



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

Willian Debortoli Vieira

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

Florianópolis

2023

Willian Debortoli Vieira

**Análise de Confiabilidade Estrutural do Vertedouro 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 Bacharel em Engenharia Civil.

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

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vieira, Willian Debortoli
Análise de Confiabilidade Estrutural do Vertedouro de
uma Barragem de Gravidade de Concreto / Willian Debortoli
Vieira ; orientador, Wellison José de Santana Gomes, 2023.
58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

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

Willian Debortoli Vieira

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

Florianópolis, 14 de agosto de 2023.



Prof.ª Liane Ramos da Silva, Dra.
Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof. Wellison José de Santana Gomes, Dr.
Orientador



Prof. Jano D'Araujo Coelho, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Guilherme Weber, MsC.
Avaliador
Nova Engevix Engenharia

Dedico esse trabalho aos meus pais e meu irmão, por todo apoio e incentivo durante toda minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** por iluminar meus passos e por toda saúde, permitindo que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao meu orientador, **Wellison José de Santana Gomes** por ter aceitado me guiar nessa trajetória, por acreditar em mim, pela paciência e ensinamentos. Tenho orgulho em ser orientado por um profissional tão competente e respeitado na área, no qual me espelho e me inspiro.

Agradeço aos meus pais por permitirem que eu realizasse esse sonho. Meu pai **Oracio**, que pela sua profissão de Pedreiro, fez com que me integrasse nesse meio desde criança e me fez ter amor pela construção civil. Meu pai, meu exemplo de bondade, caráter, honestidade e profissionalismo. Minha mãe **Rosana** por todo amor e carinho que dedicou a mim em toda minha vida, sempre me incentivando a dar o melhor de mim em tudo o que eu faço. Agradeço a vocês por tudo o que fizeram e fazem por mim, por não medirem esforços para me ajudar nesses seis anos. Por serem minha base e estarem ao meu lado em todos os momentos, principalmente nos difíceis. Amo vocês!

Agradeço ao meu irmão **Michel** por ser meu companheiro e amigo, e por estar sempre disposto a me ajudar. Obrigado por ser tão presente na minha vida e por fazerem dos meus sonhos os seus. Também agradeço por ter me presenteado com minha sobrinha que amo tanto, **Brenda**, que completou nossa família e trouxe muita alegria para nossa casa. Obrigado Brenda por ter tornado minha vida mais iluminada!

Agradeço minha namorada **Natalia** que me incentivou a cursar uma Universidade Federal, e que me acompanhou em toda minha trajetória acadêmica, e compartilhou todos os momentos comigo, o desafio de mudar para uma capital, e as dificuldades de viver longe da família e amigos, os momentos difíceis da graduação..., mas perseveramos e vencemos essa etapa juntos. Obrigado por tudo, se hoje estou em formando engenheiro, devo muito a você! Amo você!

Agradeço aos meus demais familiares e amigos de Lagoa Vermelha - RS por sempre torcerem por mim e pelo meu sucesso!

Agradeço ao meu amigo **Luiz Fernando** por ter compartilhado diversos momentos da graduação, companheirismo e amizade!

Agradeço ao meu amigo **Guilherme**, por todo incentivo, conselhos, troca de conhecimento e amizade!

Agradeço a todos meus colegas de graduação, especialmente a **turma 17.2**, por toda troca de conhecimento, amizade, festas, futebol e coleguismo. Com certeza a jornada acadêmica foi mais leve com vocês!

Agradeço a todo o setor de Estruturas da Nova Engevix por terem me acolhido tão bem, por todo conhecimento que compartilharam comigo, pela amizade e companheirismo, principalmente aos mais próximos: **David, Rafa, Hari, Leonardo e Tiago!** Estendo meus agradecimentos aos meus colegas estagiários pela parceria e amizade! Em especial, agradeço ao meu coordenador **Sérgio**, pela oportunidade de trabalhar na empresa e por ter me permitido acompanhá-lo em visitas técnicas que me despertaram interesse em estudar mais sobre Usinas Hidrelétricas!

Por fim, agradeço a **Universidade Federal de Santa Catarina** por me proporcionar um ensino público, gratuito e de qualidade. Agradeço a todos os **docentes e servidores** que colaboraram na minha formação!

Muito obrigado!

"O vencedor não é aquele que nunca falhou, mas sim aquele que nunca desistiu."

Nelson Mandela

RESUMO

As barragens são estruturas hidráulicas que possuem muitas funcionalidades e objetivos, cuja função de maior relevância é a geração de energia. As barragens de concreto compactado a rolo do tipo gravidade são amplamente utilizadas para esse fim, sobretudo no Brasil. Essas estruturas são sujeitas a elevados níveis de incertezas, e os métodos normalmente utilizados para verificar a estabilidade global são baseados em métodos semiprobabilísticos, que não consideram diretamente o efeito das incertezas na segurança da estrutura. A análise da confiabilidade estrutural permite quantificar a segurança destas estruturas considerando essas incertezas.

O objetivo desse trabalho é analisar a confiabilidade estrutural de uma barragem de concreto e determinando as probabilidades de falha da estrutura com base nos modos de falha: deslizamento, flutuação e tombamento. Para realização desse estudo, primeiramente foi realizada uma revisão de literatura que, apresenta conceitos fundamentais para a formulação do problema e define os parâmetros para realizar as análises de confiabilidade. Foi realizada a escolha da barragem, e o Método de Monte Carlo Simples foi utilizado para realizar as análises. De modo geral, o vertedouro apresentou bons resultados na análise da confiabilidade estrutural. Dentre os três modos de falha avaliados, o deslizamento apresentou valores contrastantes em comparação aos demais modos de falha, sendo a condição de carregamento CCE2 que apresentou maior probabilidade de falha. Os modos de falha de tombamento e flutuação apresentaram probabilidades de falha consideravelmente menores. Em conclusão, ainda há a necessidade de pesquisas mais aprofundadas que abordem de maneira minuciosa o modo de falha de deslizamento em barragens, para definir a aceitabilidade das mesmas. Ressalta-se que o estudo se limitou aos modos de falha de perda de equilíbrio global do vertedouro, não sendo possível inferir diretamente sobre a segurança acerca da barragem como um todo, para isso, seria necessário abranger as análises de tensões e deformações para todos os elementos estruturais e fundações.

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

ABSTRACT

Dams are hydraulic structures that have many functionalities and objectives, whose most relevant function is the generation of energy. Gravity roller-compacted concrete dams are widely used for this purpose, especially in Brazil. These structures are subject to high levels of uncertainties, and the methods normally used to verify global stability are based on semi-probabilistic methods, which do not directly consider the effect of uncertainties on the safety of the structure. The structural reliability analysis allows quantifying the safety of these structures considering these uncertainties.

The objective of this work is to analyze the structural reliability of a concrete dam and determining the probabilities of failure of the structure based on the failure modes: sliding, floating and overturning. To carry out this study, a literature review was first carried out, which presents fundamental concepts for the formulation of the problem and defines the parameters to perform the reliability analysis. The dam was chosen, and the Simple Monte Carlo Method was used to perform the analysis. In general, the spillway presented good results in the structural reliability analysis. Among the three failure modes evaluated, sliding presented contrasting values compared to the other failure modes, with the CCE2 loading condition presenting the highest probability of failure. The tipping and floating failure modes presented considerably lower failure probabilities. In conclusion, there is still a need for further research that thoroughly addresses the sliding failure mode in dams, to define their acceptability. It should be noted that the study was limited to the failure modes of global loss of balance of the spillway, and it is not possible to infer directly about the safety of the dam as a whole, for this, it would be necessary to cover the stress and strain analysis for all structural elements and foundations.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparação da Matriz Energética no Mundo e no Brasil.	19
Figura 2. Problema básico de confiabilidade R-S	33
Figura 3. Simulação de Monte Carlo - Convergência da P_f	36
Figura 7. Seção transversal típica do Vertedouro.....	44
Figura 8. Carregamentos CCN	45
Figura 9. Carregamentos CCE1	46
Figura 10. Carregamentos CCE2	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fatores de Redução da Resistência ao Atrito e da Coesão	26
Tabela 2. Valores mínimos dos fatores de segurança.....	28
Tabela 3. Funções de Densidade de Probabilidade	31
Tabela 4. Resumo das variáveis aleatórias	42
Tabela 5. – Parâmetros determinísticos comuns a todas as condições de carregamento	44
Tabela 6. Verificação de Estabilidade CCN	45
Tabela 7. Verificação da Estabilidade CCE1	46
Tabela 8. Verificação de estabilidade CCE2	48
Tabela 9. Resultados relativos ao deslizamento	50
Tabela 10. Resultado relativos ao tombamento	50
Tabela 11. Resultados relativos à flutuação	51

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	LIMITAÇÕES	17
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	BARRAGENS	18
2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS.....	20
2.1.1	Barragens de Concreto	20
2.2	SEGURANÇA DE BARRAGENS	22
2.2.1	Condições de Carregamento	24
2.2.2	Deslizamento	25
2.2.3	Tombamento.....	26
2.2.4	Flutuação	27
3	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	28
3.1	VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	29
3.1.1	Funções de Densidade de Probabilidade.....	30
3.1.2	Valor Esperado	31
3.1.3	Variância	31
3.1.4	Desvio padrão e coeficiente de variação	32
3.2	PROBABILIDADE DE FALHA.....	32
3.3	ÍNDICE DE CONFIABILIDADE	34
3.4	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	35
4	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE BARRAGENS	37
4.1	FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE.....	37
4.2	DESCRIÇÃO GERAL DO ESTUDO DE CASO	41
4.3	DELIMITAÇÕES DAS ANÁLISES.....	41
4.4	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	42

4.4.1	Peso Específico do Concreto	42
4.4.2	Ângulo de Atrito Interno e Coesão do Contato Concreto-rocha	42
4.4.3	Coeficiente de Ineficiência Hidráulica	43
4.5	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DETERMINÍSTICOS	43
4.5.1	Condição de carregamento normal (CCN)	45
4.5.2	Condição de carregamento excepcional (CCE1)	46
4.5.3	Condição de carregamento excepcional (CCE2)	47
4.6	ÍNDICE DE CONFIABILIDADE ALVO	48
4.7	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6	CONCLUSÃO	51
7	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (2011), as barragens podem ser definidas como obstáculos artificiais que possuem a competência de reter água ou qualquer outro líquido, rejeitos ou detritos, e podem ter uma grande variação de tamanho e forma. Seus principais objetivos são: abastecimento de água; irrigação; geração de energia; controle de cheias; entre outros (CMB, 2000). No que diz respeito à geração de energia, o Brasil representa a terceira maior nação com potencial hidrelétrico em nível global, e possui a maior parte da sua matriz energética fundamentada em aproveitamento hidrelétrico (EPE, 2007).

As barragens podem ser classificadas de acordo com o objetivo para o qual são construídas: regularização ou contenção, ou de acordo com o material utilizado na sua construção, sendo divididas em três grandes grupos: barragens de terra, enrocamento e concreto (BAPTISTA & LARA, 2014). As barragens de concreto, em particular, podem ser subdivididas em concreto gravidade, gravidade aliviada, contraforte ou ainda barragens de abóboda (COSTA, 2012). Neste trabalho, o foco está na análise de confiabilidade estrutural de uma barragem de concreto compactado a rolo do tipo gravidade, que são aquelas cuja estabilidade deve ser garantida pelo peso próprio da estrutura, e ou, pelo peso da água.

