamento.

TABELA 6 – Parâmetros determinísticos comuns a todas as condições de carregamento

Parâmetro	Unidade	Dados
Volume do concreto ( $V_c$ )	$m^3$	1736,31
Peso de água a montante ( $W_{w1}$ )	kN	0
Peso específico da água ( $\gamma_w$ )	$kN/m^3$	10
Área efetiva comprimida ( $A$ )	$m^2$	52,28

FONTE: Adaptado de Nova Engevix (2022).

O peso de água a montante é considerado zero devido ao paramento a montante ser vertical e, então, a força vertical desse peso não incide sob o barramento de concreto, sendo desconsiderada para os somatórios de forças das análises desse estudo.

Para os cenários que possuem subpressão com drenagem operante (CCN e CCE2), são necessários alguns parâmetros referentes aos drenos e às lâminas d'água, estando apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – Parâmetros determinísticos da CCN e da CCE2

Parâmetro	Unidade	CCN	CCE2
Diferença de altura entre o nível máximo e o nível normal do reservatório ( $h_{y1}$ )	m	5,15	
Coefficiente de incremento de subpressão ( $i_u$ )	-	1	
Distância entre os drenos e o paramento de montante ( $x_{d1}$ )	m	5,75	
Distância entre os drenos e o paramento de jusante ( $x_{d2}$ )	m	46,53	
Altura da galeria de drenagem em relação a interface concreto-rocha ( $h_4$ )	m	7,23	
Peso de água a jusante ( $W_{w2}$ )	kN	0	141,31
Altura de água a montante ( $h_1$ )	m	62,08	67,23
Altura de água a jusante ( $h_2$ )	m	0	6,28

FONTE: Adaptado de Nova Engevix (2022).

O coeficiente de incremento de subpressão é para os casos de eventos excepcionais de nível de água do reservatório. A reação da elevação da subpressão depende de como as descontinuidades são influenciadas pelas tensões induzidas pelo sistema barragem-reservatório. Como esses eventos são raros e com pouca duração, é difícil ter dados de monitoramento que possibilitem a compreensão do comportamento real, sendo plausível considerar a ocorrência de variações lentas e repentinas das subpressões (RUGGERI *et. al.*, 2004). Dessa forma, definiu-se o coeficiente de incremento de subpressão como parâmetro determinístico, igual a 1.

Referente ao peso de água a jusante, considera-se o explicado no tópico 5.3 no qual na elevação normal não há vertimento. Nesse caso, a coluna d'água fica praticamente na mesma altura da fundação e, conseqüentemente, seu peso sob o barramento é desprezável. Para o caso de elevação máxima, o peso de água é considerado conforme coluna d'água de 6,28m. Ainda nessas duas condições de

carregamento, tem-se que as distâncias entre os drenos e o paramento de montante e de jusante são de 5,75 e 46,53 metros, respectivamente.

Para os cenários que não possuem drenagem operante (CCE1 e CCL), os parâmetros obtidos estão expostos na TABELA 8, sendo que essas duas condições levam em conta os somatórios de forças de subpressão calculados de maneira determinística, conforme apresentado a seguir.

TABELA 8 – Parâmetros determinísticos da CCE e da CCL

Parâmetro	Unidade	CCE1	CCL
Peso de água a jusante ( $w_{w2}$ )	kN	0	141,31
Altura de água a montante ( $h_1$ )	m	62,08	67,23
Altura de água a jusante ( $h_2$ )	m	0	6,28
Somatório de forças de Subpressão (U)	kN	16205,25	19328,68

FONTE: Adaptado de Nova Engevix (2022).

Pontua-se que os modos de falha de deslizamento e de tombamento possuem algumas especificidades determinísticas. Em relação ao deslizamento, o parâmetro é o somatório das forças horizontais paralelas a superfície de análise e, ao tombamento, é a distância horizontal entre o centro de gravidade do peso de água a jusante até o ponto de análise.

TABELA 9 – Parâmetros determinísticos específicos do deslizamento e do tombamento

Parâmetro	Unidade	CCN	CCE1	CCE2	CCL
Somatório de Forças horizontais ( $T_s$ )	m <sup>3</sup>	19268,47	19268,47	22545,58	22545,58
Distância do centro de gravidade até o ponto de tombamento ( $l_{w2}$ )	kN	-	-	1,5	1,5

FONTE: Nova Engevix (2022).

