

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIELE RAMOS

**ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA NA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO À GRAVIDADE**

GUARAPUAVA

2021

MARIELE RAMOS

ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO À GRAVIDADE

Deterministic and probabilistic approach to gravity concrete stability analysis

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a MSc Marcela Maier Farias Czap.

GUARAPUAVA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARIELE RAMOS

ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO À GRAVIDADE

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02 de dezembro de 2021

MSc Marcela Maier Farias Czap
Mestra
Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR

MSc Jean Lucas dos Passos Belo
Mestre
Instituto Tecnológico da Aeronáutica- ITA

Dra. Mariane Kempka
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR

GUARAPUAVA

2021

Dedico este trabalho com muito amor e carinho aos meus amados pais,
Manoel e Osmarina.

AGRADECIMENTOS

Especialmente e acima de tudo quero agradecer a Deus, que sempre providenciou mais que o necessário em cada fase da minha graduação. A Deus toda honra e toda glória! Meu Deus me ajudou até aqui.

A minha família por todo apoio e incentivo, por acreditarem que esse sonho pudesse se tornar realidade. Meus pais, essa conquista também é de vocês que nunca mediram esforços apesar de tudo, para que eu pudesse concluir essa etapa.

Agradeço de todo coração pelas orientações da prof.^a Marcela, que sem suas considerações, compreensão e paciência, não seria possível concluir esse trabalho.

Aos meus amigos da faculdade, agradeço por sempre estarmos juntos nessa jornada acadêmica, que sem vocês certamente não seria a mesma.

Gostaria de agradecer também a cada professor(a) que fez parte desses anos de graduação, por serem comprometidos, responsáveis, inspiradores e por transmitirem conhecimento de qualidade em suas disciplinas.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Historicamente, obras de reservação são construídas há milhares de anos. No passado as barragens eram utilizadas para acumulação de água, para fins como o abastecimento, a irrigação e o controle de enchentes. Estruturas como essas, possibilitaram o desenvolvimento da sociedade. Nos dias atuais, além dessas, as barragens possuem outras finalidades, como por exemplo, navegação, turismo, piscicultura e para a geração de energia elétrica. Vale destacar, que barragens são estruturas estáveis quando se possui um controle de projeto, execução e manutenção rigorosa. A segurança global dessas obras deve ser garantida por meio de análises de estabilidade ao deslizamento, ao tombamento, a flutuação, tensões atuantes admissíveis, flambagem, vibrações, deformações e recalques. Diante disso, o principal objetivo deste trabalho é analisar a estabilidade de uma barragem de concreto do tipo gravidade, a partir do perfil da seção vertedoura da Usina Hidrelétrica de Derivação do Rio Jordão com base em parâmetros adotados da literatura característica, por meio de métodos determinísticos, e comparar os resultados encontrados na simulação numérica com os dados obtidos por meio da abordagem a estabilidade da barragem de maneira probabilística utilizando a Simulação de Monte Carlo. Os cálculos foram desenvolvidos através da elaboração de planilhas eletrônicas. Todos os esforços solicitantes e resistentes foram calculados, de acordo com o Manual de Critérios de Projetos Cíveis de Usinas Hidrelétricas elaborado pela Eletrobrás em 2003, e as verificações quanto ao tombamento, deslizamento e flutuação compõe o resultado denominado como determinístico. Posteriormente, são inseridas as informações de variabilidade dos parâmetros considerados da barragem através da arbitragem de um desvio-padrão. Concomitantemente, um simulador de pseudo-números aleatórios foi criado para que todo o processo de cálculo tenha um caráter de simulação de evento real, apresentando como resultado a probabilidade de ruptura e um índice de confiabilidade. Conclui-se que as abordagens probabilísticas auxiliam a obtenção de resultado mais significativo, uma vez que se considera a incerteza dos parâmetros envolvidos, apresentando resultados atrelados a um nível de confiança. E que a partir dos parâmetros considerados para as simulações, a barragem apresentou-se fatores de segurança superiores aos mínimos recomendados pelos critérios da Eletrobrás (2003).

Palavras-chave: barragem de concreto; segurança de barragem; Monte Carlo.

ABSTRACT

Historically, reservation works have been built for thousands of years. In the past, dams were used to accumulate water, for purposes such as supply, irrigation and flood control. Structures like these made the development of society possible. Nowadays, in addition to these, dams have other purposes, such as navigation, tourism, fish farming and for the generation of electricity. It is worth noting that dams are stable structures when there is strict design, execution and maintenance control. The overall safety of these works must be guaranteed through analysis of stability to sliding, tipping, floating, permissible acting stresses, buckling, vibrations, deformations and settlements. Therefore, the main objective of this work is to analyze the stability of a gravity-type concrete dam, from the profile of the spillway section of the Rio Jordão Hydroelectric Power Plant, based on parameters adopted from the characteristic literature, using deterministic methods, and compare the results found in the numerical simulation with the data obtained through the dam stability approach in a probabilistic way using the Monte Carlo Simulation. The calculations were developed through the elaboration of electronic spreadsheets. All requesting and resistant efforts were calculated, in accordance with the Criteria Manual for Civil Projects of Hydroelectric Power Plants prepared by Eletrobrás in 2003, and the checks regarding tipping, slipping and floating compose the result called as deterministic. Subsequently, the variability information of the parameters considered for the dam is inserted through the arbitration of a standard deviation. Concomitantly, a pseudo-random number simulator was created so that the entire calculation process has a real-event simulation character, presenting as a result the rupture probability and a reliability index. It is concluded that probabilistic approaches help to obtain a more significant result, since the uncertainty of the parameters involved is considered, presenting results linked to a level of confidence. And that, based on the parameters considered for the simulations, the dam presented safety factors higher than the minimum recommended by the criteria of Eletrobrás (2003).

Keywords: concrete dam; dam safety; Monte Carlo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Usina hidrelétrica Governador José Richa-Salto Caxias - barragem de concreto tipo gravidade	18
Figura 2 - Diagrama de classificação de órgãos de fiscalização de barragens brasileiras	20
Figura 3 - Principais ações atuantes em uma seção típica de barragem a gravidade	22
Figura 4 - Distribuição das pressões hidrostáticas e subpressão, sem linha de drenos ou drenos inoperantes	26
Figura 5- Distribuição das pressões hidrostáticas e subpressão, com uma linha de dreno.....	27
Figura 6- Força de empuxo devido à presença de material assoreado	29
Figura 7- Fator de segurança, margem de segurança e probabilidade de ruína.....	36
Figura 8- Barragem de Derivação do Rio Jordão	39
Figura 9- Seção típica da soleira vertente- Barragem de Derivação do Rio Jordão..	40
Figura 10- Nível de água máximo maximorum arbitrado	42
Figura 11- Nível de água máximo arbitrado	43
Figura 12- Nível de água normal arbitrado	43
Figura 13- Nível de água mínimo arbitrado	44
Figura 14- Perfil básico considerado para cálculo	53
Figura 15- Diagrama dos esforços atuantes para CCN	55
Figura 16- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-1	56
Figura 17- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-2	56
Figura 18- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-3	57
Figura 19- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-4	57
Gráfico 1 – Função de destruição normal- Peso específico do concreto	48
Gráfico 2 – Função de destruição normal- Ângulo de atrito contato concreto-rocha.	49
Gráfico 3 – Função de destruição normal- Peso específico do sedimento	50
Gráfico 4 – Função de destruição normal- ângulo de atrito interno (sedimento).....	51
Gráfico 5 –Convergência dos métodos de Monte Carlo para o FSDprob-CCE-4 por meio da Probabilidade de falha	61
Quadro 1- FSF mínimos admissíveis de acordo com a Eletrobrás (2003).....	33
Quadro 2- FST mínimos admissíveis de acordo com a Eletrobrás (2003).....	34
Quadro 3- Fatores de Redução da Resistência do Atrito e da Coesão <i>FSDΦ</i> e <i>FSDc</i>	35
Quadro 4- Níveis de água arbitrados para efeito de simulação no reservatório	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peso específico da Barragem de Derivação do Rio Jordão.....	47
Tabela 2 - Parâmetros da variável- Peso específico do concreto	47
Tabela 3 - Parâmetros da variável- Ângulo de atrito no contato concreto-rocha	48
Tabela 4 - Parâmetros da variável- Peso específico do sedimento	49
Tabela 5 - Parâmetros da variável- ângulo de atrito médio interno do sedimento	50
Tabela 6 - Parâmetros das variáveis adotadas no estudo	51
Tabela 7- Resumo das ações consideradas para verificficação da barragem	54
Tabela 8- Verificação da estabilidade à flutuação através de análise determinística– Critério Eletrobrás (2003).....	58
Tabela 9- Verificação da estabilidade ao tombamento através de análise determinística– Critério Eletrobrás (2003)	59
Tabela 10- Verificação da estabilidade ao deslizamento através de análise determinística– Critério Eletrobrás (2003)	60
Tabela 11- Verificação da estabilidade a flutuação através de análise probabilística– Critério Eletrobrás (2003).....	62
Tabela 12- Verificação da estabilidade ao tombamento através de análise probabilística– Critério Eletrobrás (2003)	63
Tabela 13- Verificação da estabilidade ao deslizamento através de análise probabilística– Critério Eletrobrás (2003)	63
Tabela 14- Resumos dos fatores de segurança flutuação- FSF	64
Tabela 15- Resumos dos Fatores De Segurança Tombamento- FST	65
Tabela 16- Resumos dos Fatores De Segurança Deslizamento- FSD	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivo	14
1.2.1	Objetivos secundários	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Barragens: conceitos iniciais	15
2.2	Barragem de concreto a gravidade	17
2.3	Segurança de barragens	18
2.4	Análise de estabilidade determinística	20
2.4.1	Ações atuantes.....	21
2.4.2	Condições de carregamentos	29
2.4.3	Análise de estabilidade global	32
2.5	Análise de estabilidade probabilística	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Informações da barragem em estudo: Barragem de Derivação do Rio Jordão	39
3.1.1	Propriedades geométricas.....	39
3.1.2	Propriedade dos materiais.....	40
3.1.3	Níveis de água no reservatório	41
3.2	Modelagem computacional	44
3.2.1	Abordagem por meio determinístico	44
3.2.2	Abordagem por meio probabilístico: Simulação de Monte Carlo.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Resultados a partir da abordagem determinística	52
4.2	Resultados a partir da abordagem probabilística- Monte Carlo	60
4.3	Resumo dos resultados das abordagens	64
5	CONSIDERAÇÕES	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água é uma condição básica para o desenvolvimento da sociedade. A concepção de reservatórios de água para diferentes fins criou condições favoráveis ao desenvolvimento das cidades e à melhoria da qualidade de vida da população (COSTA, 2012). A construção de barragens traz inúmeros benefícios, dentre os quais pode-se destacar o abastecimento de água, a geração de energia hidrelétrica, a navegação, o turismo, a piscicultura, o controle de enchentes e de contenções, e inúmeros outros (MOLITERNO, 1995).

As barragens são estruturas estáveis quando possuem um controle de projeto, execução e uma rigorosa manutenção. Dessa forma, a segurança dessas obras deve ser garantida a partir da verificação de várias condições. Nesse cenário, deve-se analisar a segurança global da estrutura: à resistência ao deslizamento, tanto da fundação quanto da estrutura; à segurança quanto ao tombamento; à segurança quanto à flutuação; e as tensões admissíveis na base da fundação e na estrutura. Outros fatores que podem ser considerados na análise de segurança são às condições de operação futuras, a propensão a aparição de fissuras, infiltração e o envelhecimento da barragem (MARQUES, 2015).

Portanto, a escolha do tipo de barragem que melhor se enquadre às condições existentes de cada empreendimento depende de uma série de análises. A barragem do tipo concreto-gravidade, é uma estrutura maciça de concreto, projetada de forma a resistir aos esforços solicitantes por meio da ação do seu peso próprio. Esse tipo de barramento oferece algumas vantagens, sendo o baixo custo de manutenção, a simplicidade de projeto e o grau de segurança. Entretanto, seu emprego é mais adequado quando a fundação possui uma resistência considerável (GUTSTEIN, 2003).

Para análise de estabilidade, de acordo com Moura (2016), são empregados métodos analíticos por vezes simplificados. Tais métodos não contemplam todas as variáveis envolvidas que possam influenciar na estabilidade da barragem de forma direta. Araujo e Sayão (2018) sugerem a integração complementar de análises probabilísticas às análises determinísticas, oferecendo um cenário mais completo para verificação das condições de estabilidade.

Assim, por meio dos critérios de dimensionamento, seguindo as diretrizes recomendadas pela Eletrobrás (2003) no Manual de Critérios de Projetos Cíveis de Usinas Hidrelétricas, a delimitação deste trabalho é analisar uma barragem de concreto do tipo à gravidade, avaliando a estabilidade dessa estrutura, através de métodos determinísticos e probabilísticos.

1.1 Justificativa

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens referente ao ano de 2020, a segurança de barragens é uma condição que tem como viés manter a integridade estrutural e operacional, com o intuito de reduzir o risco de incidentes e acidentes. A segurança dos empreendimentos é um tema que possui muita relevância no aspecto social, ambiental e econômico, portanto, é necessário considerá-la em toda a vida útil do barramento e desativação se vier ao caso (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021a).

Considerando que os benefícios gerados pelas barragens são fundamentais para o desenvolvimento do nosso país, debater sobre o tema torna-se necessário. Pois, segundo os dados disponibilizados pelo Balanço energético nacional referente ao ano de 2020 (2021), a matriz energética corresponde a 65,2% da oferta interna advinda de usinas hidrelétricas, e os dados disponíveis no Atlas Água publicado pela Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (2021b) no âmbito de abastecimento urbano, 43% das sedes são abastecidas através de manancial superficial (açudes, represas e rios) e 17 % abastecidas de forma mista (manancial superficial e subterrâneos); além de outras formas utilizadas como para irrigação, controle de enchentes, a viabilização de navegação e entre outras (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021a), evidenciando a influência dessas obras no cotidiano da população.

Para manter as estruturas de barragens seguras, é recomendado que ações estratégicas sejam realizadas, como revisão periódica de barragens (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021a) e estudo da seção considerando análises dos parâmetros do projeto e de estabilidade da barragem levando em conta as informações atualizadas, citado em Análises Adicionais de Verificação de Projeto (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016). Neste sentido, o

estudo sobre barragens existentes abordada de maneira probabilística, auxiliará com o propósito de apresentar a estabilidade da estrutura com um índice de confiabilidade, uma vez que considera a variabilidade dos materiais.

1.2 Objetivo

O presente estudo tem como objetivo principal verificar a estabilidade da barragem de concreto do tipo gravidade da Usina Hidrelétrica de Derivação do Rio Jordão a partir da análise de uma seção típica do perfil transversal da barragem adotando parâmetros disponíveis na literatura, em trabalhos publicados e barragem semelhantes como referência, seguindo os critérios estabelecidos pela Eletrobrás (2003).