No Brasil, os procedimentos usuais para verificar a estabilidade global de barragens de concreto são baseados em métodos semiprobabilísticos e no uso de fatores de segurança especificados em Critérios de Projetos Civil da Eletrobrás (2003). A nível Internacional, livros e manuais como o *Design of Small Dams* do *United States Bureau of Reclamation* (USBR, 1976) e o *Handbook of Hydroelectric Engineering* de Nigam (1978) também adotam os mesmos métodos.

As incertezas estão presentes em todos os sistemas de engenharia e acompanham a estrutura durante todo o seu ciclo de vida, desde a concepção até o fim de sua vida útil, sendo mais significativas durante a fase de projeto. Estas incertezas podem ser reduzidas após a construção e durante a operação, à medida que dados reais são coletados e as incertezas de previsão diminuem (BECK, 2019).

A probabilidade de falha (P_f) é a probabilidade da ocorrência de um evento adverso e pode ser estimada por meio da análise de confiabilidade estrutural, que emprega métodos probabilísticos para avaliação de segurança de uma estrutura, e

está relacionada com o cálculo e o prognóstico da probabilidade de falha de um sistema estrutural em qualquer estágio da sua vida útil (ALTAREJOS-GARCÍA *et al.* 2012; MELCHERS *et al.* 2018).

O presente trabalho tem como foco a aplicação de um dos métodos de análise de confiabilidade estrutural amplamente utilizado na literatura, o método de Simulação de Monte Carlo, devido à sua simplicidade e generalidade. Esse método permite quantificar a segurança das estruturas levando em conta as incertezas inerentes ao projeto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Geral

Analisar a confiabilidade estrutural de um vertedouro de uma barragem, para determinar as probabilidades de falha nessa estrutura com base nos modos de deslizamento, flutuação e tombamento para combinações normais e excepcionais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Evidenciar os principais modos de falha da estrutura;
- b) Definir funções de estado limite;
- c) Obter os índices de confiabilidade estrutural e probabilidades de falhas da barragem abordada no estudo de caso;
- d) Realizar uma análise dos resultados encontrados, e relacionar esses dados com os resultados adquiridos por meio do uso de métodos determinísticos.

1.2 JUSTIFICATIVA

As verificações usuais da estabilidade global de barragens de gravidade de concreto se baseiam em métodos semiprobabilísticos e no uso de fatores de segurança. Tais métodos não levam em conta as incertezas do problema de forma direta, o que pode resultar em diferentes níveis de segurança para projetos distintos, mesmo quando os mesmos fatores de segurança são adotados.

Diante disso, faz-se necessário quantificar e assegurar a segurança estrutural, considerando cada um dos principais modos de falhas e incertezas envolvidas. Isto pode ser feito por meio da aplicação dos métodos de confiabilidade estrutural cujos

resultados podem ser comparados com aqueles relacionados às verificações de segurança convencionalmente utilizadas.

1.3 LIMITAÇÕES

A análise de estabilidade realizada neste estudo teve uma abordagem restrita aos modos de falha associados ao deslizamento, tombamento e flutuação. Essa limitação decorreu pela aplicação do método de confiabilidade estrutural. Em virtude dessa escolha, as análises de tensões e deformações não foram incluídas para nenhum dos elementos estruturais e de fundações. Além do mais, as análises não incorporaram os efeitos sísmicos nas condições de carregamento definidas, uma vez que essa consideração não era relevante para as análises e comparações realizadas.

Em problemas de engenharia estrutural há incertezas relacionadas tanto às variáveis que afetam as solicitações quanto àquelas que afetam a resistência da estrutura. Entretanto, no presente trabalho optou-se por investigar probabilidades de falha condicionais a certas combinações de carregamento: normal (CCN) e excepcional (CCE), que são verificadas usualmente em situações de projeto estrutural. Com isso, evitou-se a necessidade de caracterizar probabilisticamente a maior parte das variáveis que influenciam as solicitações. Como consequência, as probabilidades de falha calculadas são condicionais à ocorrência destes cenários de carregamento e as probabilidades de falha finais devem levar em conta ainda as probabilidades de ocorrência de cada cenário, o que está além do escopo deste trabalho.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para melhor entendimento do tema, contextualização e para apresentar os conceitos fundamentais para formular o problema, foi realizada uma revisão de literatura sobre os temas pertinentes ao trabalho, como projetos de estrutura de barragens e confiabilidade estrutural. Por meio da revisão foi possível definir os parâmetros necessários para a realização das análises de confiabilidade. Além disso foi possível encontrar as funções analíticas que descrevem os modos de falha em termos dos parâmetros definidos anteriormente. Foi feita uma verificação das condições de carregamento geralmente analisadas e, foi escolhida uma barragem que

se adequasse aos objetivos do trabalho. Depois de escolher a barragem para o estudo, foram coletadas as informações das variáveis aleatórias e dos parâmetros determinísticos para cada condição de carregamento definida para a estrutura.

O método de Simulação de Monte Carlo foi aplicado à barragem em questão, empregando o programa de análise de risco *Risk Tools (Rt)* de Mahsuli e Haukass (2013) para fazer as análises e obter os resultados dos índices de confiabilidade. Para cada cenário e para cada modo de falha os índices foram comparados entre si, e os fatores de segurança foram comparados com os valores mínimos indicados na Eletrobrás (2003).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No capítulo 1, são apresentados os objetivos, a justificativa, as limitações e os procedimentos metodológicos desse trabalho. No segundo e no terceiro capítulo é apresentada a revisão da literatura, referente aos temas pertinentes ao embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 5 são apresentadas as funções de estado limite que definem a falha, a descrição do estudo de caso, as variáveis adotadas para a aplicação do método de confiabilidade estrutural e os resultados obtidos a partir das simulações. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho.

2 BARRAGENS

As barragens são definidas como obstáculos artificiais que podem reter água ou qualquer outro líquido, rejeitos ou detritos, e podem variar de tamanho e forma, podendo ser constituídas de pequenos maciços de terra, a grandes estruturas de concreto e aterro (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011).

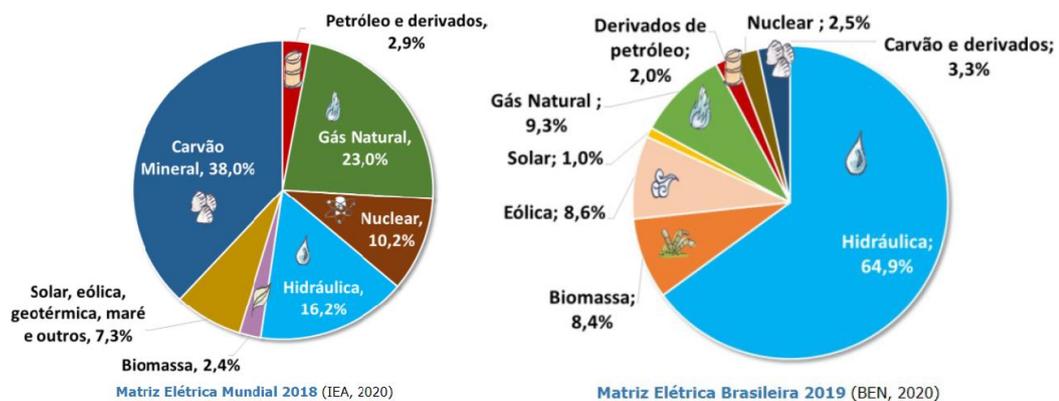
Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens - ICOLD (2007), os principais propósitos das barragens são a irrigação, geração de energia hidrelétrica, abastecimento, controle de enchentes, lazer, navegação, aquicultura, entre outros. No Brasil, as principais finalidades empregadas são irrigação, abastecimento humano, geração de energia hidrelétrica e contenção de rejeitos de mineração (ANA, 2020).

As barragens podem ser destinadas para vários fins, como citados anteriormente, porém, a geração de energia hidrelétrica tem um impacto significativo na produção de energia do Brasil. Conforme pode ser observado na Figura 1, segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2007), 64,9% da matriz elétrica do Brasil é de origem hidráulica. Um percentual elevado, comparado com a matriz elétrica de origem hidráulica no mundo (16,2%).

Segundo a Agência Nacional de Água (2016) o Brasil possui mais de 17.000 barragens para usos diversos. Ainda, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016), o território brasileiro conta com um total de 493 UHEs (Usinas Hidrelétricas), 2.069 PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e 1.075 CGHs (Centrais Geradoras de Hidreletricidade), configurando o país como a terceira maior nação com potencial hidrelétrico em nível global, e possui a maior parte da sua matriz energética fundamentada em aproveitamento hidrelétrico (EPE, 2007).

Os principais componentes da estrutura de uma barragem voltada para geração de energia são: barramento, tomada de água, vertedouro, adufas e casa de força (TSCHIEDEL, 2019).

Figura 1. Comparação da Matriz Energética no Mundo e no Brasil.



Fonte: EPE (2007)

Devido ao grande crescimento populacional e da necessidade gerada pelo desenvolvimento industrial, houve um aumento significativo de grandes barragens, que podem ser classificadas, segundo o ICOLD (2020), como aquelas que possuem altura entre 5 e 15 metros, ou ainda as com altura superiores a 15 metros e que possuam um reservatório com mais de 3 km² (ICOLD, 2020).

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS

As barragens podem ser classificadas de acordo com o objetivo ao qual são construídas: **regularização** ou **retenção**. Quando o objetivo é **regularização**, a finalidade pode ser elevação do nível d'água, criação de lagos para fins turísticos ou aumento do volume. O aumento de volume pode ter fins de abastecimento, industrial ou doméstico e irrigação, enquanto a elevação do nível de água, pode ser utilizado na geração de energia elétrica e ao melhoramento das condições de navegação fluvial. Já as barragens de **retenção**, fazem o papel de amortecimento da onda nos casos de enchente, evitando inundações a jusante, em caso de retenção de água. Entretanto, quando a necessidade é conter cargas sólidas ou mistas, o objetivo é evitar a deterioração química e física o leito dos cursos da água a jusante pelos sedimentos (COSTA, 2012).

Além disso, as barragens também são classificadas de acordo com o material utilizado na sua construção, sendo divididas em três grandes grupos (BAPTISTA & LARA, 2014): **barragens de terra** que são construídas com materiais naturais e minimamente processados, configuram o tipo mais comum de barramento, e vem sendo empregadas há muito tempo para armazenamento de água para consumo e irrigação (PEREIRA, 2016), e podem ser subdivididas em homogêneas ou zoneadas (COSTA, 2012); já as **barragens de enrocamento** devem ser construídas em locais que possuam grande disponibilidade de materiais rochosos que é a matéria prima dessa modalidade de construção, em locais que haja escassez de materiais terrosos, quando há um período curto para a construção da barragem e excesso de umidade no local (PEREIRA, 2016); e **barragens de concreto**, que terá maior enfoque e será melhor detalhada no módulo a seguir, por ser o tipo de barragem abordada nesse estudo.

2.1.1 Barragens de Concreto

As barragens de concreto podem ser subdivididas em concreto gravidade, gravidade aliviada, contraforte ou ainda barragens de abóboda (COSTA, 2012).