## 5.5 VALORES ALVO

Na literatura, o índice de confiabilidade exigido para que a segurança mínima seja atendida altera muito, não possuindo um valor fixo. Essas alterações ocorrem por conta de experimentos, testes e ensaios de cada autor, ocasionando resultados diferentes de probabilidade de falha dos elementos estruturais. Atualmente, os índices mais consolidados são aqueles indicados pelas normas internacionais e, no entanto,

essas normas não estão relacionadas a barragens. Como no *Probabilistic Model Code* (JCSS, 2001) que baseia-se nas dimensões das consequências, devido a uma falha e no custo relativo a segurança, onde considerando grandes consequências e custo normal, o valor do índice é de 4,4. Na norma do *American Concrete Institute* (ACI, 2003), o  $\beta$  alvo para viga é de 3,5 e para laje é de 2,5.

Para a avaliação das probabilidades de falha obtidas nesse trabalho, assume-se os valores da norma do Comitê Europeu de Normatização [CEN] (2002), que recomenda índices de confiabilidade conforme a classe de consequência da estrutura. No entanto, essa norma também não está relacionada a barragens. Considerando a consequência alta para perda de vida humana ou consequências econômicas, sociais ou ambientais muito grandes e o período de vida útil de 50 anos, o  $\beta$  alvo é de 4,3.

## 5.6 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método de simulação numérica de Monte Carlo foi utilizado para o cálculo da confiabilidade estrutural por meio do software *Risk Tools* (*Rt*) de Mahsuli e Haukaas (2013). Esse programa contém uma biblioteca de modelos e métodos, abrangendo uma ampla compilação de dados e podendo aplicar diversos métodos de confiabilidade, como o método de Monte Carlo direto ou simples.

O processo iterativo da simulação de Monte Carlo requer um alto número de simulações para que seja possível alcançar um resultado com precisão adequada. O software *Rt* é executado até que o número máximo de simulações seja atingido ou até que o coeficiente de variação da  $Pf$  resulte menor que o valor alvo. Ao atingir um desses dois valores de parada, o programa informa a quantidade de simulações realizadas; a probabilidade de falha; o índice de confiabilidade e o coeficiente de variação da estimativa da probabilidade de falha.

No presente trabalho, o coeficiente de variação da  $Pf$  assumido como critério de parada foi de 2%, conforme recomendado pelo programa utilizado. Este valor está de acordo com o indicado na literatura como aceitável, que se encontra no intervalo entre 1% e 10% (MÍNGUEZ, 2012).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada um dos três modos de falha, são analisadas quatro condições de carregamento, resultando em doze probabilidades de falha a serem determinadas. A depender da probabilidade a ser estimada, há necessidade de maior ou menor número de simulações para obtenção de resultados com precisão adequada. Os respectivos índices de confiabilidade são obtidos utilizando a Equação (2.11).

As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados para cada um dos modos de falha, respectivamente, para cada uma das condições de carregamento consideradas. São apresentados os fatores de segurança; os valores das funções avaliados deterministicamente considerando os valores médios das variáveis aleatórias as probabilidades de falha; os índices de confiabilidade; os coeficientes de variação das probabilidades de falha estimadas e, por fim; o total de simulações necessárias.

TABELA 10 – Resultados relativos ao deslizamento

	CCN	CCE1	CCE2	CCL
$FSD_{mín}$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$
$FSD$	3,11	2,43	2,58	2,06
$g_1$ (kN)	58396,66	50603,82	52741,14	44205,76
$P_f$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-4}$
$\beta$	3,65	3,62	3,51	3,36
CV	$2,74 \cdot 10^{-2}$	$2,61 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$
#Simulações	10000000	10000000	10000000	6467877

FONTE: Elaborado pela autora (2022).