1.2.1 Objetivos secundários

Os objetivos secundários desse trabalho são:

- ✓ Abordar a estabilidade da barragem em estudo de maneira determinística;
- ✓ Abordar a estabilidade da barragem em estudo de maneira probabilística;
- ✓ Comparar os resultados entre as análises determinística e probabilística;
- ✓ Com os resultados obtidos na abordagem probabilística discutir sobre a importância de abordar a variabilidade dos parâmetros empregados no dimensionamento barragem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Barragens: conceitos iniciais

As barragens podem ser definidas como obstáculos artificiais que cortam córregos, rios ou canais, com o intuito de reter, e dessa forma controlar o fluxo de água. Também possuem capacidade de confinar rejeitos ou detritos para fins de armazenamento. As barragens podem variar tanto em tamanho como em composição de materiais, e vão desde pequenos maciços de terra até enormes estruturas de concreto (ICOLD, 2008).

Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2008), as barragens são construídas há milhares de anos. Historicamente, essas estruturas serviam como reservatório de água, contribuindo para que as pessoas tivessem acesso a fontes confiáveis de fornecimento. Viabilizavam a irrigação, além de serem efetivas no controle de enchentes.

A partir de meados do século XIX, começaram a ser empregadas para geração de energia elétrica e navegação (ICOLD, 2008). As primeiras barragens para geração de energia elétrica construídas no Brasil foram implantadas no final do século XIX, com dimensões discretas e com capacidade de carga relativamente modesta (CBDB, 2011). Segundo Cruz (2004), ainda que a construção de barragens seja praticada há tanto tempo, somente no século XX houve um aumento considerável tanto na quantidade quanto em dimensão dessas estruturas.

Por conta de experimentações e pesquisas feitas ao longo dos anos, progressos foram alcançados de maneira a proporcionar melhorias em futuros projetos de instalação de barragens. Dessa forma, essas obras tornaram-se cada vez mais seguras e econômicas (MARQUES, 2015). Nos dias atuais, as barragens podem assumir diversas finalidades e objetivos, e podendo ser separadas, em relação aos seus propósitos, formando dois grandes grupos, as barragens de regularização e as barragens de retenção (COSTA, 2012).

As barragens de regularização têm o objetivo de normalizar o regime hidrológico. Isso acontece porque é feito o armazenamento de água nas épocas em que a afluição é maior que o consumo, a fim de utilizá-la nos períodos de estiagem, de modo que ocorra uma regularização da vazão. Conforme aplicação específica, o

aumento do volume de água armazenada é obtido, sendo este o objetivo de barragens utilizadas para o abastecimento doméstico, industrial e para irrigação. Outra finalidade é a elevação do nível natural do rio, permitindo a geração de energia elétrica através da transformação da energia potencial hidráulica gerada pela queda de água. Além disso, vale destacar, que esse aumento de nível pode ainda ser aproveitado na melhora das condições de navegação fluvial, da piscicultura e da criação de lagos como forma aproveitamento turístico local (ASSIS, 2006).

Já as barragens de retenção, são utilizadas para reter a água, por período temporário, ou para o acúmulo de resíduos industriais, sejam estes rejeitos de mineração ou sedimentos. A retenção de água é feita para amortecer a onda de enchente. Como a água é armazenada por tempo determinado e liberada de maneira que a vazão efluente não cause danos à jusante, o objetivo principal desse tipo de barragem é o controle da incidência de inundações. Porém, quando a finalidade é a contenção de cargas sólidas ou mistas, têm o propósito de evitar que os materiais contidos entrem em contato com o leito dos cursos d'água à jusante, a fim de preservá-los de danos tanto fisicamente, como o assoreamento; quanto quimicamente, por conta das cargas tóxicas poluentes presentes em alguns materiais (COSTA, 2012).

Segundo Pereira (2015), os tipos de barragem são variáveis e são influenciados por condicionantes locais, como por exemplo a existência ou não de material a ser utilizado. Tecnicamente as soluções viáveis são muitas e optar por uma seção requer um processo iterativo pelo critério de menor custo global, segurança e qualidade. Usualmente as barragens podem ser classificadas pelos materiais usados e pelas formas que as constituem. Costa (2012) classifica as barragens conforme o seu tipo, dividindo em dois grupos: (a) as convencionais, que são amplamente usadas e possuem uma variedade de estudos na literatura especializada, cujo grupo é composto por barragens de concreto, terra, enrocamento e barragens mistas; (b) e as não convencionais, que são pouco empregadas, como por exemplo, barragens de gabião, madeira e alvenaria de pedra.

2.2 Barragem de concreto a gravidade

De acordo com Possan (2020), as barragens de concreto podem ser subdivididas conforme sua forma e geometria em quatro tipos: gravidade, gravidade aliviada, contrafortes e arco.

Conforme U.S. Army Corps of Engineers (1995), as barragens de concreto a gravidade são estruturas sólidas, projetadas de maneira que mantenham sua estabilidade frente as ações impostas a estrutura, através de sua forma geométrica, sua massa e por meio da resistência do concreto. O equilíbrio estático é garantido principalmente pelo próprio peso da estrutura.

Em geral, esse tipo de barramento é construído em perfil triangular, contudo, conforme as condições específicas onde serão empregadas, podem ser levemente curvadas, ou ainda ser anguladas. Além disso, as barragens de gravidade podem constituir-se de uma seção com vertedouro ou não, dependendo de sua função dentro do que foi projetada (GUTSTEIN, 2003).

Em virtude ao grande volume de concreto utilizado nesses arranjos, estes requerem cuidados com seu comportamento térmico. Os efeitos gerados por meio das tensões de origem térmica são minimizados através de vários blocos de concreto separados um do outro mediante junta de contração (POSSAN, 2020).

Os sistemas construtivos adotados para concepção de barragens à gravidade, geralmente correspondem ao uso do concreto massa vibrado (CCV) e do concreto compactado a rolo (CCR). Ao contrário do CCV, do qual o método construtivo é fundamentado na maneira convencional de concretagem com adensamento por meio de vibração, o sistema em CCR é definido como concreto de consistência seca, com abatimento nulo, o qual é transportado, espelhado e compactado de forma continua pelos mesmos equipamentos usualmente utilizados em barragens de terra. A execução de cada camada é projetada em espessuras em torno de 30 centímetros, e as juntas devem ser feitas cuidadosamente de modo a garantir boa aderência e resistência ao cisalhamento (GUTSTEIN, 2011).

Há exemplo, a Usina hidrelétrica Governador José Richa-Salto Caxias (ver Figura 1) é uma barragem de concreto a gravidade localizada no estado do Paraná, a qual empregou o método CCR, possui 67 metros de altura e 1083 metros de comprimento (COPEL, 2018).

Figura 1 - Usina hidrelétrica Governador José Richa-Salto Caxias - barragem de concreto tipo gravidade



Fonte: COPEL (2021a)

2.3 Segurança de barragens

Para que a estrutura da barragem seja dita segura são necessários que os critérios técnicos de segurança estrutural sejam atendidos. Com esse propósito, deve haver compatibilização entre projeto, execução e manutenção de modo que possa garantir seu correto funcionamento (AGUIAR, 2014). O Relatório de Segurança de Barragens referente ao ano de 2019, destaca que as barragens existentes devem ser reavaliadas periodicamente com o intuito de analisar as suas condições e assegurar seus padrões de segurança (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2020).

No Brasil, em 2010 foi estabelecida a Lei N°12.334 (BRASIL, 2010), a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e a criação do Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB). Cujas políticas são aplicadas a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos; à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos Industriais.

Em 2020, com alterações na Lei n°12.334, a PNSB tem como objetivos (BRASIL, 2020):

- ✓ Regular e promover o monitoramento e acompanhamento das ações de segurança utilizadas pelos responsáveis;
- ✓ Criar condições para que se amplie o controle e gerenciamento das barragens pelo poder público;
- ✓ Garantir a observância de padrões de segurança de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;
- ✓ Definir procedimentos emergenciais estimulando atuação conjunta em casos de incidentes, acidentes ou desastres, entre empreendedores, fiscalizadores e órgãos de proteção e defesa civil.

Conforme o art.1º, a PNSB é aplicável a qualquer tipo de barragem que contenha, pelo menos uma das características a seguir: altura do maciço seja maior ou igual a 15 metros, contada a partir do encontro do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento; o reservatório tenha capacidade total igual ou maior a 3.000.000 (três milhões) de metros cúbicos de armazenamento; o reservatório armazene resíduos perigosos conforme as normas aplicáveis; ou ainda, que apresente categoria de dano potencial associado e categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador conforme descrito nesta mesma lei (BRASIL, 2020).

No que tange a classificação das barragens, de acordo com o art. 7º da PNSB (BRASIL, 2010), serão classificadas através dos agentes fiscalizadores, a partir da categoria de risco, do dano potencial associado e do seu volume, tendo como base os critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH). A classificação das barragens deve ser feita pelas entidades fiscalizadoras. Na Figura 2 é mostrado um diagrama sobre o órgão responsável pela fiscalização.

Figura 2 - Diagrama de classificação de órgãos de fiscalização de barragens brasileiras



Fonte: Adaptado de Agência Nacional De Águas E Saneamento Básico (2020)

2.4 Análise de estabilidade determinística

Tradicionalmente na engenharia, a segurança de projetos é abordada de forma determinística, e no dimensionamento considera-se os parâmetros valores únicos, desconsiderando as incertezas associadas e a distribuição probabilística das variáveis (ARAÚJO, 2018).

No Brasil, não existem normas específicas para projeto e dimensionamento de barragens, apenas diretrizes de dimensionamento fornecidas por critérios reconhecidos internacionalmente, como USBR¹, USACE², e pela Eletrobrás, (MARQUES, 2015).

A não exigência normativa para o dimensionamento e projeto de barragens no Brasil, possibilita a aplicação de métodos de análise de estabilidade determinísticos, que têm como resultado um único valor numérico de Fator de Segurança para cada caso de ação em estudo. Valores mínimos de Fatores de Segurança são estabelecidos nas diretrizes, tendo como base a experiência adquirida durante a execução e vida útil de barragens construídas no passado (ELETROBRÁS, 2003).

¹ United States Department of the Interior Bureau of Reclamation

² United States Army Corps of Engineers

Para o desenvolvimento de uma análise de estabilidade determinística em uma barragem de concreto à gravidade, é necessário o conhecimento das propriedades (ELETROBRÁS, 2003):

- ✓ Propriedades geométricas;
- ✓ Propriedades dos materiais;
- ✓ Propriedades da fundação;
- ✓ Níveis de água.

As diretrizes da Eletrobrás (2003), para projetos de barragem de concreto a gravidade estão descritas a seguir.

2.4.1 Ações atuantes

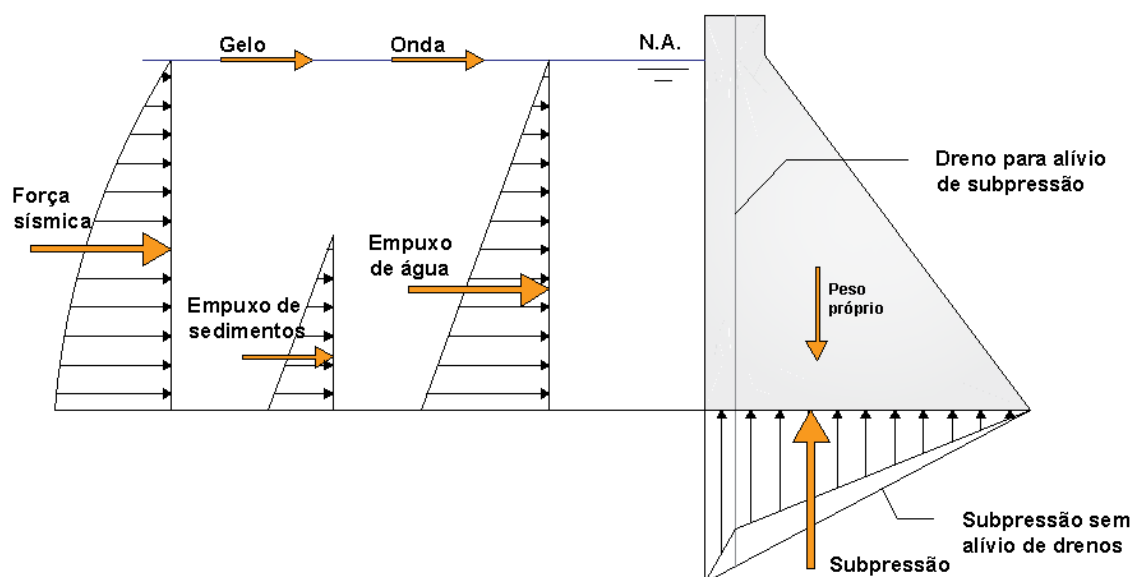
Em um projeto de barragem de concreto para aproveitamento hidráulico, o conhecimento das ações atuantes, dos esforços presentes e da estabilidade da estrutura se fazem indispensáveis. As ações atuantes podem ser definidas como toda influência exercida sobre a estrutura capaz de provocar um estado de tensão ou modificar a já existente (POSSAN, 2020). Todos os fatores que possam de alguma forma influenciar a estrutura devem ser analisados, pois interferem na segurança e na estabilidade da barragem. Porém dependendo do caso, alguns esforços são considerados mais relevantes do que outros no dimensionamento (MARQUES, 2015).

As principais ações atuantes a serem consideradas na verificação da estabilidade e análise de tensões, em conformidade com o Critérios de projetos civis de usinas hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2003), podem ser:

- ✓ Peso próprio e sobrecargas;
- ✓ Pressões hidrostáticas;
- ✓ Pressões hidrodinâmicas;
- ✓ Subpressão;
- ✓ Empuxo de materiais assoreados;
- ✓ Forças sísmicas;
- ✓ Efeitos da temperatura;
- ✓ Deformação lenta do concreto.

Na Figura 3, é apresentada uma seção típica de barragem de concreto do tipo gravidade com as principais ações atuantes sobre a estrutura.

Figura 3 - Principais ações atuantes em uma seção típica de barragem a gravidade



Fonte: Adaptado de Novak et al. (2004)

Nos itens que seguem serão apresentadas algumas das ações atuantes e os procedimentos usuais indicado pela Eletrobrás (2003) para determinação de seus valores.

a) Peso Próprio e sobrecarga:

O peso próprio da estrutura é considerado como uma carga permanente, e está intimamente ligado ao peso específico do concreto (POSSAN, 2020). Sua determinação se dá por meio do produto entre o peso específico do concreto utilizado com o volume da barragem (ELETROBRÁS, 2003). O peso próprio pode ser obtido através da Equação 1.

$$P_p = \gamma_c \times V \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

P_p é o peso próprio [kN];

γ_c é o peso específico do concreto [kN/m³] e;

V é o volume da estrutura [m³].