Barragens gravidade são aquelas cuja estabilidade é principalmente assegurada pelos efeitos da gravidade, ou seja, seu próprio peso é capaz de resistir as forças horizontais ocasionadas pela pressão da água, e forças verticais causadas

pelos esforços de subpressão (PEREIRA, 2015; SCHREIBER, 1977). Essas barragens possuem formato trapezoidal transversalmente, e na crista da barragem, formato retangular (POSSAN, 2013), são maciças de concreto, com limitada quantidade de armação, e sua estrutura trabalha apenas por compressão (COSTA, 2012). Em geral, a principal característica das barragens de concreto, segundo Novak (2007), é a não sensibilidade a transbordamento e capacidade de suportar distúrbios sísmicos, sem sofrer colapso de forma catastrófica. Entretanto, as barragens de concreto necessitam de uma boa fundação, com uma base de rocha sólida e estável, e de materiais de qualidade utilizados na sua construção. A desvantagem da construção desse tipo de barragem, é o elevado custo e a morosidade em seu processo de construção, que tradicionalmente é lenta (NOVAK, 2007).

Esse tipo de estrutura deve possuir uma margem aceitável de segurança, considerando todas as condições de carregamento, inclusive o reservatório vazio. Isso implica em atender aos critérios de estabilidade estrutural, como rotação e tombamento, translação e deslizamento, além de uma margem de segurança em relação a sobrecarga e falha de material (NOVAK, 2007). A fim de minimizar os efeitos das tensões térmicas, são utilizados vários blocos de concreto separados entre si por juntas de contração (POSSAN, 2013).

As barragens de gravidade podem ser construídas com concreto convencional ou concreto compactado com rolo (CCR), que é um concreto duro, seco, consolidado por compactação, através de rolos compressores vibratórios (RIBEIRO *et al*, 2000). Segundo Kuperman (2005), o uso do CCR tem diversas vantagens, como a rapidez construtiva e a economia obtida. A redução de custos acontece pela utilização de equipamentos de terraplenagem para a colocação do concreto, minimização de formas e a redução do prazo de execução. As propriedades mecânicas do CCR endurecido, se assemelham ao concreto convencional (ANDRIOLO, 1998).

Ainda existe uma variação das barragens de gravidade, que são denominadas **barragem de gravidade aliviada**, que possuem espaços vazios em seu núcleo para diminuir o volume de concreto utilizado, entretanto, necessitam uma maior taxa de armadura (POSSAN, 2013; COSTA, 2012). Essas barragens podem ser construídas com concreto convencional, concreto armado ou concreto a rolo. Neste último, o concreto é espalhado com auxílio de uma esteira e depois compactado (NOVAK, 2007).

Já as **barragens de contraforte**, são um tipo de barragem em que a carga no lado montante é transmitida à fundação por meio de uma série de contrafortes, que são estruturas semelhantes a pilares dispostas perpendicularmente ao eixo do lado montante. Esses contrafortes recebem o empuxo do lado montante e o transferem para as fundações. A parede principal da barragem é formada por lajes de concreto armado apoiadas nos contrafortes ou por abóbodas cilíndricas, geralmente em forma de semicírculo (POSSAN, 2013).

E por último, ainda existem as **barragens em arco**, que segundo Costa (2012), são barragens que possuem dupla curvatura, ou seja, nos sentidos horizontal e vertical. Os arcos ainda podem ser simples ou múltiplos. Nesse tipo de estrutura, parte das pressões hidráulicas é transmitida às ombreiras devido ao efeito do arco. Dessa forma, é mais indicada para vales estreitos (VOLKMER, 2011). Por possuírem um arco horizontal, transmitem grande parte da carga da água para os lados do vale, ao invés do solo, como ocorre nas demais estruturas. Dentre as barragens de concreto, é a que possui a forma mais sofisticada, e o pilar de estabilidade é fundamental para a integridade estrutural dessa configuração (NOVAK, 2007). Também utiliza de duas a quatro vezes menor volume de concreto por metro de comprimento (PEREIRA, 2015).

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

O desempenho das barragens deve ser controlado e monitorado continuamente, a fim de prever e evitar qualquer possível falha, pois fenômenos naturais como terremotos, enchentes ou deslizamentos, e ainda o desgaste causado pelo uso, podem afetar a segurança da barragem (VERÓL, 2010). Segundo Jansen (1983), não há como assegurar de maneira absoluta a segurança dessas construções possuindo sempre algum risco de rompimento, entretanto, é uma responsabilidade da engenharia minimizar esses riscos. Ainda de acordo com Balbi (2008), por mais que o planejamento e execução de uma barragem seja realizado corretamente, ainda podem existir riscos remanescentes, por isso, o autor ressalta a importância de realizar avaliação de segurança das estruturas, prevenir e detectar cedo as situações de risco.

A ruptura do açude de Orós no Ceará em 1960, foi um dos acidentes mais impactantes no Brasil. Houve a formação de uma brecha na estrutura devido a um problema na ombreira da barragem, ocasionando um galgamento, assolando o vale a

jusante e deixando cerca de 1.000 vítimas fatais (VERÓL, 2010). Em 2004, ocorreu o incidente da barragem Camará, localizada a cerca de 150 quilômetros da capital João Pessoa. O problema foi atribuído a falhas na fundação e falta de acompanhamento adequado durante a operação. Essas falhas resultaram em uma onda de cheia que teve consequências graves, incluindo seis mortes e muitas pessoas desabrigadas (VALENCIO, 2006).

Devido ao acontecimento de acidentes que tiveram um grande impacto na vida de milhares de brasileiros, em 2010 foi criada a Lei de Segurança de Barragens nº 12.334, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e instaura o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (BRASIL, 2010).

Mesmo depois dessas medidas serem aplicadas, ainda houve duas grandes tragédias que tiveram grande comoção nacional, envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos de minério: Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019. Dessa maneira, no dia 1 de outubro de 2020, foi sancionada a Lei nº 14.066, que alterou a Lei nº 12.334 de 2010. Essas mudanças preveem uma maior e melhor intercomunicação entre os responsáveis pelas barragens e os órgãos de regulação (COSTA E SILVA, 2021).

A Lei nº 12.334 aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características: I - altura do maciço, do pé do talude de jusante ao nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 metros; II - volume do reservatório maior ou igual a 3 hm³; III - reservatório que contenha resíduos perigosos; IV - categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei; V - categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei (BRASIL, 2010).

Além disso, a Lei 12.334, estabelece qual entidade fiscalizadora deverá classificar as barragens sob sua responsabilidade, levando em consideração os critérios da categoria de risco, dano potencial associado e volume estabelecidos pelo CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012). No caso de barragens utilizadas para geração de energia elétrica, essa responsabilidade fica à competência da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (RSB, 2011). A

legislação também reafirma a responsabilidade legal do empregador em conservar as condições de segurança de sua barragem (BRASIL, 2010).

No Brasil, os Critérios de Projeto Cívico de Usinas Hidrelétricas, desenvolvidos pela ELETROBRÁS em 2003, são adotados como referência para o dimensionamento de barragens de concreto, visando a redução do risco de rompimento dos barramentos. Esses critérios estão em conformidade com os princípios estabelecidos na norma brasileira "Ações e Segurança das Estruturas - NBR 8681/84". De acordo com esse referencial, a estabilidade global das barragens de concreto deve ser analisada levando em consideração 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).

2.2.1 Condições de Carregamento

Para verificar a segurança da estrutura de uma barragem de concreto, é essencial considerar as condições de carregamento que podem ocorrer ao longo da sua vida útil. Também é importante verificar os modos de falha mais significativos que podem estar relacionados com a estrutura.

Quatro condições de carregamento são abordadas pelo guia da Eletrobrás (2003): condições de carregamento normal, excepcional, limite e de construção. **A condição de carregamento normal (CCN)** refere-se a todas as combinações de ações que, durante a operação normal ou manutenção de rotina da obra, em circunstâncias hidrológicas normais, têm grande possibilidade de acontecer ao longo da vida útil da estrutura. **A condição de carregamento excepcional (CCE)** é uma combinação de eventos com baixa probabilidade de ocorrer ao longo da vida útil da estrutura. Consideram a ocorrência de apenas uma ação extraordinária, como circunstâncias hidrológicas excepcionais, falhas no sistema de drenagem, manobras de caráter excepcional, efeitos sísmicos etc. **A condição de carregamento limite (CCL)** corresponde a uma situação de combinação de ações com uma probabilidade muito baixa de ocorrer ao longo da vida útil da estrutura. Em geral, essas combinações levam em consideração a ocorrência de mais de uma ação excepcional, como condições hidrológicas excepcionais, defeitos no sistema de drenagem, manobras de natureza excepcional, efeitos sísmicos, entre outros, juntamente com as ações correspondentes à condição de carregamento normal. **A condição de carregamento**

de construção (CCC) engloba todas as combinações de ações que têm probabilidade de ocorrer durante a execução da obra. Essas ações podem ser devidas ao carregamento de equipamentos de construção, estruturas parcialmente executadas, carregamentos anormais durante o transporte de equipamentos permanentes e quaisquer outras condições semelhantes. Essas condições ocorrem durante períodos curtos em relação à vida útil da estrutura. (ELETROBRÁS, 2003).

2.2.2 Deslizamento

Para avaliar a estabilidade das estruturas contra o deslizamento, é essencial selecionar superfícies de ruptura, de maneira que englobem todos os planos de menor resistência ou aqueles sujeitos a tensões críticas dentro da estrutura, fundação e interface estrutura-fundação. Essas superfícies selecionadas são onde a estrutura pode sofrer movimento de deslizamento como um corpo rígido. No que diz respeito às análises dos fatores de segurança contra o deslizamento, é necessário englobar a coesão e o ângulo de atrito na resistência ao cisalhamento dos materiais rochosos, ou no contato concreto-rocha. Os parâmetros geomecânicos devem ser baseados em valores básicos extraídos dos resultados de investigações e ensaios preliminares (ELETROBRÁS, 2003).

A segurança ao deslizamento da estrutura deve ser calculada para cada trecho sempre que uma superfície de deslizamento interceptar locais onde os parâmetros geomecânicos (atrito e coesão) são diferentes, admitindo-se que há ruptura de cisalhamento nos trechos onde o coeficiente de segurança não é alcançado. Quando isso ocorre, é necessário recalcular o trecho, admitindo-se que o mesmo não tenha resistência de coesão ($C=0$), e que seu ângulo de atrito seja o correspondente à condição residual (pós-ruptura) (ELETROBRÁS, 2003).

Para verificação de segurança ao deslizamento em planos de interface concreto-rocha, a seguinte formulação foi estabelecida pelos critérios de projeto da Eletrobrás em 2003:

$$FSD = \frac{\sum N_i \tan(\phi_i) + \sum C_i A_i}{\sum T_i} \geq 1 \quad (2.1)$$

Onde,

FSD = fator de segurança ao deslizamento;

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

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

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

ϕi = 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;

ΣTi = Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

Na Tabela 1, são indicados os fatores de redução da resistência por atrito e da coesão.

Tabela 1. Fatores de Redução da Resistência ao Atrito e da Coesão

Fator de redução	Condições de carregamento			
	CNN	CCE	CCL	CCC
FSDc	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
FSDϕ	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)

Fonte: Eletrobrás (2003)

O uso destes valores pressupõe um conhecimento razoável dos parâmetros de resistência dos materiais envolvidos. Caso o conhecimento dos valores seja precário, ou os materiais não apresentem constância de comportamento, deve ser utilizado os valores entre parênteses (ELETROBRÁS, 2003).

2.2.3 Tombamento

A resistência ao tombamento é calculada considerando todas as forças verticais e laterais para cada condição de carregamento da barragem e somando os momentos causados pelas forças resultantes em um ponto localizado na posição mais extrema a jusante, na base da barragem (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995).