TABELA 11 – Resultados relativos ao tombamento

	CCN	CCE1	CCE2	CCL
$FST_{mín}$	1,5	1,2	1,2	1,1
$FST$	2,16	1,59	1,89	1,33
$g_2$ (kN·m)	821232,78	564454,90	722284,27	380207,85
$P_f$	Probabilidade de falha próxima a zero			$2,6 \cdot 10^{-6}$
$\beta$				4,56
CV				$1,96 \cdot 10^{-2}$
#Simulações	10000000	10000000	10000000	10000000

FONTE: Elaborado pela autora (2022).

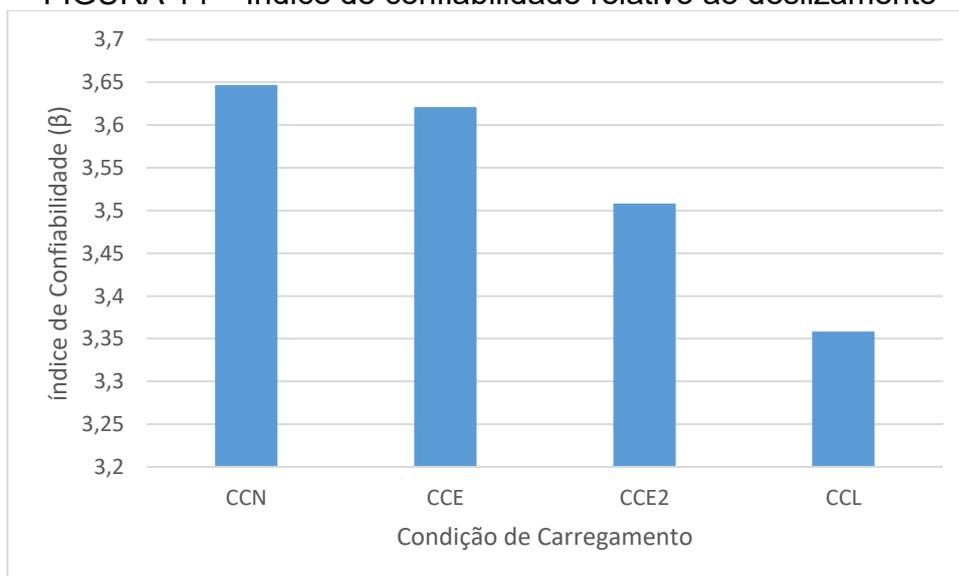
TABELA 12 – Resultados relativos a flutuação

	CCN	CCE1	CCE2	CCL
$FSF_{\text{mín}}$	1,3	1,1	1,1	1,1
$FSF$	5,27	5,16	4,08	2,29
$g_3$ (kN)	35869,69	35695,13	33568,65	24947,20
$P_f$	Probabilidade de falha próxima a zero			
$\beta$				
CV				
#Simulações	10000000	10000000	10000000	10000000

FONTE: Elaborado pela autora (2022).

Referente ao modo de falha por deslizamento, da FIGURA 14 infere-se, conforme esperado, que quando há um aumento no nível de água no reservatório, e/ou considera-se a drenagem inoperante, tem-se um aumento significativo da probabilidade de falha. Acrescenta-se ainda que esse aumento da  $P_f$  de modo geral ocorre da CCN, na qual o nível é normal e a drenagem é operante, até a CCL, na qual o nível é máximo, e a drenagem é inoperante. Entretanto, em relação aos cenários que possuem nível máximo ou drenagem inoperante (CCE e CCE2), é possível observar pela TABELA 10 que mesmo o fator de segurança associado sendo maior para o cenário com nível máximo, a probabilidade de falha é maior do que aquela da condição CCE, que possui drenagem inoperante. Dessa forma, conclui-se que nesse modo de falha, considerando os dados utilizados, o nível do reservatório tem mais influência no índice de confiabilidade do que a drenagem.