O peso específico do concreto de acordo com a Eletrobrás (2003) varia conforme o tipo do agregado empregado, entre 21 kN/m³ a 26 kN/m³.

Além do peso próprio, outra ação permanente que pode ser considerada são as cargas diversas, constituídas pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e demais instalações permanentes. A Eletrobrás (2003), recomenda que na falta de determinação experimental poderá ser utilizado a NBR 6120/1980³.

Ademais, as sobrecargas são consideradas como cargas variáveis, as quais podem agir sobre a estrutura em função de sua utilização ou construção. Dessa forma, as condições de carregamento transitório, de construção e/ou de montagem de equipamentos eletromecânicos, deverão ser considerados nos cálculos das peças estruturais (ELETROBRÁS, 2003).

b) Pressões hidrostáticas:

As pressões hidrostáticas ou empuxo hidrostático, conforme a Eletrobrás (2003), variam de forma linear com a profundidade a partir da superfície da água, a montante e a jusante da barragem, e são representadas por meio de diagramas triangulares ou trapezoidais. A priori, as cargas hidrostáticas devem ser consideradas como atuando também nas áreas de aberturas, essas considerações são necessárias para análise de estabilidade global da estrutura.

Para as situações em que o nível de água se encontra na mesma cota ou abaixo da seção da barragem, conforme a Eletrobrás (2003), o empuxo hidrostático é aplicado a dois terços do nível de água compreendido a partir da cota inferior, e seu valor pode ser obtido por meio da Equação 2.

$$E = \left(\frac{\gamma_a \times H_m J^2}{2} \right) \times B \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

E é o empuxo hidrostático [kN];

³ NBR 6120 (1980): Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Esta Norma fixa as condições exigíveis para determinação dos valores das cargas que devem ser consideradas no projeto de estrutura de edificações, qualquer que seja sua classe e destino, salvo os casos previstos em normas especiais.

γ_a é o peso específico da água [kN/m³];

$H_{m,j}$ é o nível de água a montante H_m [m] ou nível de água a jusante H_j [m] e;

B é a largura da seção [m].

Em casos em que o nível de água analisado for acima da cota da seção estudada, deverão ser considerados os esforços de empuxo atuando sobre a estrutura, representado por meio de um diagrama trapezoidal (ELETROBRÁS, 2003).

Já o esforço vertical exercido pela água sobre a estrutura, pode ser determinado a partir da Equação 3.

$$P_a = \gamma_a \times V_a \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

P_a é o peso da água sobre a estrutura [kN];

γ_a é o peso específico da água [kN/m³] e;

V_a é o volume de água sobre a estrutura [m³].

c) Pressões hidrodinâmicas:

As pressões hidrodinâmicas são ações oriundas das pressões atuantes na estrutura e relacionadas ao escoamento de água. A determinação dessas pressões, na maior parte das vezes, é feita por meio de ensaios em modelos hidráulicos (POSSAN, 2020).

As principais pressões hidrodinâmicas devidas a esforços hidráulicos são correspondentes ao escoamento superficial, tais como em crista de vertedouro, bacias de dissipação, entre outras; carga advinda de transientes hidráulicos, como cargas devidas ao fechamento ou abertura de comportas/válvulas; e as devidas à partida ou parada de turbinas (ELETROBRÁS, 2003).

Já as pressões hidrodinâmicas devido a ações sísmicas, são determinadas para cada caso específico. Quando não for possível fazer uma avaliação mais apurada dos esforços de origem sísmica, pode-se utilizar um problema equivalente de

forças estáticas descritas com mais detalhes nos Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétrica da Eletrobrás (2003).

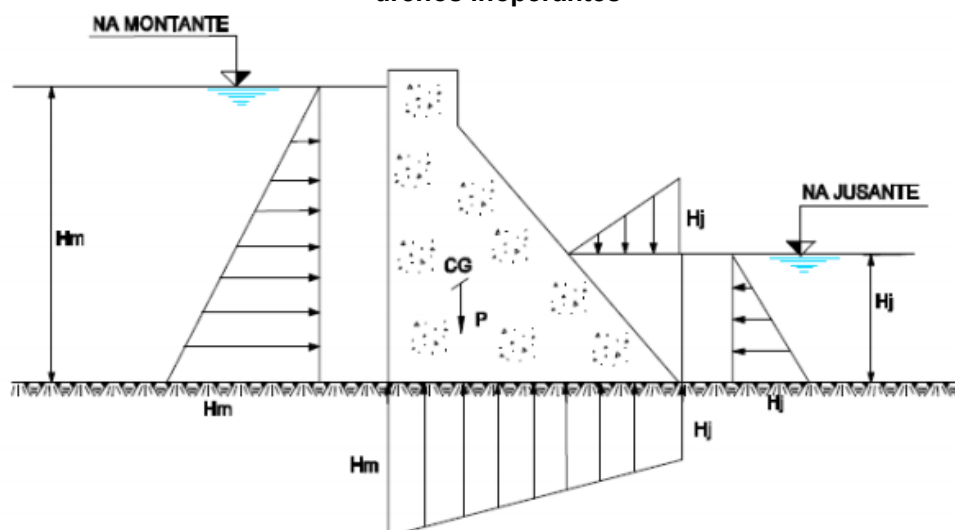
d) Subpressão:

De acordo com Levis (2006), a subpressão é um esforço que ocorre na base da estrutura no sentido ascendente, em função da pressão que ocorre devido a percolação da água, seja ela na fundação ou em seção de concreto, de rocha ou de aterros, e que podem ser determinadas a partir de análise de redes de fluxo.

Conforme a Eletrobrás (2003), na maior parte dos casos as análises podem ser simplificadas em redes de fluxo que contenham uma variação linear de perdas de carga ao longo de linhas de fluxo preferenciais.

Em fundações contínuas, a subpressão deve ser considerada atuando sobre toda a área da base. Em que se tratando da subpressão que ocorre na extremidade de montante, esta deve ser considerada igual a altura hidrostática à montante, a partir do nível de água do reservatório. O mesmo deve ser adotado para a subpressão exercida na extremidade à jusante, ou seja, esta é correspondente a altura hidrostática de jusante, a partir do nível especificado à jusante. Para os casos que não forem utilizados drenos ou drenos inoperantes, admite-se uma variação linear entre os valores de subpressão das extremidades de montante e de jusante (ELETROBRÁS, 2003), conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Distribuição das pressões hidrostáticas e subpressão, sem linha de drenos ou drenos inoperantes



Fonte: Eletrobrás (2003)

Assim, a Subpressão para esse caso onde não foram utilizados drenos ou com drenos inoperantes, pode ser obtida através da Equação 4.

$$U = \gamma_a \times B \times \left(H_j \times L + \frac{(H_m - H_j) \times L}{2} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Na qual:

U é a subpressão com drenos inoperantes ou sem drenos [kN];

γ_a é o peso específico da água [kN/m³];

B é a largura da seção [m];

L é a largura da base [m];

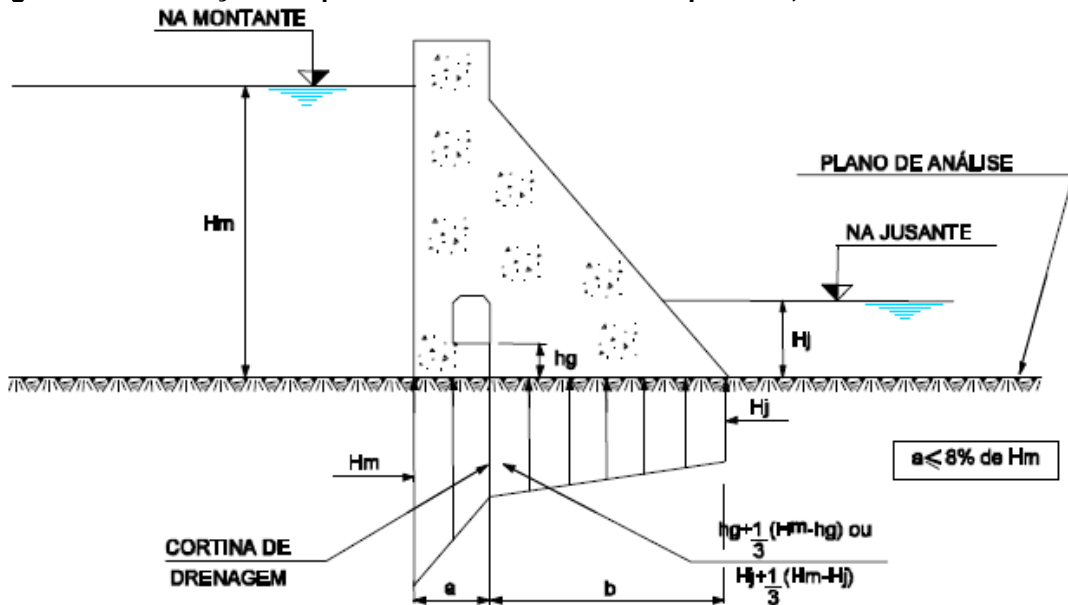
H_m é o nível de água a montante [m] e;

H_j é o nível de água a jusante [m].

Para os casos em que houver uma linha de drenos operantes (ver Figura 5), conforme a Eletrobrás (2003), os procedimentos para a determinação em que a cota inferior da galeria de drenagem for igual ou inferior a cota do nível de água de jusante, a subpressão na linha de drenos será igual à altura hidrostática correspondente ao nível d'água de jusante acrescido de um terço da diferença entre as alturas hidrostáticas de montante e jusante. A partir desse ponto, a subpressão deverá variar

linearmente até as extremidades da base. Nessa situação a subpressão será obtida a partir da aplicação da Equação 5 na Equação 6.

Figura 5- Distribuição das pressões hidrostáticas e subpressão, com uma linha de dreno



Fonte: Eletrobrás (2003).

Como $H_j \geq H_g$, então:

$$h_{dm} = H_j + \frac{1}{3}(H_m - H_j) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

H_{dm} é o nível de água na linha de drenagem [m];

H_m é o nível de água a montante [m] e;

H_j é o nível de água a jusante [m].

$$U = \gamma_a \times B \left[(H_{dm} \times a) + \frac{a \times (H_m - H_{dm})}{2} + h_j \times b + \frac{b \times (H_{dm} - H_j)}{2} \right] \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

U é a subpressão com uma linha de dreno [kN];

γ_a é o peso específico da água [kN/m³];

B é a largura da seção [m];

H_{dm} é o nível de água na linha de drenagem [m];

a é a distância da face de montante até a face externa na linha de dreno [m];
 b é a distância da face de dreno até a face de jusante [m];
 H_m é o nível de água a montante [m] e;
 H_j é o nível de água a jusante [m].

A Eletrobrás (2003) ainda sugere que, para o caso em que a cota inferior da galeria de drenagem estiver acima do nível d'água de jusante, para efeitos de cálculos, a subpressão na linha de drenos não será considerada a altura hidrostática correspondente o nível d'água de jusante mais sim o a dimensão compreendida entre a cota da linha de interseção dos drenos com o plano de análise e a cota de boca dos drenos, indicado como H_g (conforme especificado na Figura 5). E a subpressão nesse caso será obtida a partir da aplicação da Equação 7 na Equação 6.

Como $H_j < H_g$, então:

$$h_{dm} = H_g + \frac{1}{3}(H_m - H_g) \quad \text{Equação 7}$$

onde:

H_{dm} é o nível de água na linha de drenagem [m];
 H_m é o nível de água a montante [m] e;
 H_g é a dimensão compreendida entre a cota da linha de interseção dos drenos com o plano de análise e a cota de boca dos drenos [m].

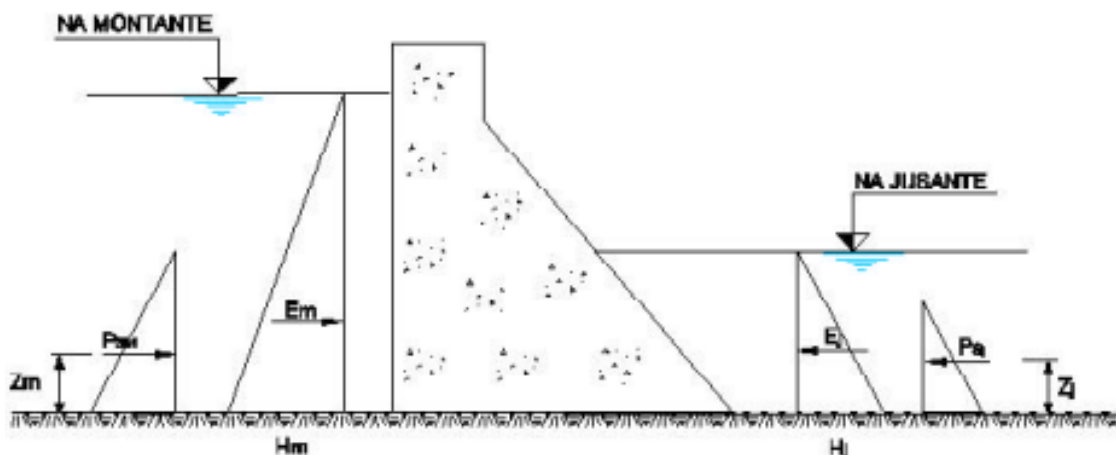
Além das situações de subpressão apresentadas, existem outros critérios para casos com mais linhas de drenos operantes ou outras considerações, contidos com mais detalhes nos Critérios De Projeto Civil de Usina Hidrelétrica da Eletrobrás (2003).

e) Empuxo de materiais assoreados:

Pode-se descrever empuxo de materiais assoreados como uma ação produzida pelo material sobre as estruturas de contenção. A Eletrobrás (2003) sugere que dependendo do caso, o empuxo de assoreamento esteja atuando em um décimo da altura da seção estrutural em estudo. As pressões de empuxo devido à presença de

material assoreado junto ao pé de montante da barragem podem ser analisadas na Figura 6, é obtida através da fórmula de Rankine, desprezando a coesão, apresentada na Equação 8.

Figura 6- Força de empuxo devido à presença de material assoreado



Fonte: Eletrobrás (2003)

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma_{sub} \times h_s^2 \times \left(\frac{1 - \text{sen}\varphi}{1 + \text{sen}\varphi} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

P_s é a força horizontal de assoreamento [kN];

γ_{sub} refere-se a subtração do peso específico do material assoreado com o peso específico da água [kN/m³];

h_s é a altura de cálculo [m] e;

φ é o ângulo de atrito interno[°].

2.4.2 Condições de carregamentos

Em conformidade com Kuperman e Cifu (2006), as condições de carregamento que devem ser consideradas nos estudos de elaboração de barragens precisam abranger as mais diversas possibilidades de combinações em que exista a probabilidade de ocorrência simultânea durante a vida útil da estrutura. De acordo com a Eletrobrás (2003), as condições de carregamento consideradas na estabilidade global e no cálculo de tensões são:

- ✓ Condições de Carregamento Normal (CCN);
- ✓ Condição de Carregamento Excepcional (CCE);
- ✓ Condições de Carregamento Limite (CCL);
- ✓ Condição de Carregamento de Construção (CCC).