Ainda, segundo os Critérios de Projeto Civil para Usinas Hidrelétricas (2003), pode-se definir fator de segurança ao tombamento como a relação entre o momento estabilizante e o momento de tombamento em relação a um ponto ou uma linha efetiva de rotação, dado pela expressão:

$$FST = \frac{\sum Me}{\sum Mt} \quad (2.2)$$

Onde,

FST = fator de segurança ao tombamento;

$\sum Me$ = somatório dos momentos estabilizantes atuantes sobre a estrutura, consideradas como tal, o peso próprio da estrutura, as cargas permanentes mínimas e o peso próprio dos equipamentos permanentes, se instalados;

$\sum Mt$ = somatório dos momentos de tombamento, devido a atuação de cargas desestabilizantes, tais como, pressão hidrostática, subpressão, empuxos de terra etc. Deverão ser desprezados os efeitos estabilizantes de coesão e de atrito despertados nas superfícies em contato com a fundação.

2.2.4 Flutuação

O fator de segurança à flutuação é verificado por meio da relação entre o somatório das forças gravitacionais e o somatório das forças de subpressão e será dado pela expressão (ELETROBRÁS, 2003).

$$FST = \frac{\sum V}{\sum U} \quad (2.3)$$

Onde,

FSF = fator de segurança à flutuação;

$\sum V$ = somatório das forças gravitacionais;

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

Os valores mínimos dos valores de segurança, descritos pelos Eletrobrás (2003), são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores mínimos dos fatores de segurança

Fator de segurança	Condições de carregamento			
	CNN	CCE	CCL	CCC
FSD	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
FST	1,5	1,2	1,1	1,3
FSF	1,3	1,1	1,1	1,2

Fonte: Eletrobrás (2003).

3 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Em projetos estruturais, é fundamental entender as incertezas presentes nas solicitações e ações, buscando garantir segurança e desempenho adequados ao longo da vida útil da estrutura. Encontrar um equilíbrio entre segurança e custo é um desafio constante. Incertezas sempre vão estar presentes na resposta dos sistemas estruturais, caso sejam negligenciadas, podem acarretar respostas estruturais indesejadas ou comprometer a integridade estrutural. Diante desse cenário, o estudo da confiabilidade estrutural surge com o objetivo de quantificar o impacto dessas incertezas na segurança das estruturas (MELCHERS e BECK, 2018).

A confiabilidade estrutural tem como objetivo principal estimar a probabilidade de qualquer tipo de falha ou colapso total ou parcial de uma estrutura e qualquer condição indesejada. Para cada condição de falha, existem vários modelos e variáveis associadas. Ressalta-se que não existe estrutura com um nível de segurança totalmente confiável, isto é, uma situação em que a probabilidade de falha é zero. Sempre há risco de falha no sistema, e esse risco deve estar dentro dos limites mínimos de segurança aceitáveis (BECK, 2019).

O conceito de risco encontra-se vinculado a eventos negativos que podem ocorrer em maior ou menor frequência, ou com maior ou menor probabilidade. O risco correlacionado a um evento ou atividade específica, designado como E , pode ser conceitualmente definido como o resultado do produto entre a probabilidade ou frequência de ocorrência do evento, por uma medida das consequências do evento, conforme demonstrado na expressão 3.1 (BECK, 2019)

$$risco [E] \equiv P[\text{ocorrência de } E] \times M [\text{consequência de } E]. \quad (3.1)$$

Sendo $P[.]$ uma medida de probabilidade e $M[.]$ uma medida de consequências. Uma forma de medir consequências é através de uma função de custos $C[E]$, que leva a:

$$risco [E] = P[E] \times C [E]$$

Sendo $P[E]$ a probabilidade de ocorrência do evento E . Esta definição independe do caráter do evento E ; no entanto, em geral a palavra risco está associada a eventos negativos (BECK, 2019)

De modo geral, para descrever um problema de confiabilidade estrutural, pode ser usada a Equação (3.2), que utiliza função de resistência $R(\mathbf{X})$ e solicitação $S(\mathbf{X})$. O vetor \mathbf{X} é utilizado para agrupar as variáveis aleatórias que descrevem as incertezas do problema. Quando a função $g(\mathbf{x})$ resulta em valor positivo, há a segurança da estrutura, enquanto se o valor obtido for menor ou igual a zero, significa que ocorre a falha da estrutura (BECK, 2014).

$$g(\mathbf{X}) = R(\mathbf{X}) - S(\mathbf{X}) \quad (3.2)$$

3.1 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Como visto acima, é essencial compreender as incertezas presentes nas solicitações e ações que atuam sobre as estruturas. Com esse propósito são utilizados conceitos estatísticos e probabilísticos, entre os quais as variáveis aleatórias são fundamentais.

Variáveis aleatórias são usadas para descrever quantidades que têm comportamento indefinido ou variável. No contexto da engenharia civil, essas variáveis estão relacionadas aos parâmetros estruturais, como as cargas atuantes, propriedades dos materiais, dimensões dos elementos estruturais, entre outros. Ao tratar essas variáveis como aleatórias, podemos representar e analisar a incerteza associada a elas de maneira mais realista e precisa. As variáveis aleatórias podem ser classificadas em 2 grupos: discretas ou contínuas. As variáveis discretas só podem assumir valores discretos, gerando funções descontínuas com domínio finito

ou infinito contável. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor real dentro de um determinado intervalo, gerando funções contínuas (BUSSAB; MORETTIN, 2004).

Em um contexto estrutural, as variáveis aleatórias que governam e representam o comportamento e a segurança da estrutura para um determinado modo de falha, são chamadas de variáveis básicas. As variáveis básicas podem ser caracterizadas por uma distribuição de probabilidade apropriada, caracterizada por diversos parâmetros, denominados momentos. Entretanto, para algumas situações em que a informação disponível acerca das incertezas não for suficiente para descrever todos os momentos, é adequado descrever a variável utilizando apenas uma estimativa de sua média ou valor esperado e a variância (MELCHERS, 1999).

3.1.1 Funções de Densidade de Probabilidade

A probabilidade de uma variável aleatória X assumir um valor igual ou menor que x , é denominada função de distribuição acumulada de probabilidades, conforme a Equação (3.3) (CASELLA e BERGER 2022):

$$F_X(x) = P\{X \leq x\} \quad (3.3)$$

A derivada da Equação (3.3), em relação a x , é conhecida como função de densidade de probabilidades e dada pela equação (3.4):

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (3.4)$$

As variáveis aleatórias são inteiramente definidas pelas suas próprias funções de densidade de probabilidade, cujo propósito é descrever como as probabilidades estão distribuídas para essas variáveis. Essas funções são fundamentais para compreender e analisar o comportamento estatístico das variáveis, permitindo a visualização da probabilidade associada a diferentes valores ao longo da sua faixa de possíveis resultados.

Existem diversas funções na literatura que podem ser usadas na prática de engenharia, algumas das funções mais usuais e que são utilizadas nesse trabalho, estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Funções de Densidade de Probabilidade

Distribuição	$f_X(x)$	Média (μ)	Variância (σ^2)
Uniforme	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	μ	σ^2
Gumbel (Tipo I)	$\beta \cdot \exp[-\beta \cdot (x - u_n) - e^{-\beta \cdot (x - u_n)}]$	$u_n + \frac{\gamma}{\beta}$ (*)	$\frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\beta}$
Lognormal	$\frac{1}{\xi x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\xi}\right)^2\right]$	$\exp(\lambda + 0,5\xi^2)$	$\mu[\exp(\xi^2) - 1]$

(*) γ é chamada de constante de Euler-Mascheroni, sendo igual a aproximadamente 0,577216.

Fonte: Adaptado de ANG e TANG (2007)

3.1.2 Valor Esperado

A média de uma variável aleatória, também conhecida como valor esperado ou primeiro momento, é uma medida que representa a tendência central dessa variável, e pode ser definida conforme a Equação (3.5), para o caso de variáveis contínuas (MELCHERS, 1999).

$$E[X] = \mu_X = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad (3.5)$$

Sendo $f_X(x)$ a função de densidade de probabilidade da variável aleatória X .

3.1.3 Variância

De acordo com Beck (2019), a variância pode ser classificada como a medida de dispersão de valores encontrados em torno de sua média e pode ser chamada de segundo momento central da variável aleatória. Definida conforme a Equação (3.6):

$$Var[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx \quad (3.6)$$

onde μ_X é a média da variável aleatória X e $f_X(x)$ é a função de densidade de probabilidade da variável aleatória X .

3.1.4 Desvio padrão e coeficiente de variação

O desvio padrão é a medida de dispersão mais utilizada, definida como a raiz quadrada da variância, conforme a Equação (3.7) (DEVORE, 2005):

$$\sigma_X = \sqrt{Var[X]} \quad (3.7)$$

onde $Var[X]$ é a variância da variável aleatória X .

Para comparar a dispersão de diferentes variáveis, utiliza-se o coeficiente de variação, que é dado pela razão entre o desvio padrão e a média amostral, conforme a Equação (3.8) (BUSSAB e MORETTIN, 2009):

$$CV = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (3.8)$$

sendo σ_X é o desvio da variável aleatória X e μ_X a média da variável aleatória X .

3.2 PROBABILIDADE DE FALHA

As variáveis aleatórias R e S , resistência e solitação, respectivamente, dependem do vetor de variáveis aleatórias do problema \mathbf{X} , e são utilizadas para definir a função de estado limite g de uma estrutura. Que quando igualada a zero, a função apresentada anteriormente na Equação (3.2) define o limite entre a falha e não falha da estrutura, conforme ilustrado na Figura 2. Dessa maneira, as funções de estado limite divide o domínio estocástico em dois domínios complementares, apresentados abaixo (MELCHERS *et. al*, 2018):

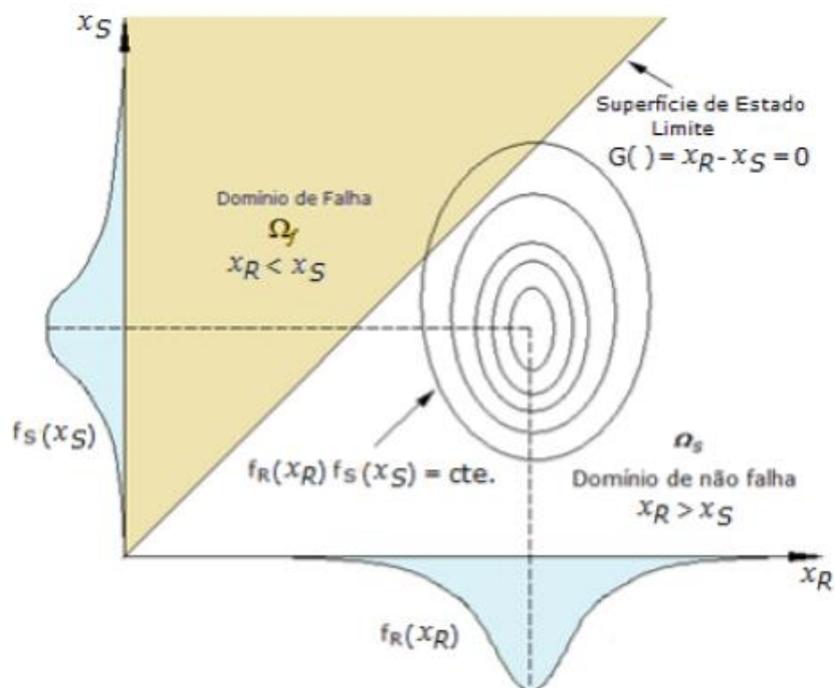
- Domínio de segurança da estrutura:

$$\Omega_s = \{x|g(x) > 0\} \quad (3.9)$$

- Domínio de falha da estrutura:

$$\Omega_f = \{x|g(x) \leq 0\} \quad (3.10)$$

Figura 2. Problema básico de confiabilidade R-S



Fonte: Coelho (2011)

Na avaliação de segurança de estruturas, é comum utilizar a probabilidade de falha, que consiste na integração do conteúdo de probabilidades de todos os pontos pertencentes ao domínio de falha (Ω_f), conforme a Equação (3.11) (LEMAIRE, 2009):

$$P_f = P[\{R - S \leq 0\}] = P[\{g \leq 0\}] = \int_{\Omega_f} f_X(\mathbf{X}) d\mathbf{x} \quad (3.11)$$

A determinação da função $f_X(\mathbf{X}) d\mathbf{x}$, que representa a função de densidade conjunta de probabilidade, assim como a determinação do domínio de falha, podem apresentar alta complexidade. Na maioria dos problemas de engenharia, os

resultados não podem ser expressos por fórmulas matemáticas definidas de formas simples, sendo necessário utilizar métodos de transformação ou métodos que utilizam simulação numérica (MELCHERS, 1999).