FIGURA 14 – Índice de confiabilidade relativo ao deslizamento

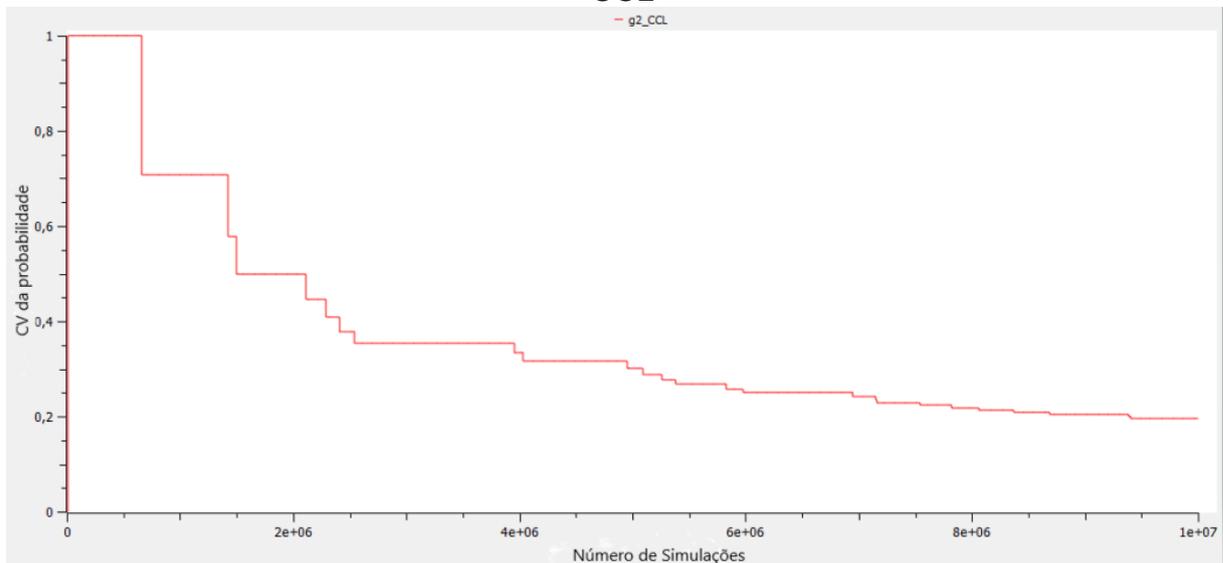


FONTE: Elaborado pela autora por meio da plataforma *Microsoft Excel* (2022).

Em relação ao modo de falha por tombamento, foram feitas 10.000.000 de simulações na análise executada pelo *Risk Tools*, mas em nenhuma delas ocorreu falha. Dessa forma, pode-se inferir que a probabilidade de falha da barragem Santa Clara por tombamento é praticamente nula, tendendo a zero. E, dentre as causas dessa conclusão, há os cenários envolvidos que consideram nível normal e/ou drenagem operante, além do peso específico do concreto ser de  $25,5 \text{ kN/m}^3$  na análise, o que torna o peso do barramento um momento estabilizante muito alto, quando comparado aos outros momentos atuantes no ponto de tombamento analisado.

Quando se analisa o cenário mais crítico do barramento Santa Clara, que é quando considera o nível máximo do reservatório e que os drenos estão inoperantes, a probabilidade de falha resulta um pouco maior, mas ainda assim pequena, igual a cerca de  $2,6 \cdot 10^{-6}$ . A FIGURA 15 apresenta um gráfico gerado no *Risk Tools*, obtido em conjunto com os resultados do  $\beta$  e da  $P_f$  apresentados na TABELA 11. A partir dele percebe-se que somente depois de cerca de 500.000 simulações ocorre a primeira falha.