As condições de carregamento normal (CCN) referem-se a as combinações de ações que apresentam grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil, durante a operação normal ou manutenção rotineira da obra, em condições hidrológicas normais (ELETROBRÁS, 2003). Pode ser consideradas as cargas do tipo:

- ✓ Peso próprio da estrutura e equipamentos;
- ✓ Carga acidental uniformemente distribuída, concentrada e cargas móveis;
- ✓ Carga relativa às atividades rotineiras de operação e manutenção da usina;
- ✓ Empuxos hidrostáticos com o nível de água do reservatório e do canal de fuga variando entre os níveis máximos e mínimos normal, sendo que a condição mais severa de carregamento deverá ser selecionada para cada estrutura;
- ✓ Subpressão com drenagem operante;
- ✓ Empuxo de terraplenos e de assoreamento;
- ✓ Pressão hidrodinâmica devido a esforços hidráulicos;
- ✓ Pressão intersticial;
- ✓ Esforços devido ao vento;
- ✓ Variação de temperatura e retração do concreto;
- ✓ Ancoragens ativas;
- ✓ Esforços sobre a estrutura no primeiro estágio, em casos onde o segundo estágio da estrutura deva ser completado posteriormente, com a usina em operação.

Na Condição de Carregamento Excepcional (CCE) são consideradas as situações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, como por exemplo, condições hidrológicas excepcionais, defeitos no sistema de drenagem, entre outros (ELETROBRÁS, 2003). A condição de carregamento

excepcional deverá adicionar à condição de carregamento normal, uma das seguintes cargas excepcionais:

- ✓ Empuxos hidrostáticos e subpressão associada ao nível de água do reservatório e do canal de fuga variando entre os níveis de água máximos máximumorum e mínimos mínimorum;
- ✓ Subpressão decorrente de drenagem inoperante ou de falhas no sistema de drenagem;
- ✓ Pressão hidrodinâmica devido à ação sísmica;
- ✓ Efeito de onda;
- ✓ Quaisquer esforços excepcionais sobre as estruturas de primeiro estágio.

As Condições de Carregamento Limite (CCL) possuem baixa probabilidade de ocorrência. Trata-se de uma situação de combinação onde são consideradas a ocorrência de mais de uma ação excepcional. A Condição de Carregamento Limite deverá adicionar à condição de carregamento normal, pelo menos duas das cargas excepcionais descrita anteriormente.

Condição de Carregamento de Construção (CCC) são as possíveis combinações de ações que apresentem probabilidade de ocorrência durante as fases de construção, considerando equipamentos de construção, cargas anormais temporárias consequentes de transporte, instalação e montagem de equipamentos permanentes, cimbramentos, e quaisquer outras condições semelhantes, que ocorrem durante períodos curtos. Esta condição de carregamento deverá ser analisada e complementada em função de cada caso específico, sendo as condições apresentadas pela Eletrobrás (2003) apenas de caráter genérico:

- ✓ Condições normais de carregamento em estruturas incompletas, conforme for apropriado a cada caso em particular, como exemplo, esforços sobre estruturas em 1º estágio, em casos onde o 2º estágio deva ser completado posteriormente, adufas vazias para o vertedouro, entre outros;
- ✓ Cargas de equipamentos de construção e montagem;
- ✓ Cargas devidas a ancoragens provisórias para guinchos, guindastes ou dispositivos de levantamentos de carga ou similares, cargas de compactação de aterros e reaterros;

- ✓ Cargas vivas excepcionais, devidas à movimentação e montagem de equipamentos;
- ✓ Cargas devidas a testes de equipamentos permanentes;
- ✓ Cargas hidrostáticas e subpressões anormais devidas a esvaziamentos temporários;
- ✓ Esforços devidos a injeções.

2.4.3 Análise de estabilidade global

A análise de estabilidade da estrutura é desenvolvida considerando a estrutura como um conjunto monolítico, dessa maneira podendo ser assimilada a um corpo rígido (COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS, 1999). Em conformidade com Eletrobrás (2003), a verificação da estabilidade global de barragens de concreto corresponde a avaliação da segurança global quanto a movimentos de corpo rígido, sendo eles: flutuação; tombamento e deslizamento em qualquer plano; e análise de tensões. Os coeficientes de segurança para efeitos de estudos referentes as análises de comportamento da barragem de concreto, segundo a Eletrobrás (2003), serão descritos a seguir.

O fator de segurança a flutuação (FSF) refere-se à relação entre o somatório das forças gravitacionais e o somatório das forças de subpressão, e, de acordo com a Eletrobrás (2003) pode ser obtida por meio da Equação 9.

$$FSF = \frac{\sum V}{\sum U} \quad \text{Equação 9}$$

No qual:

FSF é o fator de segurança a flutuação;

$\sum V$ são o somatório das forças gravitacionais e;

$\sum U$ são o somatório das forças de subpressão.

Ainda é recomendado que quaisquer contribuições favoráveis devidas à coesão e ao atrito entre blocos ou entre estrutura e fundação sejam desprezadas. As forças verticais deverão incluir as cargas permanentes mínimas das estruturas, o peso próprio de equipamentos permanentes, se instalados, e de lastros (água ou aterro) e

sistemas de ancoragem, se utilizados durante determinados estágios da construção. Todas as cargas acidentais deverão ser ignoradas nas verificações de estabilidade (ELETROBRÁS, 2003).

O Quadro 1 apresenta os coeficientes de Segurança mínimos admissíveis referente FSF pela Eletrobrás (2003), de acordo com as diferentes condições de carregamento.

Quadro 1- FSF mínimos admissíveis de acordo com a Eletrobrás (2003)

Fatores de redução	Casos de carregamentos			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSF>	1,3	1,1	1,1	1,2

Fonte: Eletrobrás (2003)

O fator de segurança ao tombamento (FST) considera em qualquer direção como a relação entre o momento estabilizante e o momento de tombamento em relação a um ponto (ELETROBRÁS, 2003), apresentado através da Equação 10.

$$FST = \frac{\sum M_e}{\sum M_t} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

FST representa o fator de segurança ao tombamento;

$\sum M_e$ refere-se ao somatório do momento estabilizante, considerados como tal, o peso próprio da estrutura, as cargas permanentes mínimas e o peso próprio dos equipamentos permanentes, se instalados e;

$\sum M_t$ é somatório dos momentos de tombamento, ocasionados pela atuação de cargas desestabilizantes, sendo como, pressão hidrostática, subpressão, empuxos de terra, entre outros.

A Eletrobrás (2003) recomenda que devem ser desprezados os efeitos estabilizantes de coesão e de atrito despertados nas superfícies em contato com a fundação. E para estrutura em que apresentam a base com dimensões iguais ou maiores do que a altura do barramento, é dispensada análise quanto a estabilidade ao tombamento (COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS, 1999).

O Quadro 2, apresenta os valores mínimos admissíveis de (FST) conforme descrito pela Eletrobrás (2003), para cada caso de carregamento.

Quadro 2- FST mínimos admissíveis de acordo com a Eletrobrás (2003)

Fatores de redução	Casos de carregamentos			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FST>	1,5	1,2	1,1	1,3

Fonte: Eletrobrás (2003)

De acordo com a Eletrobrás (2003), para verificação da estabilidade das estruturas ao deslizamento devem-se selecionar as superfícies de ruptura de modo a incluir todos os planos de menor resistência possível, ou os submetidos a tensões críticas na estrutura, na fundação e no contato estrutura-fundação, sobre as quais a estrutura possa sofrer movimento de deslizamento como corpo rígido.

Para determinação do fator de segurança ao deslizamento (FSD), é preciso verificar a situação, caso seja considerado fundação em material com coesão utiliza-se a Equação 11 e caso seja considerada uma fundação em material sem coesão aplica-se a Equação 12.

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \cdot tg(\Phi_i)}{FSD\Phi} + \frac{\sum c_i \cdot A_i}{FSD_c}}{\sum T_i} \geq 1 \quad \text{Equação 11}$$

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \cdot tg(\Phi_i)}{FSD\Phi}}{\sum T_i} \geq 1 \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

FSD é fator de segurança ao deslizamento;

$FSD\Phi$ é o fator de redução da resistência ao atrito;

FSD_c é o fator de redução de resistência a coesão;

$\sum N_i$ é o somatório das forças normais à superfície de deslizamento, em análise;

Φ_i é o ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento, em análise;

c_i é a coesão característica ao longo da superfície de deslizamento;

A_i é a área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise e;

$\sum T_i$ é o somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

No Quadro 3 são apresentados os fatores de redução da resistência mínima por atrito (FSD_{ϕ}) e a resistência à coesão (FSD_c), conforme as diferentes condições de carregamento.

Quadro 3- Fatores de Redução da Resistência do Atrito e da Coesão FSD_{ϕ} e FSD_c

Fatores de redução	Casos de carregamentos			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSD_c	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
FSD_{ϕ}	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)

Fonte: Eletrobrás (2003)

É indicado ainda, em situações em que os parâmetros de resistências dos materiais sejam precários ou não apresentem constância de comportamento, deve-se adotar os valores entre parênteses (Comissão Regional de Segurança de Barragens, 1999).

2.5 Análise de estabilidade probabilística

As incertezas estão sempre presentes nos parâmetros empregados em uma estrutura. Logo, se existem incertezas nas variáveis de dimensionamento, estas provavelmente propagar-se-ão para as respostas. Portanto, quando um sistema é analisado de maneira determinística não há como assegurar que ele sempre retorne da forma esperada, visto que neste método de análise não são consideradas as variabilidades envolvidas. Consequente a isso, haverá a possibilidade da não satisfação dos critérios de projeto. Devido a isto, um sistema poder ser analisado em termos probabilísticos, ao qual são empregados métodos de confiabilidade estrutural (BECK, 2019).

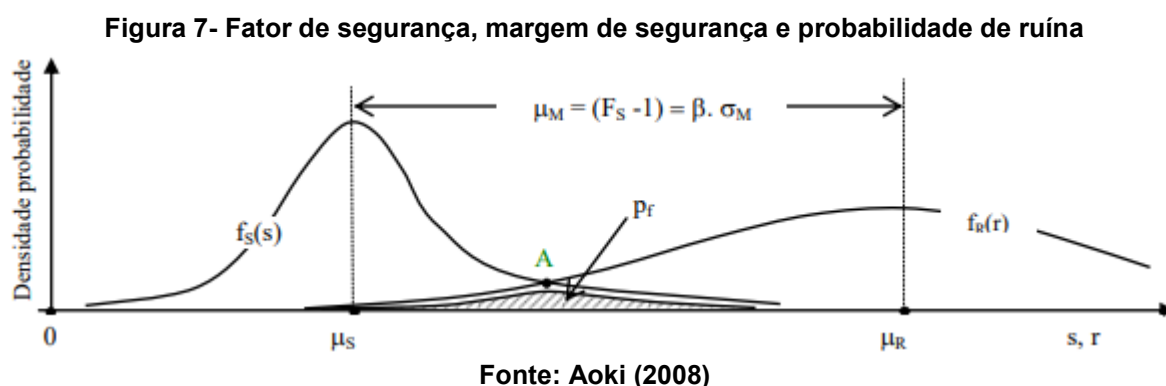
Assim, ao contrário do método determinístico, baseado em funções analíticas que, ao se inserir as mesmas variáveis de entrada, sempre retornará o mesmo resultado, uma função probabilística considera as variabilidades dos materiais e das ações, trabalhando com variáveis aleatórias como valores de entrada do problema, e por consequência, gerando um conjunto de resultados (GUTSTEIN, 2011).

Segundo Beck (2019), a confiabilidade de uma estrutura na engenharia é descrita como a probabilidade de que esta não venha a falhar dentro do que foi

projetada ao longo da vida útil da estrutura. Em conformidade, Krüger (2008), afirma que confiabilidade estrutural, de maneira geral, é a probabilidade de ocorrência do desempenho satisfatório da estrutura.

A confiabilidade de uma estrutura pode ser apresentada por meio de um índice de confiabilidade (BAECHER; CHRISTIAN, 2003). Na área de barragens o valor do índice de confiabilidade complementa o fator de segurança, apresentando uma estimativa do desempenho esperado da barragem (ALBERTS, 2020).

Conforme Alberts (2020), em análises de estabilidade em que se tenha resistência e carga comportando-se como uma função normalmente distribuída, a margem de segurança também será normalmente distribuída (ver Figura 7), assim conforme Aoki (2008) o índice de confiabilidade será obtido por meio da Equação 13.



$$\beta = \frac{F_{S_m} - 1}{\sigma_m} \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

β é o índice de confiabilidade;

F_{S_m} é o valor fator de segurança médio da distribuição e;

σ_m é o valor do desvio padrão da margem de segurança.

Gutstein (2011), afirma que, para a quantificação da segurança estrutural de estabilidade global em uma barragem de concreto, poderão ser adotados métodos probabilísticos, como por exemplo a simulação de Monte Carlo, assumindo a variabilidade dos parâmetros envolvidos.

A simulação de Monte Carlo conforme descrita por Sandoval (2012), consiste na geração de valores aleatórios para cada variável probabilística, e após inúmeras repetições, apresenta em uma amostra de resultados, os quais são semelhantes a uma amostra de observações experimentais. A partir de análises dessa amostra de resultados é possível obter a função de densidade de probabilidade do fator de segurança. O autor ressalta que para utilização do método é preciso conhecer a média, o desvio padrão, o tipo de distribuição, além dos limites inferiores e superiores de cada variável.

Usualmente esse método é aplicado em três situações descritos por Nowak e Collins (2000⁴), apud Krüger (2008):

1. Para resolver problemas com alto grau de complexidade o qual se optasse por uma solução analítica seria muito difícil ou impossível de se resolver;
2. Em casos complexos que podem ser resolvidos de maneira analítica por aproximação, porém utilizando o método, é possível obter um resultado mais próximo da realidade, devido a não aplicação de tantas simplificações.
3. Para verificar os resultados obtidos por meio de emprego de outras técnicas.

A base de procedimentos do método Monte Carlo é a geração de números aleatórios, e esses dependem de um valor pseudoaleatório uniforme $u(0,1)$, atualmente existem muitos aplicativos e programas disponíveis com esse viés, a exemplo, o Software Microsoft Excel que disponibiliza ferramentas para a geração de números aleatórios (MILNITZ, 2018).

⁴ NOWAK, Andrzej; COLLINS, Kevin. **Reliability of structures**. McGraw-Hill. 2000.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho, foi realizado um estudo na seção vertedoura da barragem de Derivação do Rio Jordão a fim de comparar os métodos de obtenção dos coeficientes de segurança, através de abordagens determinísticas e probabilísticas. A barragem escolhida foi selecionada por ser do tipo concreto a gravidade e por estar localizada no estado do Paraná. Outra questão relevante é pela disponibilidade de dados e informações à disposição em trabalhos publicados, promovendo os subsídios necessários à realização das análises.