Dentre esses métodos, destacam-se o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem, o FORM (*First Order Reliability Method*), Método de Confiabilidade de Segunda Ordem, o SORM (*Second Order Reliability Method*), e a Simulação de Monte Carlo, este último consiste em um método amplamente empregado em análises de confiabilidade estrutural é escolhido para esse trabalho, e detalhado na seção 3.4. (BECK, 2019).

3.3 ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

Com o objetivo de estabelecer uma relação entre a probabilidade de falha e a segurança da estrutura, considerando o comportamento estrutural adotado, surge o índice de confiabilidade estrutural (β). Este índice, está diretamente relacionado à probabilidade de falha, conforme a Equação (3.12) (BECK, 2014).

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3.12)$$

Onde:

Φ^{-1} é a inversa da função cumulativa de probabilidades da distribuição normal padrão e P_f é a probabilidade de falha do sistema.

O índice de confiabilidade corresponde à distância entre o ponto mais provável de falha e a origem do espaço normal padrão, medida neste espaço. O espaço normal padrão é obtido a partir da transformação do espaço original, ou espaço de projeto. Desta forma, quanto maior for o índice de confiabilidade, maior a segurança existente da estrutura, ou seja, menor a probabilidade falha. O índice de confiabilidade também pode ser utilizado para definir valores alvo a serem atingidos, a fim de garantir condição de segurança mínima adequada aos elementos e à estrutura como um todo, conforme apresentado em Melchers (1999), no JCSS (2001), no Eurocode (2002) e no ACI (2003).

3.4 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A Simulação de Monte Carlo é um método numérico de análise estatística que envolve a utilização de números aleatórios para avaliação de um experimento. O método tem a flexibilidade de trabalhar com diferentes tipos de distribuição ou função, tornando-o útil para avaliar a maioria dos casos práticos. O fator limitante desse método reside na alta exigência computacional para obter resultados precisos, pois o mesmo demanda um elevado número de simulações para estimar probabilidades de falha pequenas (BECK, 2014).

Para aplicar o método denominado Monte Carlo direto ou simples, é necessário considerar as funções de estado limite, que indicam o limite entre a falha e a segurança da estrutura em análise. Para que sejam efetuadas as simulações, são empregados geradores de números pseudoaleatórios, tais como os geradores lineares congruenciais (REFS), que permitem obter números aleatórios com distribuição uniforme entre 0 e 1. Em seguida, pode-se aplicar a inversa da função cumulativa de probabilidades da variável aleatória em questão, para se obter realizações desta variável, respeitando sua distribuição de probabilidades (REF). O procedimento é aplicado para cada uma das variáveis aleatórias do problema, obtendo valores para as mesmas, que quando aplicados na função de estado-limite do sistema analisado, possibilitam a determinação da probabilidade de falha do sistema (MELCHERS, 2010).

Visando estimar a probabilidade de falha conforme definida pela Equação (3.13), o método Monte Carlo emprega uma função indicadora I , a qual permite efetuar a integração apresentada na Equação (3.11) sobre todo o espaço amostral ao invés de apenas sobre o domínio de falha. A função indicadora, atribui o valor zero para os pontos que estão fora do domínio de falha, isto é, nos casos em que não ocorre falha, e um para os demais pontos, mantendo as probabilidades apenas para os casos em que a falha acontece (MELCHERS, 2010).

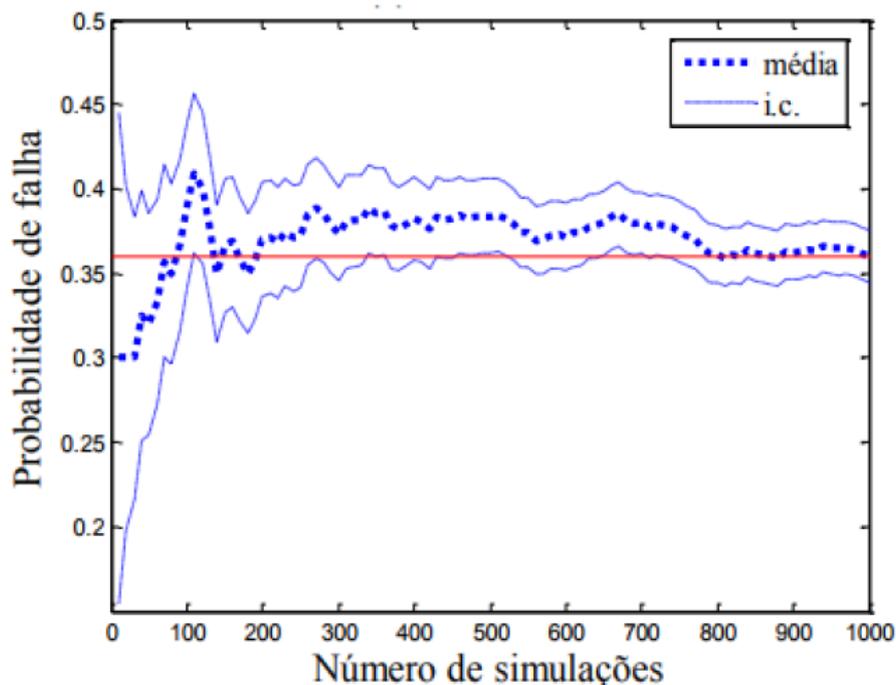
$$\begin{aligned} I[x] &= 1, \text{ se } x \in \Omega_f (g(x) \leq 0) \\ I[x] &= 0, \text{ se } x \in \Omega_s (g(x) > 0) \end{aligned} \quad (3.13)$$

É possível estimar o valor da probabilidade de falha, após a execução de N simulações, conforme a Equação (3.14), que verifica a quantidade de experimentos em que a falha acontece, por meio da soma dos valores $I[x_i]$, e depois divide pelo número total de experimentos.

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[x_i] \quad (3.14)$$

A medida que a amostra aumenta, a solução aproximada converge para a solução exata, ou seja, quanto maior o número de simulações, mais precisos são os resultados conforme exemplificado na Figura 3. Nessa figura, o intervalo de confiança (i.c.) é de 95%, então o valor estimado tem uma probabilidade de 95% de estar dentro desse intervalo. Indicar o tamanho amostral adequado, por meios teóricos, visando atingir um intervalo de confiança aceitável, não é uma tarefa simples (DITLEVESEN e MADSEN, 2005). Para uma estimativa de probabilidade 10^{-p} com coeficiente de variação inferior a 10%, de acordo com Beck (2014), são necessárias aproximadamente 10^{p+2} simulações, isto é, muitas simulações precisam ser realizadas para obter poucos valores presentes no domínio de falha.

Figura 3. Simulação de Monte Carlo - Convergência da P_f



Fonte: Ricardo (2015)

$$CV = \frac{\sigma_{P_f}}{\mu_{P_f}} \approx \frac{1}{\sqrt{NP_f}} \quad (3.15)$$

De acordo com Beck (2014), para avaliar o erro dos resultados encontrados por simulação de maneira estatística, emprega-se o coeficiente de variação da probabilidade de falha, conforme definido na Equação (3.15). Esse parâmetro é útil para verificar se o método de simulação está convergindo corretamente e para estimar a precisão dos resultados obtidos.

4 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE BARRAGENS

Para a elaboração de uma análise de confiabilidade estrutural, é necessário definir funções de estado limite, e escolher adequadamente as distribuições de probabilidade que representam as variáveis do problema. Esses passos são essenciais para garantir uma avaliação adequada da segurança e da probabilidade de falha da estrutura em estudo.

4.1 FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE

Com base nas informações mencionadas nos capítulos anteriores, sobre as características do conjunto barragem-fundação, as condições de carregamento e os modos de falha, a seguir serão apresentadas as funções de estado limite. Essa formulação foi adotada com base no estudo de Pires *et. al.* (2019), sobre a análise de confiabilidade de uma barragem de concreto já construída.

A partir da equação (3.1), define-se a função de estado limite para o deslizamento ao longo da superfície em análise como a expressão 4.1.

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

Sendo,

T_R = somatório das forças resistentes na superfície de escorregamento;

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

Ao considerar as diversas parcelas de força resistente, tem-se as seguintes expressões 4.2 e 4.3.

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

$$g_1 = (V_C \gamma_C + W_{w1} - U - U_C + W_{w2}) \tan \phi_i + cA - T_S \quad (4.3)$$

Onde,

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

ϕ_i = ângulo de atrito interno da interface concreto-rocha;

c = coesão da interface concreto-rocha;

A = área efetiva comprimida;

V_C = volume de concreto;

γ_C = peso específico do 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 por meio da Equação (4.4):

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

Onde,

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;

γ_w = peso específico da água;

h_1 = altura de água a montante;

h_2 = altura de água a jusante;

h_3 = altura de água equivalente a subpressão na linha de drenagem, que pode ser obtido pelas equações:

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

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

Onde,

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.

A função de estado limite em relação ao Tombamento, no ponto mais extremo a jusante da superfície em análise, é definida pela equação 4,7.

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

Sendo,

M_R = somatório dos momentos resistentes;

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

Ao substituir pelos momentos envolvidos na análise em questão, tem-se a Equação 4.8:

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

Onde,

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.

Expandido a Equação (4.8), tem-se a equação 4.9:

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

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.

Para a flutuação, a função de estado limite em relação a superfície em análise é definida pela equação 4.10 e 4.11:

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

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

Onde,

N = somatório das forças gravitacionais;

U = somatório das forças subpressão atuantes.

4.2 DESCRIÇÃO GERAL DO ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso foi utilizado um vertedouro de uma barragem hipotética. As estruturas de gravidade da UHE foram executadas em concreto compacto a rolo (CCR) e o fechamento do barramento nas ombreiras foi projetado em barragem de enrocamento com núcleo argiloso.

O Vertedouro, estrutura a ser analisada nesse estudo, é do tipo gravidade com soleira livre na elevação 58,52 m e fundação em um plano variável. Possui 390 m de extensão, com altura aproximada de 53 m e ainda possui degraus a jusante, que auxiliam na dissipação da energia.

Ao longo da barragem/vertedouro foi implementada uma galeria de drenagem para alívio das pressões de contato na fundação. Essa galeria tem sua seção transversal nas dimensões de 2,50 por 3,00 m, e foi posicionada variavelmente ao longo do eixo de acordo com a elevação variável da fundação.