FIGURA 15 – CV da probabilidade em função do nº simulações do tombamento - CCL

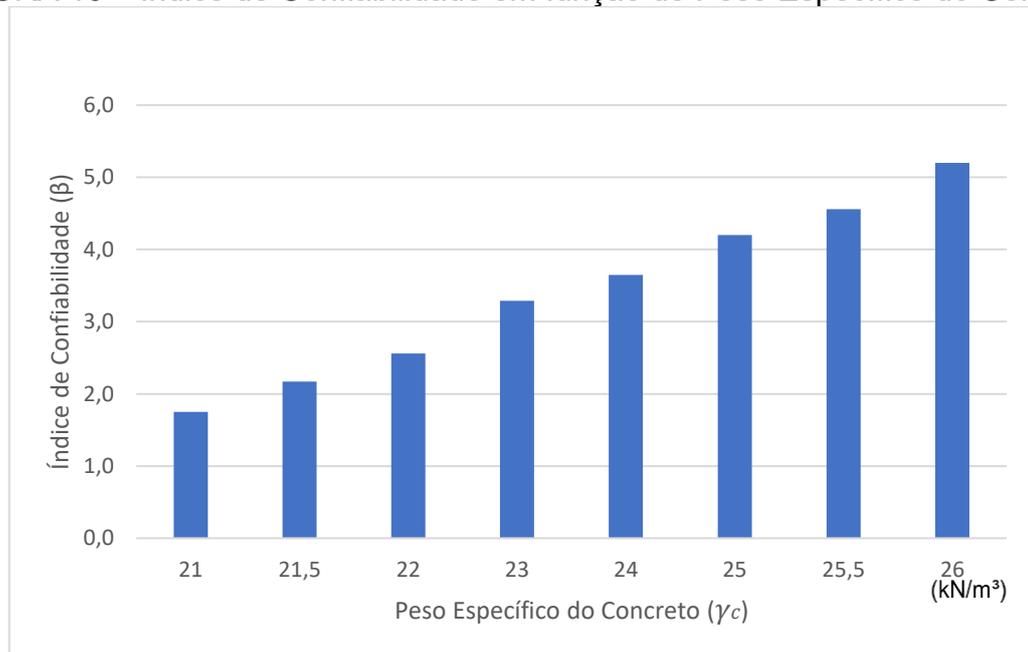


FONTE: Elaborado pela autora por meio da plataforma *Risk Tools* (2022).

Ainda em relação ao tombamento, na FIGURA 16 é feita uma análise alterando os valores do peso específico do concreto entre 21 a 26 (ELETROBRÁS, 2003) e mantendo os parâmetros determinísticos da CCL fixos. Com isso, infere-se que ao diminuir o peso específico de  $25,5 \text{ kN/m}^3$  para  $21 \text{ kN/m}^3$ , o que consiste numa

redução de 18%, o índice de confiabilidade diminui cerca de 60%, resultando em probabilidades de falha significativamente maiores (de  $2,6 \cdot 10^{-6}$  para  $4,0 \cdot 10^{-2}$ ). Pontua-se que essa análise foi realizada apenas para este trabalho, aplicando o método de confiabilidade, com o intuito de observar o comportamento do peso específico do concreto. Dessa forma, não houve verificação se as alterações do peso específico atendem às condições de estabilidade do Manual da Eletrobrás.

FIGURA 16 – Índice de Confiabilidade em função do Peso Específico do Concreto



FONTE: Elaborado pela autora por meio da plataforma *Microsoft Excel* (2022).

O terceiro modo de falha analisado, a flutuação, apresenta probabilidade de falha próxima a zero em todas as condições de carregamento, como pode ser observado na TABELA 12. Na flutuação, verifica-se apenas duas forças em atuação: o peso do barramento contra a força de subpressão. Como o peso específico do concreto é 2,5 vezes maior que o peso específico da água, a força estabilizante se torna, nesse caso, muito maior que a força desestabilizante, fazendo com que não ocorra falha em nenhuma das 10.000.000 de simulações realizadas.

Esse resultado está de acordo com os FSF encontrados, frequentemente altos para os barramentos com as mesmas características de Santa Clara, bem como com as orientações de guias como USBR (1976) e USACE (1995), que não fazem recomendação da verificação desse modo de falha por apresentar probabilidade de falha muito baixa.

## 7 CONCLUSÃO

Os métodos de confiabilidade estão sendo amplamente estudados e aplicados na análise de diversos problemas estruturais no Brasil e no mundo, sendo inseridos aos poucos nas normas nacionais e internacionais. Os projetos estruturais de barragens de concreto a gravidade ainda seguem métodos semi-probabilísticos especificados nos critérios de projeto, que não quantificam diretamente o efeito das incertezas nas estruturas. Dessa forma, ao buscar alternativas para a análise de segurança das barragens, surgem as possibilidades de análises que se utilizem de métodos de confiabilidade estrutural.

No presente trabalho foi apresentado um estudo de caso composto pela avaliação da confiabilidade estrutural de uma barragem existente, limitando-se aos modos de falha de perda de equilíbrio global de um bloco da barragem. A confiabilidade estrutural fornece uma medida da segurança da estrutura ao se obter valores de probabilidades de falha e os respectivos índices de confiabilidade.