Serão apresentadas as informações pertinentes da barragem, a fim de que sejam efetuadas todas as simulações propostas. Uma vez que o acesso a alguns dados não foram possíveis, como por exemplo, referentes a informações geotécnicas, nível de água e entre outros, serão utilizados os dados presentes na literatura, arbitrados ou adotados de outras barragens que contenham características semelhantes.

Os métodos de avaliação de análise de estabilidade aqui empregados foram a abordagem determinística através das recomendações da Eletrobrás (2003) e por meio de abordagem probabilística utilizando o método de Simulação de Monte Carlo.

Os cálculos efetuados foram realizados através de modelagem computacional, por meio das equações apresentadas na revisão bibliográfica através do uso de planilha eletrônica. Concomitantemente, foram adicionadas as variáveis aleatórias dos parâmetros envolvidos para obtenção dos resultados de maneira probabilística.

Assim a metodologia foi dividida em tópicos:

- ✓ Informações da barragem em estudo;
 - Propriedades geométrica;
 - Propriedades dos materiais;
 - Níveis de água do reservatório.
- ✓ Modelagem computacional:
 - Abordagem por meio determinístico;
 - Abordagem por meio probabilístico: Simulação de Monte Carlo.

3.1 Informações da barragem em estudo: Barragem de Derivação do Rio Jordão

Os parâmetros de projeto são indispensáveis para verificações da análise global de estruturas hidráulicas, as especificações necessárias estão listadas a seguir.

3.1.1 Propriedades geométricas

A seção da barragem escolhida é a seção vertente da barragem da Usina Hidrelétrica de Derivação do Rio Jordão, conforme mostra a Figura 8, localizada no estado do Paraná, mais precisamente no município de Reserva de Iguaçu (COPEL, 2021b). Está em operação desde 1997 e foi construída utilizando o emprego de CCR, possuindo 550 metros de comprimento e altura de 67 metros em relação ao leito do rio. A seção vertedoura incorporada à barragem é do tipo soleira livre, possuindo 300 metros de comprimento (SANTI, 2008). O principal objetivo da construção da barragem conforme Levis (2006) é derivar a água do Rio Jordão para o reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Ney Braga – Segredo, por meio de um túnel de adução de 4705 metros de extensão, fornecendo um acréscimo de 62,40 MW de capacidade. Além disso, a Usina de derivação do Rio Jordão possui capacidade instalada de 6,54 MW (COPEL, 2021b).

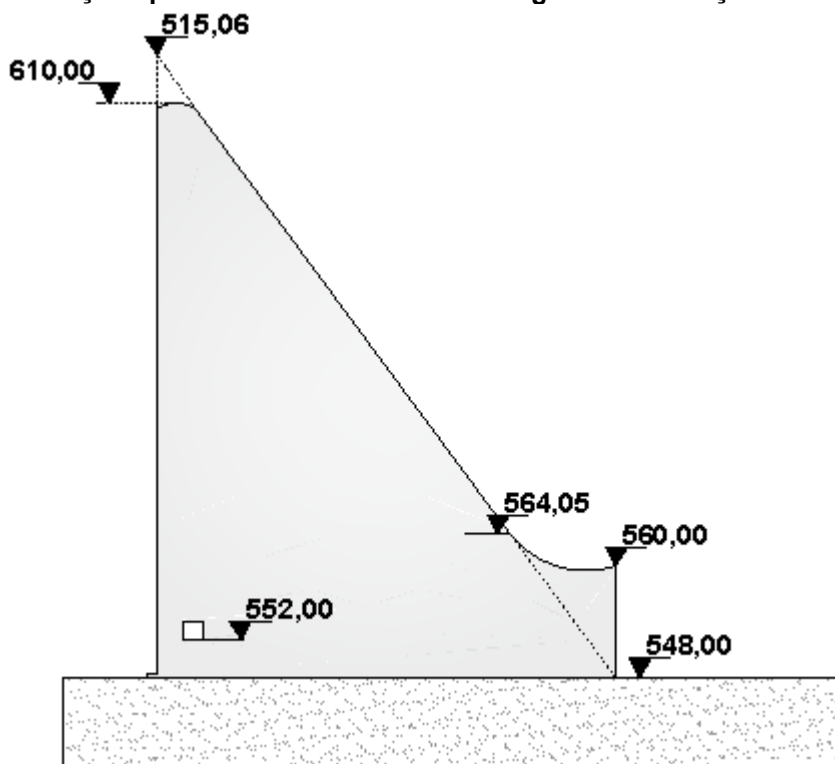
Figura 8- Barragem de Derivação do Rio Jordão



Fonte: Adaptado de COPEL (2021b)

A seção típica da parte vertente é apresentada na Figura 9, contendo as informações de geometria necessárias para calcular as ações atuantes na seção do barramento. As cotas de referência apresentadas nessa figura são em relação ao nível do mar.

Figura 9- Seção típica da soleira vertente- Barragem de Derivação do Rio Jordão



Fonte: Adaptado de Levis (2006)

3.1.2 Propriedade dos materiais

Na fase de construção da barragem de Derivação do Rio Jordão, foram utilizados ensaios de compactação, onde para cada camada de CCR foi realizado o ensaio para estimativa da densidade do concreto utilizando o densímetro nuclear, o que permitiu obter o peso específico médio do concreto de $24,99 \text{ kN/m}^3$ (ANDRIOLO; MUSSI; OLIVEIRA, 1998).

Quanto a escolha dos parâmetros geotécnicos levou-se em consideração regiões que possuíssem o mesmo embasamento geológico. Assim buscou-se por barragens situadas no terceiro planalto do estado do Paraná. Conforme Levis (2006), a barragem em estudo está assentada sobre derrame de rochas basálticas,

característica encontrada sobre essa região do estado. Em vista disso, os parâmetros geotécnicos adotados foram os mesmos correspondente da Barragem de Salto Caxias, a qual possui características semelhantes. Desse modo o ângulo de atrito adotado para a simulação é 45° e a coesão interface concreto-rocha será de 290 kN/m^2 (KRÜGUER, 2008).

O peso específico do sedimento conforme o Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios (CARVALHO, et al., 2000) poderá ser calculado segundo o tipo de operação desse reservatório, do grau de compactação dos sedimentos e da granulometria. O peso específico do sedimento arbitrado para realização das simulações será o valor de 18 kN/m^3 .

3.1.3 Níveis de água no reservatório

Os níveis da água (N.A.) conforme Cifu (2011) são definidos como:

- ✓ Nível normal: cuja ocorrência possui uma variação da média muito baixa;
- ✓ Nível normal máximo e nível normal mínimo: são aqueles níveis normais cuja variação é alta em torno da média;
- ✓ Nível máximo maximorum e nível mínimo minimorum: são aqueles níveis que tem duração pequena e probabilidade muito baixa de ocorrência.

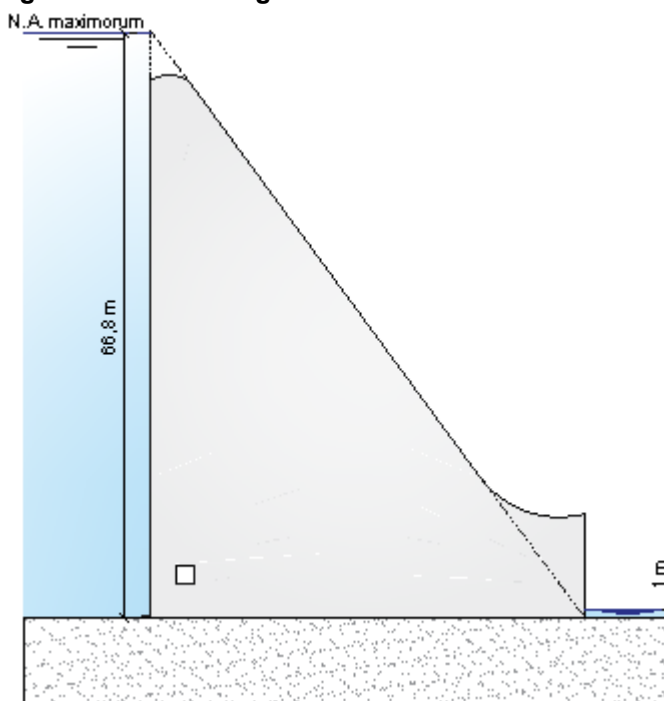
Com base nessas definições, os níveis de água para efeito de cálculo neste trabalho para determinações das ações hidrostáticas, foram arbitrados com base na altura do vertedor. Convém ressaltar que esses valores não correspondem aos níveis de água reais do reservatório da barragem da Derivação do Rio Jordão, e foram adotados apenas para fins de cálculo nesta pesquisa. Assim conforme pode ser observado no Quadro 4, optou-se por variar os níveis de água a montante e considerar em todos casos a jusante o nível de água com altura unitária.

Quadro 4- Níveis de água arbitrados para efeito de simulação no reservatório

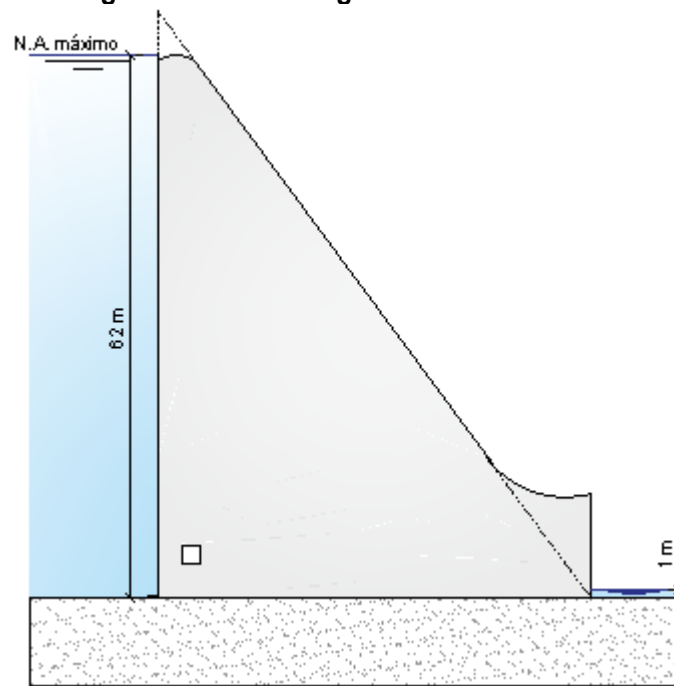
Nível de água no reservatório	N.A. a montante (m)	N.A. a jusante (m)
N.A. máximo maximorum	66,80	1,00
N.A. máximo	62,00	1,00
N.A. normal	58,00	1,00
N.A. mínimo	56,00	1,00

Fonte: Autoria própria (2021)

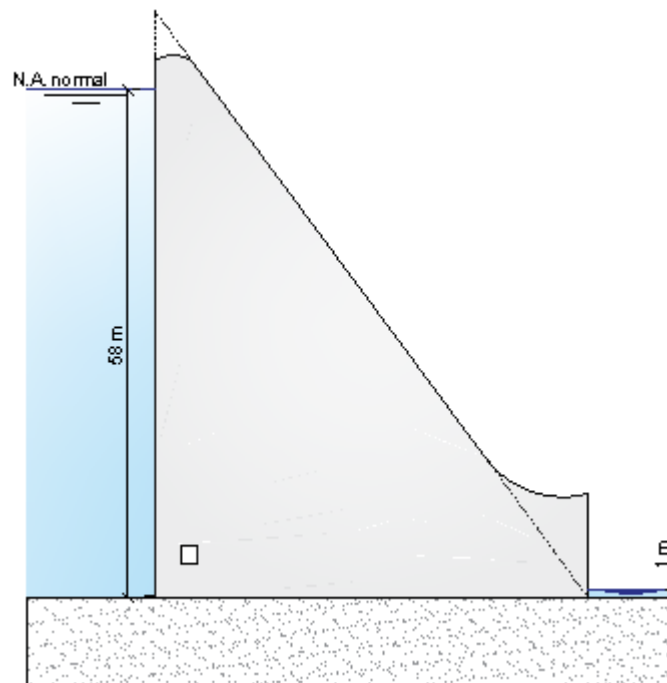
Nas figuras a seguir são apresentadas a seção vertedoura da barragem com os respectivos níveis de água arbitrados para cada caso considerado, sendo a Figura 10 o N.A. máximo maximorum; a Figura 11 o N.A. máximo; a Figura 12 o N.A. normal e a Figura 13 o N.A. mínimo.

Figura 10- Nível de água máximo maximorum arbitrado

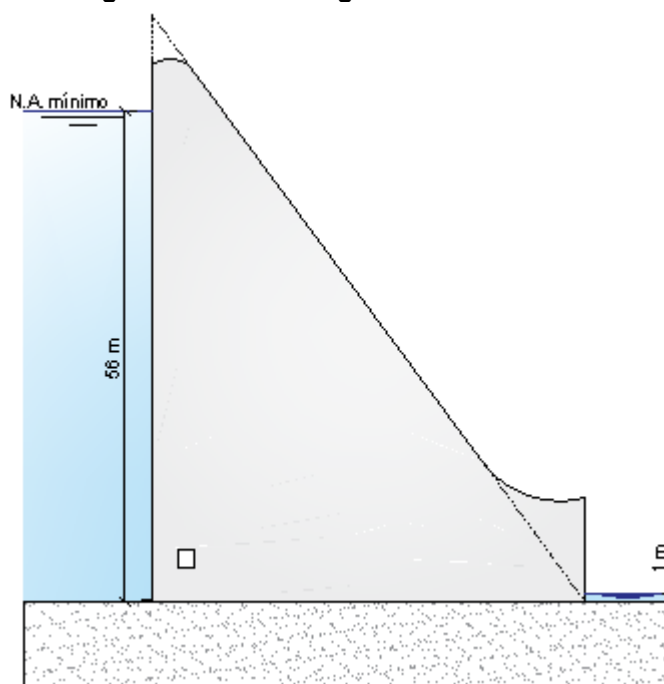
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 11- Nível de água máximo arbitrado

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 12- Nível de água normal arbitrado

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 13- Nível de água mínimo arbitrado

Fonte: Autoria própria (2021)

3.2 Modelagem computacional

A partir das informações da barragem em estudo, foram definidos os problemas estruturais de uma seção típica, sendo empregado o dimensionamento e verificação da estabilidade de acordo com os critérios descritos pela Eletrobrás. Esses cálculos serão feitos com auxílio de planilhas eletrônicas por meio do Software Microsoft Excel.

A seguir serão descritos a metodologia das duas abordagens adotadas nesse estudo.