4.3 DELIMITAÇÕES DAS ANÁLISES

Este trabalho se delimita às verificações de estabilidade para as condições de carregamento normal (CCN) e condição de carregamento excepcional (CCE), avaliando os modos de falhas ao deslizamento, tombamento e a flutuação. Ressalta-se, que trata de situações com determinadas probabilidades de ocorrerem, mas que foi optou-se, neste trabalho, por não caracterizar estas probabilidades e, portanto, calcular probabilidades de falha condicionais a estas condições de carregamento.

A CCN considera os carregamentos referentes aos níveis de água do reservatório normal (52,61 m) e subpressão com drenagem operante. A CCE 1 considera a estrutura submetida aos carregamentos referentes ao nível máximo maximoroum (58,52 m) e subpressão com drenagem operante. A CCE 2 considera a estrutura submetida aos carregamentos referentes aos níveis de água do reservatório normal (52,61 m) e subpressão com drenagem inoperante. Neste trabalho, as análises não consideraram os carregamentos referentes a evento de sismo.

O nível do reservatório na elevação normal corresponde a uma coluna de água de 52,61 m a montante e inexistente a jusante. A coluna de água a jusante, mantém-se praticamente no nível da fundação, de modo a não interferir na estabilidade da estrutura.

Na elevação máxima de projeto, o nível de água no reservatório corresponde a uma coluna de água de 58,52 m a montante (h_1) e 11,00 m a jusante (h_2) da barragem.

4.4 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

É apresentada na Tabela 4 o resumo das variáveis aleatórias definidas para a análise, juntamente com as respectivas distribuições estatísticas e seus parâmetros de média e desvio padrão. Foram utilizados como referência os relatórios das análises geotécnicas e a memória de cálculo das análises de estabilidade de uma barragem e os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2003).

Tabela 4. Resumo das variáveis aleatórias

Variáveis aleatórias	Unidade	Distribuição	Média	SD	CV (%)
Peso específico do concreto (γ_c)	kN/m ³	Normal	24	1,30	5
Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	-	Normal	45	11,63	26
Coesão do contato concreto-rocha (c)	kN/m ²	Lognormal	400	160	40
Coefficiente de ineficiência hidráulica (k)	-	Normal	0,33	0,10	30

Fonte: Autor (2023)

4.4.1 Peso Específico do Concreto

Os parâmetros estatísticos da distribuição de probabilidades do peso específico do concreto foram definidos conforme os valores adotados na fase de projeto para o dimensionamento da estrutura. Ficou definido para o peso específico 24 kN/m³, o desvio padrão adotado foi de 1,30, o que corresponde a um coeficiente de variação de 5%.

4.4.2 Ângulo de Atrito Interno e Coesão do Contato Concreto-rocha

Pires *et. al.* (2019) relata que através dos resultados das diversas pesquisas sobre os parâmetros de ângulo de atrito interno e coesão, a existência de uma larga

faixa de valores, variando entre 27,5 e 68° para o ângulo de atrito interno e 0,06 MPa e 3 MPa para coesão, comprovando o alto grau de incerteza presente na definição desses parâmetros. Também, observa-se que há poucos estudos com informações disponíveis que permitem realizar o cálculo de parâmetro estatístico.

Para os parâmetros geomecânicos da fundação, foi adotado o valor de 45° para o ângulo de atrito interno e 400 kN/m² para coesão do contato concreto-rocha. Baseando-se na norma Chinesa de projetos de estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas, China Electricity Council (2000), foram estabelecidos os valores de coeficientes de variação de 26% para o ângulo de atrito interno e de 20% para coesão.

4.4.3 Coeficiente de Ineficiência Hidráulica

O cálculo da subpressão atuante na fundação das barragens de concreto, definidos conforme critérios de projetos determinísticos, geralmente se baseia na Lei de Darcy, que estabelece uma redução linear da pressão de montante para jusante. Quando não há um sistema de drenagem na fundação da barragem ou a drenagem está inoperante, as pressões a montante e jusante são equivalentes às colunas de água correspondentes no reservatório a montante e a coluna de água a jusante da barragem (PIRES *et. al.*, 2019).

Conforme a Eletrobrás (2003), para condições normais de drenagem, utiliza um coeficiente de ineficiência de hidráulica de 0,33, estabelecido com base em dados históricos, semelhante aos critérios utilizados pelo USBR (1976) no manual Design of Gravity Dams. Para o presente trabalho, como não há informações sobre o histórico de dados de monitoramento da subpressão atuante na fundação do barramento, adotou-se a variação de 30%, mesma variação do barramento analisado em Pires, Futai, Bittencourt e Beck (2019).

4.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DETERMINÍSTICOS

Na Tabela 5, são apresentados os parâmetros determinísticos comuns a todas as condições de carregamentos.

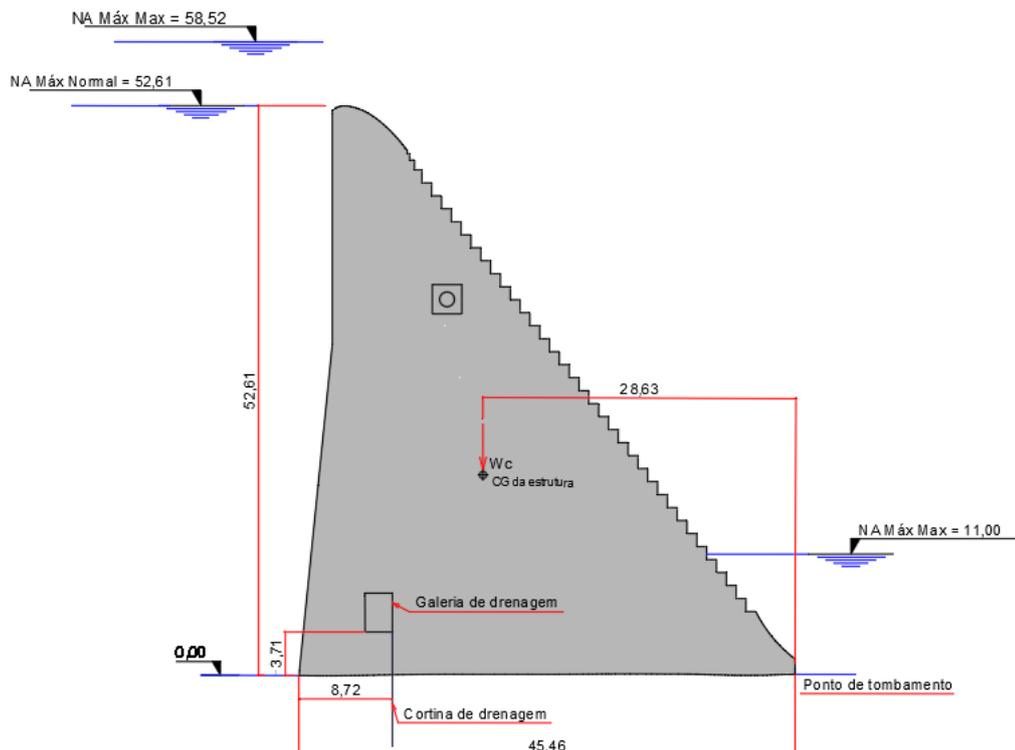
Tabela 5. – Parâmetros determinísticos comuns a todas as condições de carregamento

Parâmetro	Unidade	Dados
Volume do concreto (V_c)	m^3	1259,87
Peso específico da água (γ_w)	kN/m^3	10
Peso específico silte (γ_s)	kN/m^3	3,5
Área efetiva comprimida (A)	m^2	45,46

Fonte: Autor

Na Figura 7 é apresentada a seção transversal típica do vertedouro soleira livre, e a partir dela, foram definidos os parâmetros determinísticos da estrutura. É possível identificar o centro de gravidade e a distância relativa ao ponto de tombamento, bem como as propriedades geométricas, níveis de água, altura da galeria de drenagem e a elevação da fundação.

Figura 4. Seção transversal típica do Vertedouro



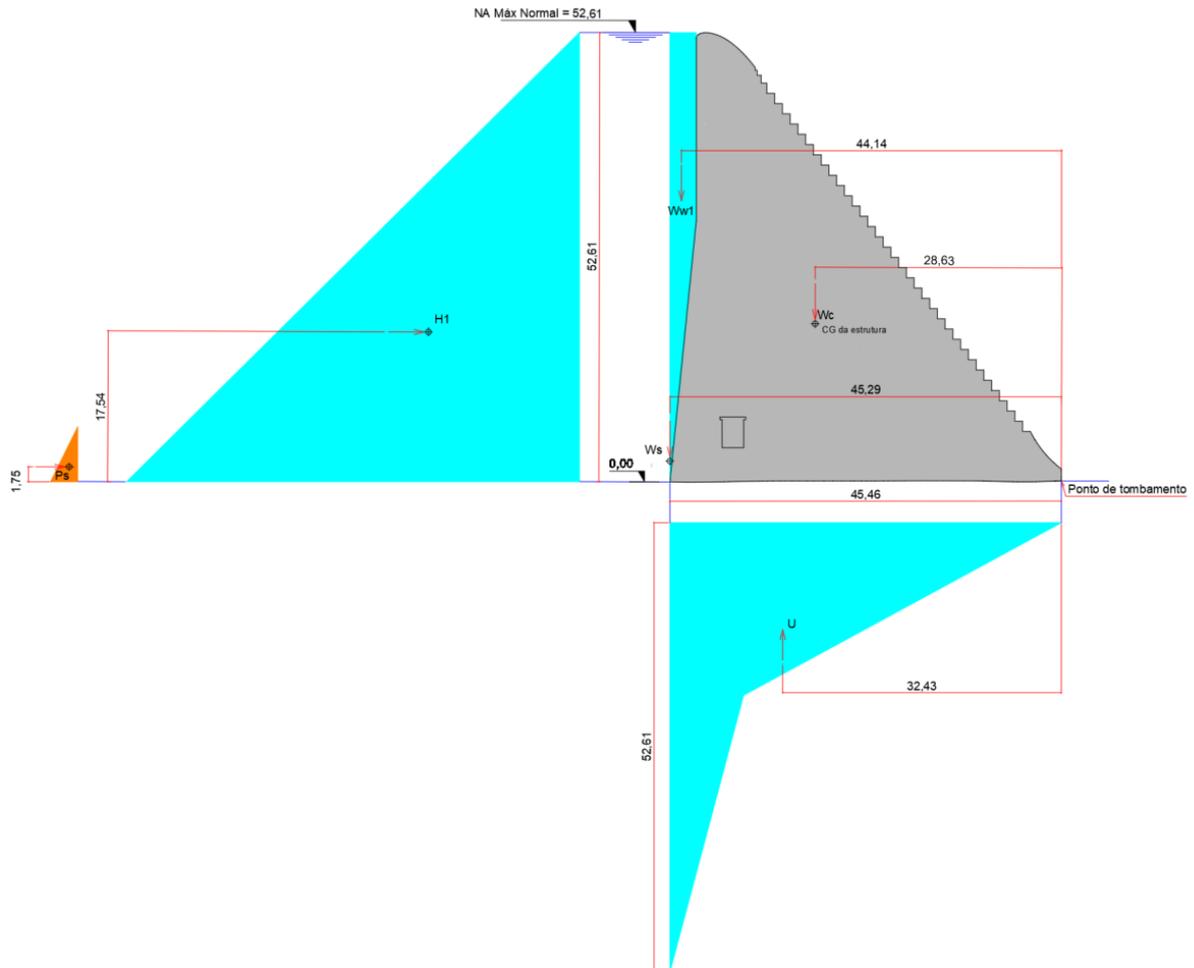
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do *software* MicroStation

A análise de estabilidade global foi conduzida em análise bidimensional com espessura unitária, para a seção crítica da estrutura em questão.