Dentre os três modos de falha analisados, o deslizamento foi o que se mostrou o modo dominante. Os modos de falha por tombamento e por flutuação apresentaram probabilidades de falha significativamente menores. Os índices de confiabilidade determinados para o deslizamento foram entre 3,36 ( $P_f = 3,92 \cdot 10^{-4}$ ) e 3,65 ( $P_f = 1,33 \cdot 10^{-4}$ ) e, apesar da segurança não ser atingida quando comparados ao valor alvo recomendado pelo CEN (2001) — 4,3 —, considera-se o fato dessa normativa não se aplicar a barragens e do bloco da barragem considerado na análise ter ainda influência dos demais blocos que constituem a barragem e que se encontram em situação mais favorável.

Para o modo de falha por tombamento, a probabilidade de falha é bastante baixa, próxima a zero para três cenários, e sendo de  $2,6 \cdot 10^{-6}$  para o cenário mais crítico. Isso leva a um índice de confiabilidade de 4,56 no cenário mais crítico, sendo atingida a segurança em relação ao valor alvo de 4,3 do CEN (2001). Ainda em relação a esse cenário mais crítico, quando varia-se o peso específico do concreto, observa-se que para valores menores que  $25 \text{ kN/m}^3$  não é atingido o valor alvo de confiabilidade de 4,3.

Quanto ao modo de falha por flutuação, não houve falha nas 10.000.000 simulações realizadas em cada uma das condições de carregamento. Infere-se que a

probabilidade de falha por flutuação do barramento é próxima de zero, e que esse resultado corrobora com as orientações de guias internacionais, como USBR (1976) e USACE (1995), que não fazem recomendação de verificação desse modo de falha.

De modo geral, pelas análises de confiabilidade, o nível de segurança da barragem Santa Clara apresenta bons resultados, com probabilidades de falha muito baixas para quase todos os modos de falha e condições de carregamento. Em trabalhos futuros pode ser efetuada uma discussão mais aprofundada quanto ao significado das probabilidades de falha relacionadas ao modo de falha por deslizamento e quanto à aceitabilidade das mesmas.

Pontua-se ainda que como o estudo limitou-se aos modos de falha de perda de equilíbrio global de um bloco da barragem, não é possível inferir sobre a segurança da barragem em análise como um todo, sendo necessário abranger as análises de tensões e deformações para todos os elementos estruturais e de fundações.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Segurança de Barragens**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>>.

ALTAREJOS-GARCÍA, L. et al. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis. **Structural Safety**, p. 1–13, 2012.

ANG, A. H.-S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design**. Toronto, ON, Canada: John Wiley and Sons, 1984.

BAYONA E FOUHY. **Reliability-Based Analysis of Concrete Dams**. 2014.

BECK, A. T. **Confiabilidade Estrutural**. São Carlos: EESC-USP, 2014.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm)>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BROBERG, L.; THORWID, M. **Evaluation of Failure Modes for Concrete Dams**. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2015.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **Criteria for Design of Solid Gravity Dams**. 1995.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **Criteria for Design of Solid Gravity Dams**. [s.l.] Indian Standard, 2020.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **Safety Evaluation on Existing Dams**. Indian Standard, 1978.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **Safety of Dams**. Indian Standard, 1978.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. **Statistical Inference**. Pacific Grove, CA, USA: Wadsworth Group, 2002.

CHAGAS, I. Barragem de rejeitos e os casos Mariana e Brumadinho. **Politize!**, 2019.

CHINA ELECTRICITY COUNCIL. **The Standards Compilation of Water Power in China**. [s.l: s.n.].

CMB. **Barragens e Desenvolvimento: Um Novo Modelo para Tomada de Decisões**. 2000.

DE O. BUSSAB, W.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. São Paulo/SP: Saraiva, 2010.

DE SOUZA, M. M. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2005.

DITLEVSEN, O.; MADSEN, H. O. **Structural Reliability Methods**. Denmark: Technical University of Denmark, 2007.