3.2.1 Abordagem por meio determinístico

A barragem será analisada estaticamente e as condições de carregamento adotadas para o presente estudo foram analisadas em conformidade com os critérios fornecido pela Eletrobrás, descritas na seção 2.4.2, e optou-se por analisar cinco condições de carregamento e as ações atuantes consideradas em cada situação:

- I. Condição de carregamento Normal (CCN)
 - a. Peso próprio;
 - b. Pressões hidrostáticas considerando os níveis de água a montante e a jusante **normal**, analisando: empuxo hidrostático a montante e empuxo hidrostático a jusante;
 - c. Pressão de material assoreado a montante;
 - d. Subpressão com drenos operantes.

- II. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 1
 - a. Peso próprio;
 - b. Pressões hidrostáticas considerando os níveis de água a montante e a jusante **normal**, analisando: empuxo hidrostático a montante e empuxo hidrostático a jusante;
 - c. Pressão de material assoreado a montante;
 - d. Subpressão com drenos inoperantes.

- III. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 2
 - a. Peso próprio;
 - b. Pressões hidrostáticas considerando os níveis de água a montante e a jusante **máximo**, analisando: empuxo hidrostático a montante e empuxo hidrostático a jusante;
 - c. Pressão de material assoreado a montante;
 - d. Subpressão com drenos operantes.

- IV. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 3
 - a. Peso próprio;
 - b. Pressões hidrostáticas considerando os níveis de água a montante e a jusante **mínimo**, analisando: empuxo hidrostático a montante e empuxo hidrostático a jusante;
 - c. Pressão de material assoreado a montante;
 - d. Subpressão com drenos operantes.

- V. Condição de carregamento Excepcional (CCE)- 4
 - a. Peso próprio;

- b. Pressões hidrostáticas considerando os níveis de água a montante e a jusante **máximos máximum**, analisando: empuxo hidrostático a montante e empuxo hidrostático a jusante;
- c. Pressão de material assoreado a montante;
- d. Subpressão com drenos operantes.

Relacionado a análise da estabilidade da barragem optou-se por analisar os fatores de segurança quanto a flutuação, ao tombamento e ao deslizamento, verificando-se o mínimo recomendado pela Eletrobrás, e comparando-os com os resultados obtidos através do método probabilístico.

3.2.2 Abordagem por meio probabilístico: Simulação de Monte Carlo

Para determinação em termos probabilísticos do método Monte Carlo será empregado rotina de cálculo em planilhas eletrônicas. Os passos dessa rotina segundo Nasser (2012) consistem em:

- ✓ Representar por meio da definição de uma função de densidade de distribuição de probabilidade o comportamento de cada variável considerada.
- ✓ Gerar variáveis aleatórias dentro do intervalo pré-determinado;
- ✓ A partir dos cálculos determinísticos substituir as variáveis consideradas, repetir os passos até encontrar uma amostra satisfatória;
- ✓ Agregar e manipular os resultados de forma a obter uma função de densidade de distribuição de probabilidade para o problema.

As variáveis aleatórias serão geradas a partir da ferramenta de geração de números aleatório no Excel. Para todas as análises foram adotados como referência 50 mil simulações de Monte Carlo.

Para a definição do problema estrutural em termos da análise probabilística, foi considerado como determinístico todos os parâmetros geométricos e as variáveis estocásticas do problema consideradas nas simulações são:

- ✓ Peso específico do concreto CCR;
- ✓ Ângulo de atrito no contato concreto-rocha;
- ✓ Peso específico do sedimento;

✓ Ângulo de atrito interno do sedimento;

a) Peso específico do concreto CCR:

Para o concreto em CCR foram adotados o peso específico e o desvio padrão encontrado na fase de construção da barragem a partir do controle de compactação realizado no local, com base nas 346 amostras analisadas em campo (ANDRIOLO; MUSSI; OLIVEIRA,1998), e os dados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Peso específico da Barragem de Derivação do Rio Jordão

Barragem	Peso específico do concreto médio	Coefficiente de variação	Desvio padrão	Nº de ensaio
Derivação do Rio Jordão	24,99 KN/m ³	2,59 %	0,65 KN/m ³	346

Fonte: Adaptado de Andriolo, Mussi E Oliveira (1998)

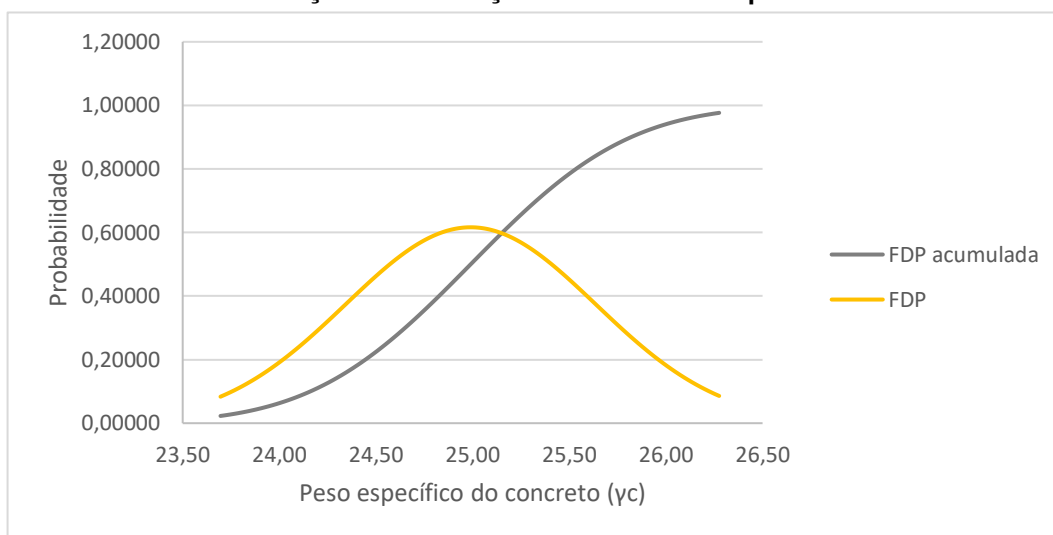
O peso específico do concreto segue uma distribuição normal. Os valores de limite superior e inferior para variável de entrada foram assumidos como ± 2 desvio padrão, os limites podem ser determinados através da verificação da função de distribuição de probabilidade. A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados para descrever a variabilidade do peso específico.

Tabela 2 - Parâmetros da variável- Peso específico do concreto

Variável	Valor médio	Desvio padrão	Limite superior	Limite inferior	Função de probabilidade
Peso específico do concreto	24,99 KN/m ³	0,65 KN/m ³	26,28 KN/m ³	23,70 KN/m ³	Distribuição normal

Fonte: Autoria própria (2021)

O Gráfico 1, apresenta a distribuição de probabilidade adotada para o peso específico.

Gráfico 1 – Função de destruição normal- Peso específico do concreto

Fonte: Autoria própria (2021)

b) Ângulo de atrito no contato concreto-rocha:

Com base no trabalho publicado por Krüger (2008) na barragem de Salto Caxias, foram adotadas as mesmas referências. Dessa forma o ângulo de atrito concreto-rocha médio é de 45° e o desvio padrão adotado para essa simulação é de 2° . Os limites de entrada da variável foram assumidos como $\pm 2,5$ desvio padrão. A distribuição de probabilidade escolhida para o ângulo de atrito concreto rocha foi a distribuição normal.

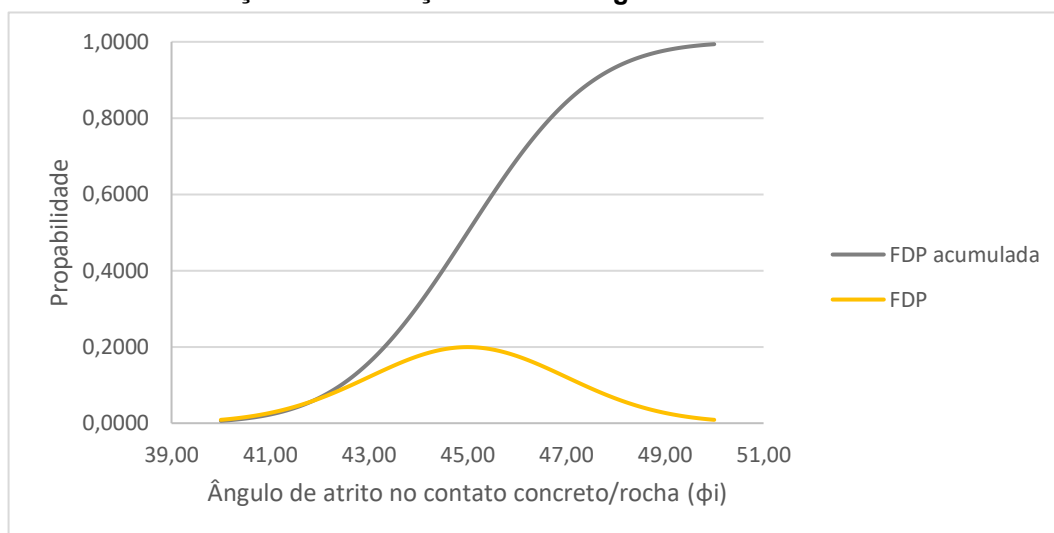
A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados para descrever a variabilidade do ângulo de atrito no contato concreto-rocha.

Tabela 3 - Parâmetros da variável- Ângulo de atrito no contato concreto-rocha

Variável	Valor médio	Desvio padrão	Limite superior	Limite inferior	Função de probabilidade
Ângulo de atrito concreto-rocha	45°	2°	50°	40°	Distribuição normal

Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 2, apresenta a distribuição de probabilidade adotada para o ângulo de atrito concreto-rocha.

Gráfico 2 – Função de destruição normal- Ângulo de atrito contato concreto-rocha

Fonte: Autoria própria (2021)

c) Peso específico do sedimento:

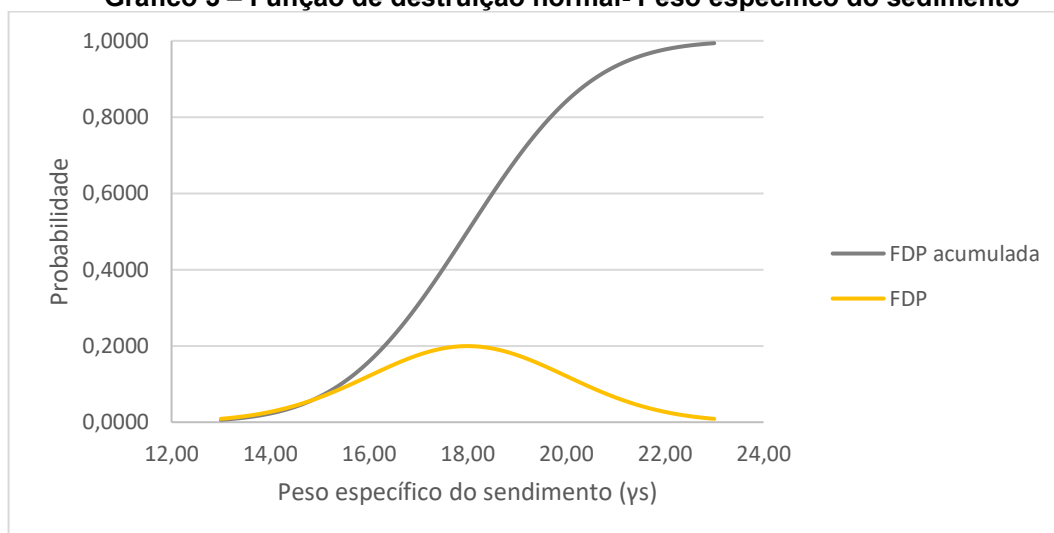
Neste trabalho foi adotado o peso específico médio do sedimento de 18 KN/m³, com um desvio padrão de 2 KN/m³, os valores foram assumidos visto que não foi possível ter acesso às informações reais, assim os valores foram considerados para efeitos de cálculo. Foram assumidos como valores de entrada para os limites inferior e superior $\pm 2,5$ desvio padrão. A Tabela 4 apresenta os parâmetros adotados para descrever a variabilidade do peso específico do sedimento.

Tabela 4 - Parâmetros da variável- Peso específico do sedimento

Variável	Valor médio	Desvio padrão	Limite superior	Limite inferior	Função de probabilidade
Peso específico do sedimento	18,00 KN/m ³	2 KN/m ³	23 KN/m ³	13 KN/m ³	Distribuição normal

Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 3 ilustra-se a distribuição de probabilidade normal adotada para o peso específico do sedimento.

Gráfico 3 – Função de destruição normal- Peso específico do sedimento

Fonte: Autoria própria (2021)

d) Ângulo de atrito interno do sedimento:

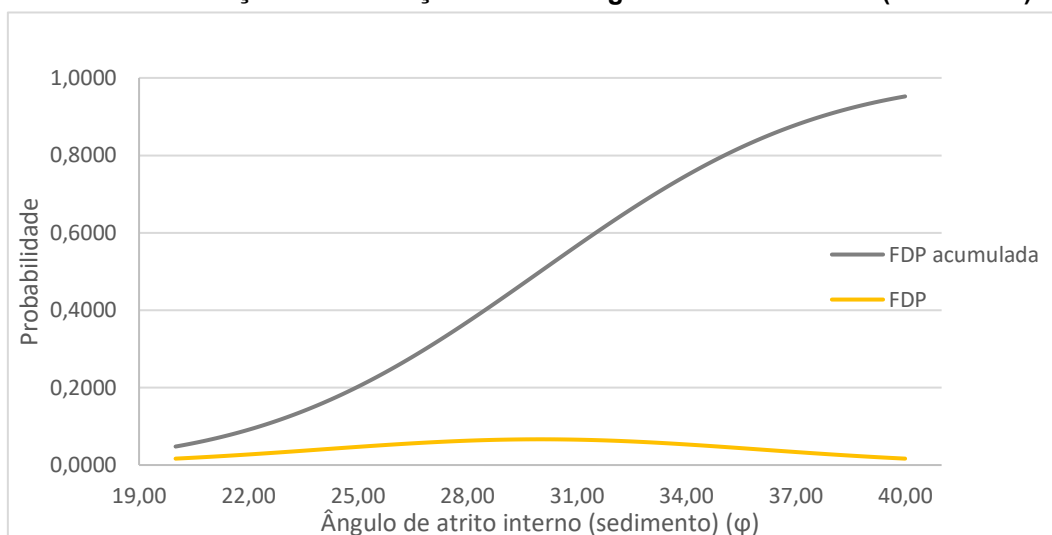
Para o ângulo de atrito médio interno do sedimento, foi optado por utilizar uma distribuição normal com média de 30° e desvio padrão de 6° , e assumido como valores limites aproximadamente de $\pm 1,7$ desvio padrão, tais valores não correspondem aos valores reais da barragem e foram assumidos apenas como valores utilizados para cálculo. A Tabela 5 apresenta os parâmetros adotados para descrever a variabilidade do ângulo de atrito médio interno do sedimento.