Os parâmetros e as verificações de estabilidade para cada condição de carregamento utilizados na análise, serão apresentados na sequência por meio de Figuras e Tabelas.

4.5.1 Condição de carregamento normal (CCN)

Figura 5. Carregamentos CCN



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do *software* MicroStation

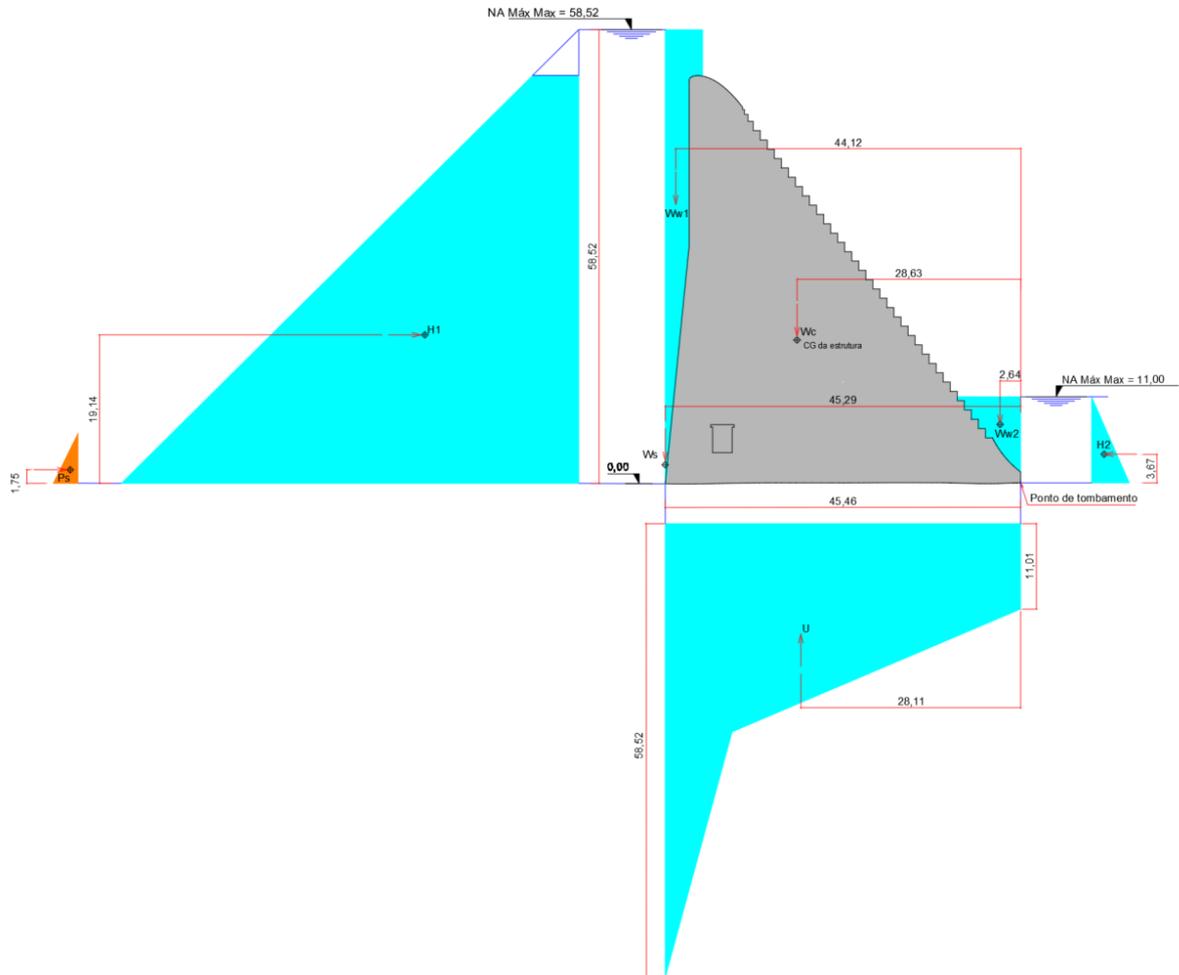
Tabela 6. Verificação de Estabilidade CCN

	Esforços (kN)	Braço Tombamento (m)	Me (kN.m)	Mt (kN.m)
Peso Próprio (Wc)	30.236,88	28,63	865.681,87	-
Subpressão (U)	- 6.806,78	32,43	-	- 220.743,88
Empuxo Montante (H1)	- 13.839,06	17,54	-	- 242.737,11
Peso água Montante (Ww1)	1.142,57	44,14	50.433,04	-
Pressão Silte (Ps)	- 48,42	1,75	-	- 84,74
Peso Silte (Ws)	4,85	45,29	219,66	-
Σ Forças Verticais (\downarrow) (+)	31.384,30	-	-	-
Σ Forças Verticais (\uparrow) (-)	- 6.806,78	-	-	-
Σ Forças Horizontais (\rightarrow) (-)	- 13.887,48	-	-	-
Σ Momentos	-	-	916.334,57	- 463.565,72

Fonte: Autor

4.5.2 Condição de carregamento excepcional (CCE1)

Figura 6. Carregamentos CCE1



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do *software* MicroStation

Tabela 7. Verificação da Estabilidade CCE1

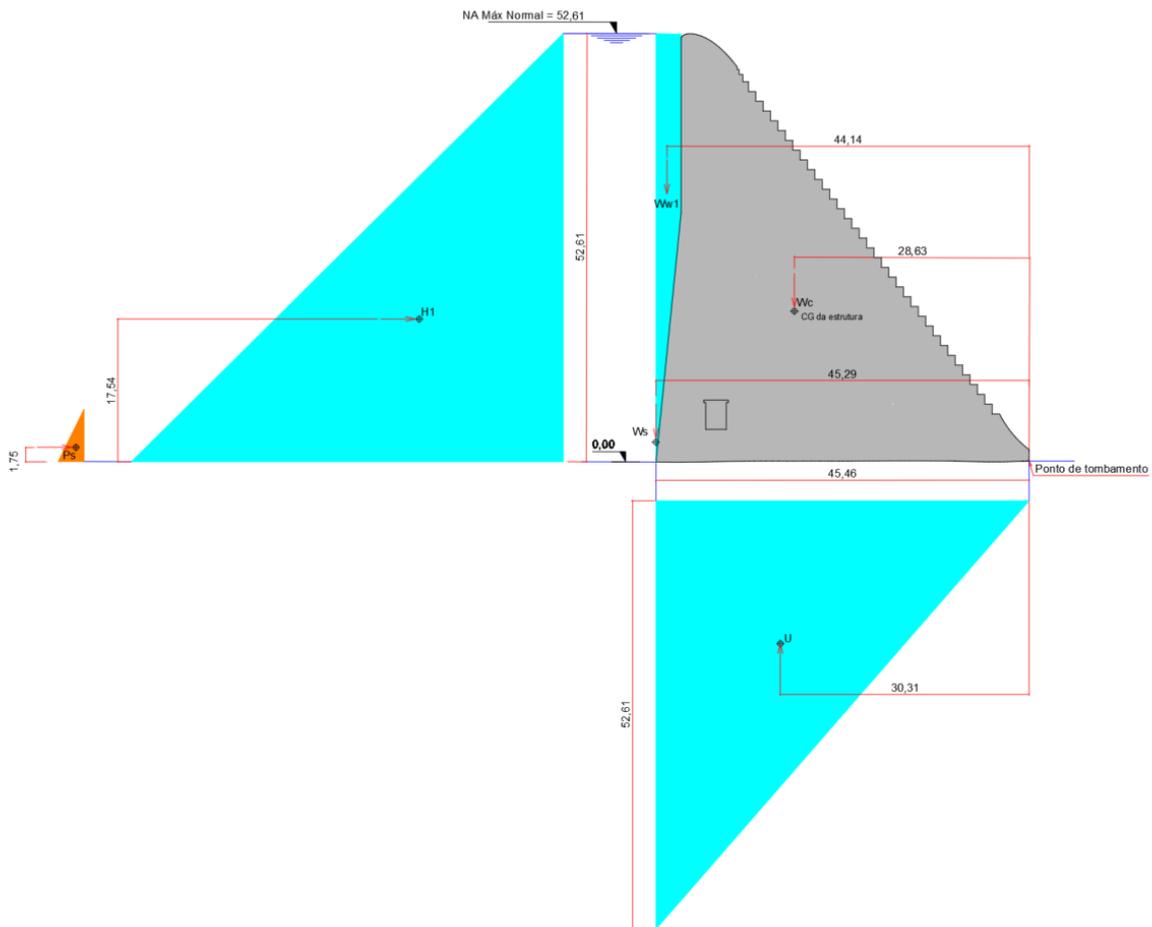
	Esforços (kN)	Braço Tombamento (m)	M_e (kN.m)	M_t (kN.m)
Peso Próprio (Wc)	30.236,88	28,63	865.681,87	-
Subpressão (U)	- 11.768,00	28,11	-	- 344.802,40
Empuxo Montante (H1)	- 16.945,68	19,14	-	- 324.340,32
Empuxo Jusante (H2)	606,10	3,67	2.224,39	
Peso água Montante (Ww1)	1.274,27	44,12	56.220,79	-
Peso água Jusante (Ww2)	413,27	2,64	1.091,04	
Pressão Silte (Ps)	- 48,42	1,75	-	- 84,74
Peso Silte (Ws)	4,85	45,29	219,66	-
Σ Forças Verticais (\downarrow) (+)	31.929,27	-	-	-
Σ Forças Verticais (\uparrow) (-)	- 11.768,00	-	-	-

	Esforços (kN)	Braço Tombamento (m)	M_e (kN.m)	M_t (kN.m)
Σ Forças Horizontais (\rightarrow) (-)	- 16.994,10	-	-	-
Σ Forças Horizontais (\leftarrow) (+)	606,10	-	-	-
Σ Momentos	-	-	925.437,75	- 669.227,45

Fonte: Autor

4.5.3 Condição de carregamento excepcional (CCE2)

Figura 7. Carregamentos CCE2



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do *software* MicroStation

Tabela 8. Verificação de estabilidade CCE2

	Esforços (kN)	Braço Tombamento (m)	M_e (kN.m)	M_t (kN.m)
Peso Próprio (W_c)	30.236,88	28,63	865.681,87	-
Subpressão (U)	- 11.858,40	30,31	-	- 359.428,10
Empuxo Montante (H1)	- 13.839,06	17,54	-	- 242.737,11
Peso água Montante (W_w1)	1.142,57	44,14	50.433,04	-
Pressão Silte (Ps)	- 48,42	1,75	-	- 84,74
Peso Silte (Ws)	4,85	45,29	219,66	-
Σ Forças Verticais (\downarrow) (+)	31.384,30	-	-	-
Σ Forças Verticais (\uparrow) (-)	- 11.858,40	-	-	-
Σ Forças Horizontais (\rightarrow) (-)	- 13.887,48	-	-	-
Σ Momentos	-	-	916.334,57	- 602.249,95

Fonte: Autor

4.6 ÍNDICE DE CONFIABILIDADE ALVO

Não há um valor fixo determinado na literatura para que o índice de confiabilidade atenda a segurança mínima de uma estrutura. Isso se deve pela heterogeneidade dos experimentos e ensaios realizados por cada autor, ocasionando uma variabilidade nos resultados da probabilidade de falha dos elementos estruturais. E também está diretamente associada ao risco e seu entendimento. A escolha de valores alvo depende bastante das consequências de falha. Os índices indicados pelas normas internacionais são os mais reconhecidos e consolidados, contudo, estas não são direcionadas a barragens. O *Probabilistic Model Code* (JCSS, 2001) recomenda um valor de 3,7 para o índice de confiabilidade para estruturas agrícolas, com baixo risco, 4,2 para edificações comerciais ou residencial com risco moderado e 4,4 para pontes, hospitais e edifícios altos risco.