DOS SANTOS, Á. R. **Acidentes em obras de engenharia. Há como evitá-los**. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, [s.d.].

EL RAMI, A. et al. **Uncertainty and optimization in structural mechanics**. John Wiley and Sons, 2013.

ELEJOR. **Usina Hidrelétrica Santa Clara**. , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.elejor.com.br/sustentabilidade/usinas-hidreletricas/dsc00816/>>

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Diretoria de Engenharia: Centrais Elétricas Brasileiras S.A.– Eletrobrás – Ministério de Minas e Energia, 2000.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Diretoria de Engenharia: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás – Ministério de Minas e Energia, 2003.

European Committee for Standardization – CEN. **Basis of structural design. EN 1990**. Brussels, Belgium, 2001.

FERNANDES, D. Rompimento da barragem de Brumadinho completa 1.000 dias. **CNN Brasil**, 2021.

GLOBO, O. Cinco anos após ruptura de barragem, poluentes da tragédia de Mariana ainda chegam ao mar. **CNPEM**, 2020.

FÜRST, A. **Influência do Lançamento Estrutural na Confiabilidade de Vigas em Concreto Armado**. Florianópolis/SC: UFSC, 2017.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **World Register of Dams. General Synthesis**, 2020. Disponível em: <[https://www.icol-cigb.org/GB/World\\_register/general\\_synthesis.asp](https://www.icol-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp)>. Acesso em: 15 nov. 2022.

JANSEN, R. B. **Dams and Public Safety**. [Washington, D.C.]: Denver, Colo.: U.S. Dept of the Interior: Bureau of Reclamation ; For sale by the Supt of Docs., U.S. G.P.O, 1983.

JCSS. **Probabilistic Model Code**. 2001

KERKAR E MIHOUBI. **Study of structural stability of a concrete gravity dam using a reliability approach**. 2022

KRÜGER, C. M. **Análise de Confiabilidade Estrutural aplicada às barragens de Concreto**. Curitiba,PR: Universidade Federal do Paraná, 2008.

LEMAIRES, M. **Structural Reliability**. Londres, England: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2009.

MARANGON, M. Unidade 05 – Barragens de Terra e de Enrocamento. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Minas Gerais, 2004.

MELCHERS, R. E. **Structural Reliability Analysis and Prediction**. Londres, England: John Wiley and Sons, 1999.

MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. **Structural Reliability Analysis and Prediction**. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.

MENESCAL, R. A. **Gestão da Segurança de Barragens no Brasil - Proposta de um Sistema Integrado, Descentralizado, Transparente e Participativo**. Fortaleza,CE: Universidade Federal do Ceará, 2009.

MÍNGUEZ, R. **Probability and Statistics for Engineers**.2012

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.

MORANO, J. R. **Pequenas Barragens de Terra**. São Paulo: Riocor, 2006.

NIGAM,P.S. Handbook of HydroElectric Engineering. Roorkee, 1978.

NOWAK, A. N. et al. **Reliability of Structures**. Asia: McGraw-Hill Education, 2000.

PIRES, K. O. et al. Análise de confiabilidade de barragem de concreto construída. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, p. 551–579, 2019.

RUGGERI, G. et al. **Sliding stability of existing gravity dams-Final report**. Paris: ICOULD Eur Club, 2004.

TORII, A. J. et al. **Adaptive Importance Sampling for Reliability Analysis**. CILAMCE, 2022.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Civil Works Justification Data, Congressional Submission, Fiscal Year 1995**. 1994.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION - USBR. **Criteria For Design of Solid Gravity Dams**. 2010.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION - USBR. **Design of Gravity Dams**. 1976.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION - USBR. **Design of Small Dams**. 1976.

VALENCIO, N. F. L. S. **O controle das águas como fator de progresso e de risco: as representações institucionais dos Grandes Projetos Hídricos no Nordeste**. Brasília, 2006.

VERÓL, A. P. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2010.

WALPOLE, R. E. et al. **Probabilidade e Estatística para engenharia e ciências.** São Paulo/SP: Tatiana Pavanelli Valsi, 2009.

YENIGUN E ERKEK. ***Reliability in dams and the effects of spillway dimensions on risk levels.*** 2006