Tabela 5 - Parâmetros da variável- ângulo de atrito médio interno do sedimento

Variável	Valor médio	Desvio padrão	Limite superior	Limite inferior	Função de probabilidade
Ângulo de atrito interno (sedimento)	30°	6°	40°	20°	Distribuição normal

Fonte: Autoria própria (2021)

Conforme pode ser observado no Gráfico 4, ilustra-se a distribuição de probabilidade normal adotada para o ângulo de atrito médio interno do sedimento.

Gráfico 4 – Função de destruição normal- ângulo de atrito interno (sedimento)

Fonte: Autoria própria (2021)

Na Tabela 6 é apresentada resumidamente as variáveis adotadas, mostrando a escolha da distribuição de probabilidade, o valor médio, o desvio padrão, e o limite inferior e superior de cada parâmetro, conforme mencionado na seção.

Tabela 6 - Parâmetros das variáveis adotadas no estudo

Variável	Valor médio	Desvio padrão	Limite superior	Limite inferior	Função de probabilidade
Peso específico do concreto	24,99 KN/m ³	0,65 KN/m ³	26,28 KN/m ³	23,70 KN/m ³	Distribuição normal
Ângulo de atrito concreto-rocha	45 °	2 °	50 °	40 °	Distribuição normal
Peso específico do sedimento	18,00 KN/m ³	2 KN/m ³	23 KN/m ³	13 KN/m ³	Distribuição normal
Ângulo de atrito interno (sedimento)	30 °	6 °	40 °	20 °	Distribuição normal

Fonte: Autoria própria (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

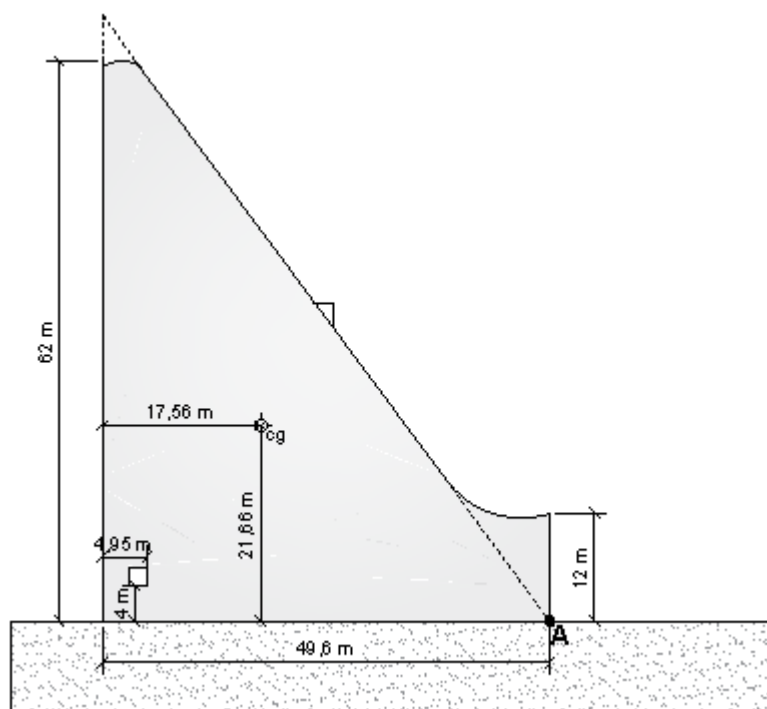
O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir sobre os resultados alcançados a partir da metodologia exposta na seção anterior. O capítulo foi subdividido em função dos objetivos definidos no estudo, seguindo a linha apresentada nos objetivos específicos.

Diante disso, os resultados das análises estão divididos em três partes. A primeira parte aborda os resultados encontrados na avaliação determinística, apresentando os fatores de segurança encontrados para cada caso de combinação considerada, comparando os fatores com os mínimos recomendados pela Eletrobrás. Na segunda parte, são abordadas as análises a partir da aplicação do método de Simulação de Monte Carlo, apresentando o fator de segurança probabilístico, o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha da estrutura analisada. A terceira parte, é apresentada uma tabela resumo com os fatores de segurança encontrados nas duas abordagens.

4.1 Resultados a partir da abordagem determinística

Com base nas condições de carregamento adotadas serão expostas a verificação da estabilidade ao deslizamento, a flutuação e ao tombamento, no contato da barragem com a fundação.

Na Figura 14 é apresentado o perfil básico da seção estudada, a qual pode-se observar as dimensões geométricas, e o ponto A na base na fundação que serviu como referência para cálculos dos momentos necessários para verificação da estabilidade proposta. É importante ressaltar que para efeito de cálculos foi considerada a largura da seção unitária.

Figura 14- Perfil básico considerado para cálculo

Fonte: Adaptado de Levis (2006)

A partir das informações apresentadas ao longo do estudo, foram realizados os cálculos das ações e dos momentos com relação ao ponto A, com base em cada condição proposta e serão apresentadas resumidamente na Tabela 7 a seguir.

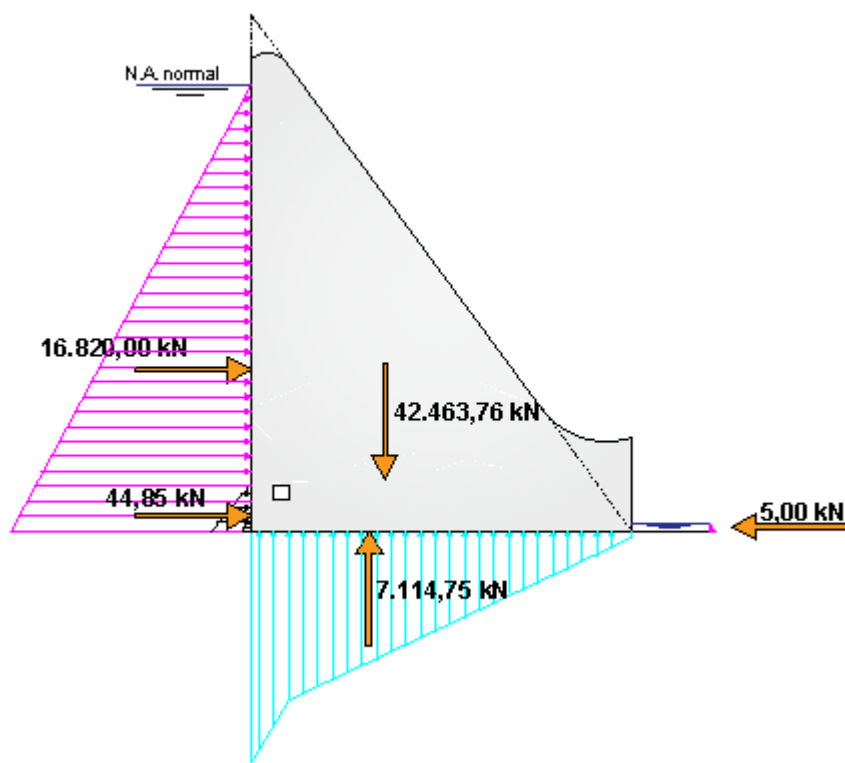
Tabela 7- Resumo das ações consideradas para verificação da barragem

Condição analisada	Nível de água	Peso próprio		Empuxo jusante		Empuxo montante		Pressão de material assoreado - montante		Tipo	Subpressão	
		Força [kN]	M A [kN.m]	Força [kN]	M A [kN.m]	Força [kN]	M A [kN.m]	Força [kN]	M A [kN.m]		Força [kN]	M A [kN.m]
CCN	normal	42463,76	1364785,17	5,00	1,66667	16820,00	325186,67	44,85	86,72	com drenos operantes	7114,75	243564,26
(CCE)-1	normal	42463,76	1364785,17	5,00	1,66667	16820,00	325186,67	44,85	86,72	com drenos inoperantes	14632,00	479731,20
(CCE)-2	máximo	42463,76	1364785,17	5,00	1,66667	19220,00	397213,33	51,25	105,92	com drenos operantes	7544,42	258699,76
(CCE)-3	mínimo	42463,76	1364785,17	5,00	1,66667	15680,00	292693,33	41,81	78,05	com drenos operantes	6899,92	235996,52
(CCE)-4	máximos máximum	42463,76	1364785,17	5,00	1,66667	22196,00	551485,35	59,50	132,48	com drenos operantes	8060,02	276862,35

Fonte: Autoria própria (2021)

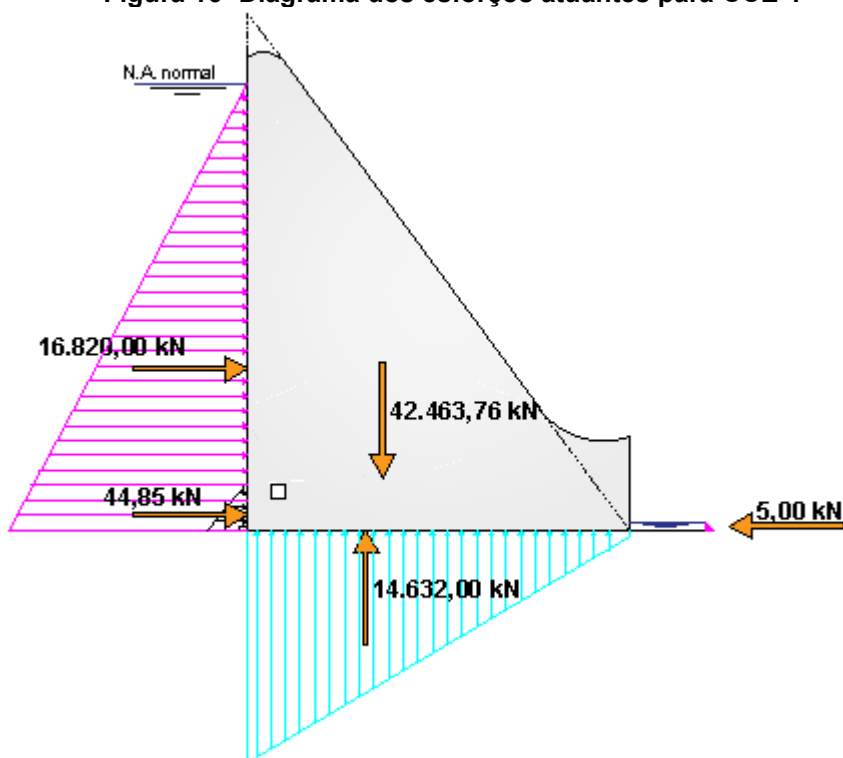
Para cada condição de carregamento será apresentado o diagrama de esforços atuantes com base nos parâmetros e condições calculados e apresentadas na Tabela 7, assim a Figura 15 é referentes as ações atuantes sob condições CCN, a Figura 16 para condições CCE-1, a Figura 17 para condições de CCE-2, a Figura 18 para condições CCE-3, e a Figura 19 para condições de CCE-4.

Figura 15- Diagrama dos esforços atuantes para CCN



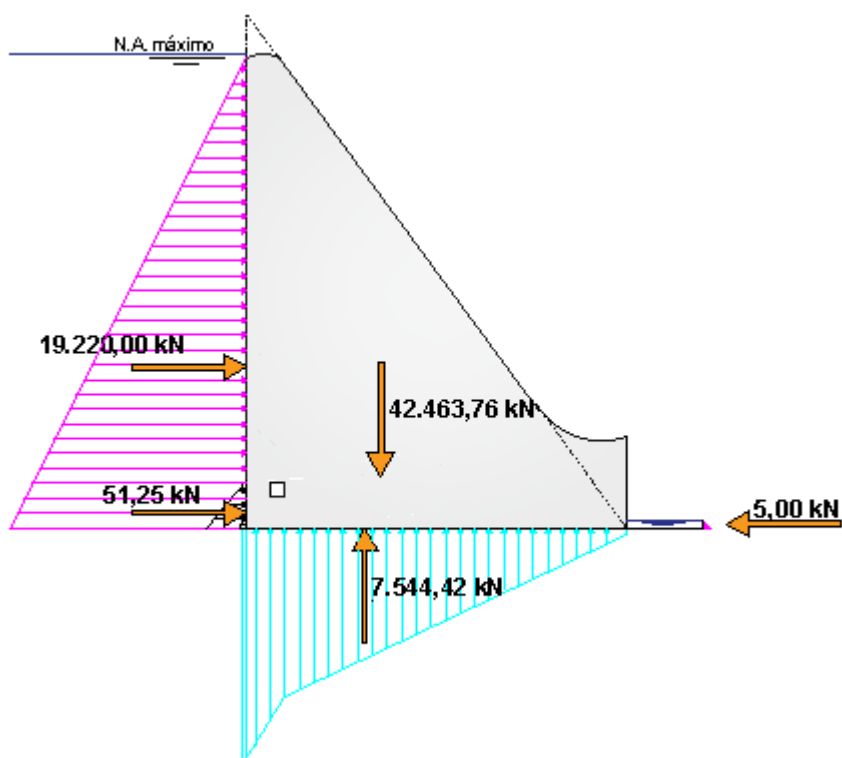
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-1



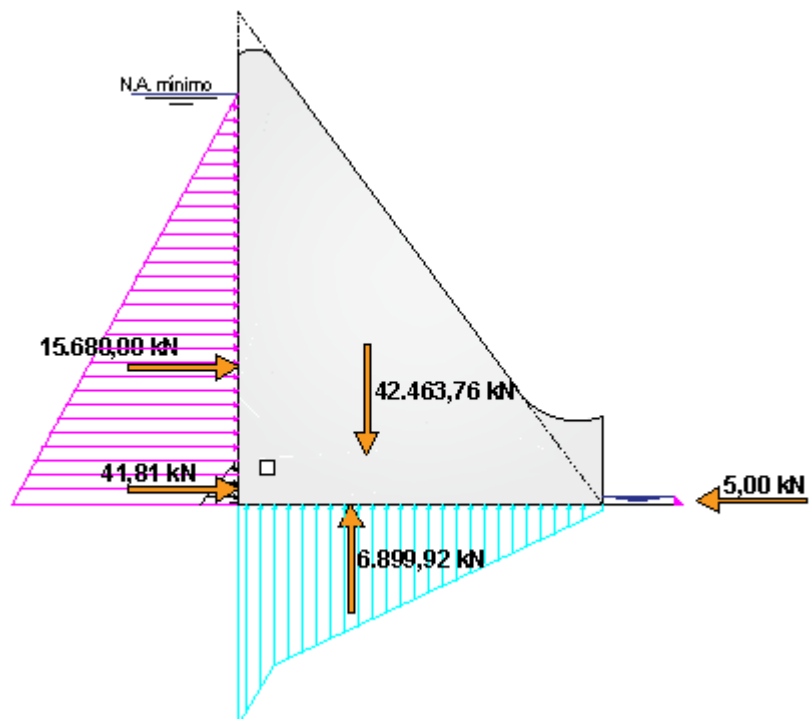
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 17- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-2