Com a finalidade de avaliar as probabilidades de falha nesse estudo, foram adotados os valores da norma do Comitê Europeu de Normatização (2022), que leva em consideração a classe de consequência da estrutura para recomendar os índices. β alvo é de 4,3 e leva em consideração o risco de vida ou consequências econômicas, sociais ou ambientais, bem como o período de vida útil de 50 anos.

4.7 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A análise de confiabilidade estrutural foi conduzida utilizando o software *Risk Tools (Rt)* desenvolvido por Mahsuli e Haukass (2013), empregado o método de simulação numérica de Monte Carlo. O programa *Rt* possui uma biblioteca que inclui diversos modelos e métodos, possibilitando incluir uma vasta gama de dados e a aplicar vários métodos de confiabilidade, incluindo o método de Monte Carlo direto ou simples.

O processo iterativo da simulação de Monte Carlo exige muitas simulações para obter resultados precisos. O software *Rt* é executado até alcançar o número máximo de simulações ou até que o coeficiente de variação da probabilidade de falha (P_f) atinja um valor desejado. Quando um desses critérios é atingido, o programa fornece a quantidade de simulações realizadas, a probabilidade de falha, o índice de confiabilidade e o coeficiente de variação estimado da probabilidade de falha.

Neste trabalho foi adotado um coeficiente de variação da probabilidade de falha de 2% como critério de parada, conforme recomendado pelo programa utilizado. Esse valor está em conformidade com o intervalo aceitável indicado na literatura, que varia entre 1% e 10% (MÍNGUEZ, 2012).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Três condições de carregamento (CCN, CCE1 e CCE2) são utilizadas para cada modo de falha, totalizando nove probabilidades de falha a serem determinadas. A necessidade de maior ou menor número de simulações para obtenção de valores com precisão apropriada, varia de acordo com a probabilidade a ser estimada. Os índices de confiabilidade podem ser obtidos através da Equação (3.11).

As Tabelas 9, 10 e 11, apresentadas a seguir, trazem os resultados de para cada modo de falha juntamente com as condições de carregamentos incluídas, além disso, apresenta os fatores de segurança (mínimo e obtido), os valores das funções avaliadas deterministicamente, as probabilidades de falha, os índices de confiabilidade, os coeficientes de variação das probabilidades de falha estimadas e o total de 10.000.000 de simulações.

Tabela 9. Resultados relativos ao deslizamento

	CCN	CCE1	CCE2
<i>FSD</i> _{mín}	≥1	≥1	≥1
<i>FSD</i>	1,62	1,92	2,15
<i>g</i> ₁ (kN)	28875,89	25708,87	23822,41
<i>Pf</i>	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$6,53 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
β	3,34	3,21	3,14
CV	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$
#Simulações	10000000	10000000	10000000

FONTE: Elaborado pelo autor

Ao que diz respeito ao modo de falha por deslizamento, como pode ser observado na Tabela 8, entre as condições de carregamento que possuem o mesmo nível normal de água (CCN e CCE2), a condição de carregamento que apresenta a drenagem inoperante (CCE2) tem maior probabilidade de falha, o que é esperado, pois a força de subpressão é maior nesse caso. Na condição de carregamento CCE1, que possui drenagem operante e com nível máximo maximorum, a probabilidade de falha é menor do que a CCE2 que possui nível de água normal, mas drenagem inoperante.

O β alvo estabelecido para o trabalho, foi de 4,3, seguindo o Comitê Europeu de Normatização (2002), para que o índice de segurança mínima seja atendido. Nenhuma das condições de carregamento atinge o índice determinado, contudo, como mencionado, o valor alvo recomendado pelo CEN (2002), não é aplicado em barragens (NEVES, 2022)

Tabela 10. Resultados relativos ao tombamento

	CCN	CCE1	CCE2
<i>FST</i> _{mín}	1,5	1,2	1,2
<i>FST</i>	1,98	1,49	1,52
<i>g</i> ₂ (kN·m)	452825,77	302466,16	314084,62
<i>Pf</i>	*probabilidade de falha próxima a zero, índice β é ≥4.	$8,8 \cdot 10^{-6}$	*probabilidade de falha próxima a zero, índice β é ≥4.
β		4,29	
CV		0,10	
#Simulações	10000000	10000000	10000000

FONTE: Elaborado pelo autor

Referente ao modo de falha por tombamento, para os casos de CCN e CCE2, a probabilidade de falha foi próxima a zero. Para CCE1 a probabilidade encontrada foi

pequena, cerca de $8,8 \cdot 10^{-6}$, isso ocorre por conta de a parcela do empuxo hidrostático a montante ser preponderante nesse caso e favorável ao tombamento. Também pode ser observado que o fator de segurança é menor em CCE1. O β alvo para este modo de falha foi atendido em CCE1 e não foi calculado para os demais modos de falha, pois nenhuma falha ocorreu durante as 10000000 de simulações.

Tabela 11. Resultados relativos à flutuação

	CCN	CCE1	CCE2
<i>FSF_{mín}</i>	1,3	1,1	1,1
<i>FSF</i>	4,61	3,01	2,65
<i>g₃</i> (kN)	24579,28	21325,04	19525,90
<i>P_f</i>			
<i>β</i>	*probabilidade de falha próxima a zero, índice β é ≥ 4 .		
<i>CV</i>			
#Simulações	10000000	10000000	10000000

FONTE: Elaborado pelo autor

O último modo de falha analisado é a flutuação, que assim como o tombamento, mostra probabilidade de falha próxima a zero em todas as condições de carregamento, como apresentado na Tabela 11. Esse modo de falha possui o peso do barramento contra a força de subpressão como forças de atuação. A força estabilizante se torna muito maior que a desestabilizante devido ao peso específico do concreto ser 2,4 vezes maior que a da água. Nenhuma falha ocorreu nas 10.000.000 simulações.

Os resultados encontrados estão de acordo com os FSF frequentemente altos para os barramentos com características similares à UHE utilizada no estudo de caso. Os guias USBR (1976) e USACE (1995), não recomendam a verificação da flutuação, justamente pela probabilidade de falha ser baixa.

6 CONCLUSÃO

Aos poucos, os métodos de confiabilidade estão sendo inseridas nas normas nacionais e internacionais, devido ao aumento do seu uso na análise de diversos problemas estruturais, no Brasil e no mundo. O uso de

métodos semiprobabilísticos não quantificam os efeitos das incertezas, porém, ainda são utilizados em projetos estruturais de barragens. Dessa maneira, buscando alternativas para sanar essa lacuna, surgem as possibilidades de análise que utilizem métodos de confiabilidade estrutural.

De modo geral, o vertedouro da UHE apresentou bons resultados na análise da confiabilidade estrutural. Dentre os três modos de falha avaliados, o deslizamento apresentou valores contrastantes, sendo a condição de carregamento CC2 a mais crítica. Os modos de falha de tombamento e flutuação apresentaram probabilidade de falha consideravelmente menores. Ainda há a necessidade de pesquisas mais aprofundadas que abordem de maneira minuciosa o modo de falha de deslizamento em barragens, para definir a aceitabilidade das mesmas.

Ressalta-se que o estudo se limitou aos modos de falha de perda de equilíbrio global do vertedouro, não sendo possível inferir diretamente sobre a segurança acerca da barragem como um todo, para isso, seria necessário abranger as análises de tensões e deformação para todos os elementos estruturais e fundações.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar um trabalho complementar que aborde a análise das tensões e deformações;
- Avaliar as variáveis que afetam as solicitações, bem como aquelas que afetam a resistência da estrutura;
- Realizar o trabalho com outro software para avaliar se há alguma diferença nos resultados encontrados.

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). **Agência Nacional de Água. Manual do Empreendedor Sobre Segurança de Barragens: Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação Emergencial – PAE.** DF. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Capacidade de Geração do Brasil.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 02/02/2016.

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.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Segurança de Barragens 2020.** Brasília – DF, 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB.** Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 21 de março de 2020.

ANDRIOLO, F.R. **The Use of Roller Compacted Concrete.** São Paulo: Oficina de Textos, 1998

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

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti - MG.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BAPTISTA, M.; LARA, M. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Belo Horizonte. Ed. UFMG, 2014.

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

BECK, A. T., **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. Elsevier, 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Brasília, DF, 2010.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística Básica**. 5 ed., São Paulo: Saraiva, 2004.

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

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A História das Barragens no Brasil - Séculos XIX, XX e XXI - 50 Anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Comitê Brasileiro de Barragens, Rio de Janeiro, 2011.

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

COELHO, J.A. **Confiabilidade de vigas de concreto armado no estado limite de serviço**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

COSTA E SILVA, D. C. **Segurança de pequenas barragens: estudo comparativo com as principais políticas internacionais para aprimoramento da aplicação da política nacional de segurança de barragens**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia), Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2021.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

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

DITLEVSEN, O.; MADSEN, H.O. **Structural Reliability Methods**. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Kongens Lyngby. 2005.

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

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

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. DF. 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **Basis of structural design**. EN 1990. Brussels, Belgium, 2001.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dams & the World's Water – An educational book that explains how dams help to manage the world's water**. International Commission on Large Dams, Paris, 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **World Register of Dams. General Synthesis**, 2020. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp>. Acesso em: 09 jul. 2023.

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

KUPERMAN, S. C. **Concreto Massa Convencional e Compactado Com Rolo para Barragens**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1ªed.São Paulo: IBRACON-Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v. 2, p. 1259-1295.

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

MAHSULI, M.; HAUKAAS, T. “**Computer program for multimodel reliability and optimization analysis**.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(1), pp. 87–98, 2013.

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.

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

NEVES, B.S. **Análise de confiabilidade estrutural de uma barragem de gravidade de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

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

NOVAK P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan. **Hydraulic Structures**. 4 ed., Taylor & Francis, Oxon, 2007.

PEREIRA, Geraldo Mangela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas**. Oficina de Textos, São Paulo, 2016.

PIRES, K. O., BECK, A. T., BITTENCOURT, T. N., & FUTAI, M. M. (2019). **Reliability analysis of built concrete dam**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(3), 551–579. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000300007>

POSSAN, Edna. **Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais: Barragens de Concreto**. Curso Segurança de Barragens. ANA, 2013.

RIBEIRO, A. C. B.; ALMEIRDA, I. R. **Study on high performance roller compacted concrete**. *Materials and Structures*, Paris, v. 33, p.p. 398-402, jul. 2000.

RICARDO, A.S. **Análise da confiabilidade estrutural de elementos de aço em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SCHREIBER, Gerhard P.. **Usina Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 1977. 254 p.

TSCHIEDEL, A. F. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VOLKMER, MARIANA VOGT. **Análise de Subpressão em Fundações Rochosas e seus Efeitos na Estabilidade de Barragens Tipo Gravidade.** Distrito Federal. (ENC/FT/UnB).2011.