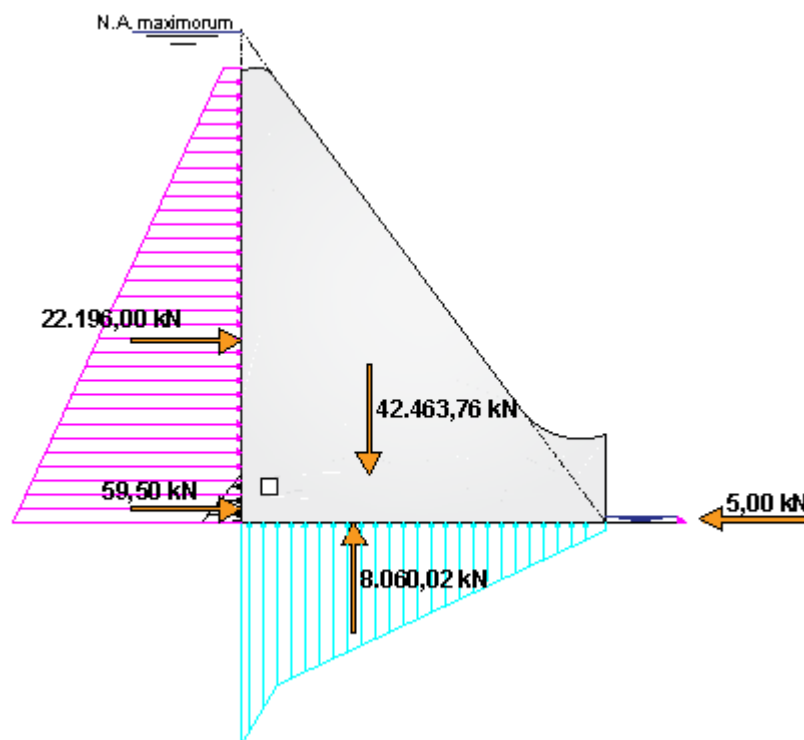
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 18- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-3



Fonte: Aatoria própria (2021)

Figura 19- Diagrama dos esforços atuantes para CCE-4



Fonte: Aatoria própria (2021)

Tendo os resultados das ações atuantes e dos momentos, a verificação da estabilidade da barragem estudada é apresentada em relação as três condições propostas na metodologia, sendo a flutuação, ao tombamento e ao deslizamento.

a) Em relação a flutuação

De acordo com os critérios estabelecidos pela Eletrobrás (2003), são recomendados valores mínimos de fator de segurança a flutuação para cada condição de carregamento considerado, dessa maneira a verificação a flutuação será atendida se o fator calculado superar o valor mínimo estabelecido.

Na Tabela 8, é apresentada os fatores de segurança em relação a flutuação para cada caso de carregamento.

Tabela 8- Verificação da estabilidade à flutuação através de análise determinística– Critério Eletrobrás (2003)

Condição analisada	FSF calculado	FSF min Eletrobrás (2003)	Verificação
CCN	5,968	1,30	Atende
(CCE)-1	2,902	1,10	Atende
(CCE)-2	5,629	1,10	Atende
(CCE)-3	6,154	1,10	Atende
(CCE)-4	5,268	1,10	Atende

Fonte: Autoria própria (2021)

É possível constatar que os valores obtidos atestam a verificação de estabilidade a flutuação a partir das condições analisadas estaticamente com os parâmetros adotados, fornecendo valores acima dos estabelecidos pela Eletrobrás (2003).

Outra questão que pode ser pontuada, é a influência da subpressão na determinação do FSF, considerando ou não a funcionalidade de drenos operantes. Nesse contexto, pode-se observar na Tabela 7, que na CCN foram considerados os drenos operantes, enquanto que na CCE-1 os efeitos de drenos na determinação da subpressão foram desprezados. Em ambos os casos foi adotado o nível de água normal (parâmetro que poderia interferir no resultado). Constatou-se, como pode ser notado na Tabela 8, que o FSF sofreu um aumento significativo quando utilizados os drenos operantes na seção da barragem, evidenciando a importância de manter a sua

funcionalidade para a redução da subpressão, oferecendo um fator de segurança maior a estrutura.

b) Em relação ao tombamento

A verificação da estabilidade em relação ao tombamento será atestada em condições em que os valores dos FST forem superiores aos mínimos recomendados pela Eletrobrás (2003) para cada situação de combinação de carregamento.

Para verificação conforme recomendado pela Eletrobrás (2003) os efeitos estabilizantes de coesão e atrito ao longo das superfícies da fundação serão desconsiderados.

Na Tabela 9, é apresentado os FST obtidos para constatar a verificação da estabilidade quanto ao tombamento da estrutura, para cada caso de carregamento proposto na metodologia.

Tabela 9- Verificação da estabilidade ao tombamento através de análise determinística– Critério Eletrobrás (2003)

Condição analisada	FST calculado	FST min	Verificação
		Eletrobrás (2003)	
CCN	2,399	1,5	Atende
(CCE)-1	1,695	1,2	Atende
(CCE)-2	2,080	1,2	Atende
(CCE)-3	2,581	1,2	Atende
(CCE)-4	1,647	1,2	Atende

Fonte: Aatoria própria (2021)

Referente a verificação da estabilidade quanto ao tombamento, os FST obtidos se mostraram superiores aos índices fornecidos pela Eletrobrás (2003), atestando sua estabilidade com base aos parâmetros adotados e quando analisada de forma estática.

c) Em relação ao deslizamento

Os critérios de verificação de estabilidade quanto ao deslizamento serão atendidos se os valores obtidos dos FSD apresentarem resultados maiores que 1,

conforme recomendado pela Eletrobrás (2003), uma vez que considera índices de redução da resistência ao atrito e a coesão. No Quadro 3 são apresentados os valores mínimos para adoção da redução de resistência em diferentes condições de carregamento.

Para cálculo do FSD foi utilizado o emprego da Equação 11. NA Tabela 10, são apresentados os FSD encontrados por meio dos critérios da Eletrobrás (2003) através do uso de índices de redução da resistência ao cisalhamento ao logo da superfície.

Tabela 10- Verificação da estabilidade ao deslizamento através de análise determinística– Critério Eletrobrás (2003)

Condição analisada	FSD calculado	FSD min	Verificação
		Eletrobrás (2003)	
CCN	1,682	1,0	Atende
(CCE)-1	1,385	1,0	Atende
(CCE)-2	1,457	1,0	Atende
(CCE)-3	1,814	1,0	Atende
(CCE)-4	1,246	1,0	Atende

Fonte: Autoria própria (2021)

Com base nos FSD calculados pode-se constatar que a estabilidade referente ao deslizamento se apresentou satisfatórios, a partir dos parâmetros e considerações adotadas, no que se refere a recomendado para barragem de concreto à gravidade pelo Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2003).

4.2 Resultados a partir da abordagem probabilística- Monte Carlo

Para esta seção serão apresentados os resultados das simulações de Monte Carlo, apontando a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade para cada caso analisado.

O número de simulações de Monte Carlo adotado foi de 50.000, porém como pode ser observado no Gráfico 5, os fatores de segurança ao deslizamento na condição de carregamento CCE-4 analisados de forma probabilística por meio da probabilidade de falha convergiram linearmente a partir do ponto de 10.000 simulações, o que demonstra que a quantidade de simulações adotadas é satisfatória para as análises consideradas.

Gráfico 5 –Convergência dos métodos de Monte Carlo para o FSDprob-CCE-4 por meio da Probabilidade de falha



Fonte: Autoria própria (2021)

A partir das definições das variáveis aleatórias mostradas na metodologia, foram substituídas nas equações determinísticas, gerando uma amostra satisfatória

para cada verificação de estabilidade analisada e será apresentada a seguir. O índice de confiabilidade foi obtido por meio da Equação 13.

a) Em relação a Flutuação

Para determinação dos fatores de segurança a flutuação probabilístico, foi considerado como variável aleatória apenas o peso específico do concreto.

A seguir será apresentada a Tabela 11, indicando os FSF médios, os FSF mínimos, FSF máximos, o desvio padrão, o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruptura encontrada em cada condição de carregamento analisada.

Tabela 11- Verificação da estabilidade a flutuação através de análise probabilística– Critério Eletrobrás (2003)

Condição analisada	FSF _{prob} médio	FSF _{prob} mín	FSF _{prob} máx	Desvio padrão	Índice de conf.	Prob. De Ruptura	FSF min Eletrobrás (2003)
CCN	5,982	5,71	6,28	0,14	36,75	0,00000	1,30
(CCE)-1	2,909	2,78	3,05	0,07	28,96	0,00000	1,10
(CCE)-2	5,641	5,38	5,92	0,13	36,31	0,00000	1,10
(CCE)-3	6,168	5,89	6,47	0,14	36,97	0,00000	1,10
(CCE)-4	5,281	5,04	5,54	0,12	35,77	0,00000	1,10

Fonte: Autoria própria (2021)

Como pode ser observado, os índices de confiabilidades calculados para cada caso foram alto, isso implica uma probabilidade a ruptura próximo a zero, sendo praticamente nula. Observando os fatores de segurança a flutuação médio pode-se notar que estão acima do limite mínimo estabelecido, demonstrando a verificação a estabilidade a flutuação conforme exposto aos parâmetros adotados.

b) Em relação a Tombamento

Em relação aos fatores de segurança ao tombamento probabilístico, as variáveis aleatórias consideradas foram o peso específico do concreto e peso específico do sedimento. A partir da substituição dessas variáveis aleatórias, foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Verificação da estabilidade ao tombamento através de análise probabilística– Critério Eletrobrás (2003)

Condição analisada	FST _{prob} médio	FST _{prob}		Desvio padrão	Índice de conf.	Prob. De Ruptura	FST min Eletrobrás (2003)
		mím	máx				
CCN	2,405	2,30	2,52	0,05	25,80	0,00000	1,5
(CCE)-1	1,699	1,62	1,78	0,04	18,17	0,00000	1,2
(CCE)-2	2,085	1,99	2,19	0,05	22,99	0,00000	1,2
(CCE)-3	2,587	2,47	2,71	0,06	27,09	0,00000	1,2
(CCE)-4	1,651	1,58	1,73	0,04	17,42	0,00000	1,2

Fonte: Autoria própria (2021)

Novamente, foi possível obter índices de confiabilidade elevados, e por consequência a probabilidade de ruptura extremamente baixa, e os valores de FST probabilístico médio acima dos recomendados pela Eletrobrás (2003).

c) Em relação a Deslizamento

As variáveis aleatórias consideradas para determinação dos fatores de segurança ao deslizamento probabilístico, foram considerados o peso específico do concreto, peso específico do sedimento, ângulo de atrito interno (sedimento) e ângulo de atrito no contato concreto/rocha. Na Tabela 13 são apresentados os valores probabilísticos dos fatores de segurança ao deslizamento.

Tabela 13- Verificação da estabilidade ao deslizamento através de análise probabilística– Critério Eletrobrás (2003)

Condição analisada	FSD _{prob} médio	FSD _{prob}		Desvio padrão	Índice de conf.	Prob. De Ruptura	FSD min Eletrobrás (2003)
		mím	máx				
CCN	1,701	1,46	2,05	0,13	5,48	0,00000	1,0
(CCE)-1	1,401	1,20	1,70	0,11	3,68	0,00422	1,0
(CCE)-2	1,473	1,27	1,78	0,11	4,27	0,00040	1,0
(CCE)-3	1,834	1,58	2,21	0,14	6,06	0,00000	1,0
(CCE)-4	1,260	1,08	1,52	0,10	2,74	0,09911	1,0

Fonte: Autoria própria (2021)

Para a verificação dos FSD probabilísticos, foram obtidos índices de confiabilidades que se mostraram altos, e apresentaram probabilidade de falha

relativamente baixas, e novamente, apresentaram FSD probabilístico acima do recomendado pela Eletrobrás.

4.3 Resumo dos resultados das abordagens

Pode-se observar que os resultados obtidos para os fatores de segurança calculados mediante as duas abordagens tiveram valores próximos um ao outro. Os resultados dos fatores de segurança probabilístico são influenciáveis pelo tipo de função de distribuição adotada para as variáveis de entrada, e como mencionado no decorrer do trabalho, para as variáveis aleatórias consideradas no estudo foram assumidas como funções de distribuição normal, tal fato pode-se justificar os resultados próximos aos encontrados na abordagem determinística.

Nas tabelas a seguir, serão apresentados os valores encontrados resumidamente dos fatores de segurança obtidos a partir das duas abordagens adotadas no trabalho para cada caso de estabilidade abordada, dessa forma a Tabela 14 apresenta os resultados para fatores de segurança a flutuação, a Tabela 15 apresenta os resultados para os fatores de segurança ao tombamento e a Tabela 16 os resultados para os fatores de segurança ao deslizamento.

Tabela 14- Resumos dos fatores de segurança flutuação- FSF

Condição analisada	Variável aleatória considerada	FSF deter	FSF _{prob} médio	Índice de conf.	Prob. De Ruptura	FSF min Eletrobrás (2003)
CCN		5,968	5,982	36,75	0,00000	1,30
(CCE)-1		2,902	2,909	28,96	0,00000	1,10
(CCE)-2	Peso específico do concreto	5,629	5,641	36,31	0,00000	1,10
(CCE)-3		6,154	6,168	36,97	0,00000	1,10
(CCE)-4		5,268	5,281	35,77	0,00000	1,10

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 15- Resumos dos Fatores De Segurança Tombamento- FST

Condição analisada	Variável aleatória considerada	FST deter	FST_{prob} médio	Índice de conf.	Prob. De Ruptura	FST min Eletrobrás (2003)
CCN		2,399	2,405	25,80	0,00000	1,50
(CCE)-1	Peso específico do concreto e peso específico do sedimento	1,695	1,699	18,17	0,00000	1,20
(CCE)-2		2,080	2,085	22,99	0,00000	1,20
(CCE)-3		2,581	2,587	27,09	0,00000	1,20
(CCE)-4		1,647	1,651	17,42	0,00000	1,20

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 16- Resumos dos Fatores De Segurança Deslizamento- FSD

Condição analisada	Variável aleatória considerada	FSD deter	FSD_{prob} médio	Índice de conf.	Prob. De Ruptura	FSD min Eletrobrás (2003)
CCN		1,682	1,701	5,48	0,00000	1,0
(CCE)-1	Peso específico do concreto; Peso específico do sedimento; Ângulo de atrito interno (sedimento); e Ângulo de atrito no contato concreto/rocha.	1,385	1,401	3,68	0,00422	1,0
(CCE)-2		1,457	1,473	4,27	0,00040	1,0
(CCE)-3		1,814	1,834	6,06	0,00000	1,0
(CCE)-4		1,246	1,260	2,74	0,09911	1,0

Fonte: Autoria própria (2021)

5 CONSIDERAÇÕES

O objetivo principal da pesquisa foi analisar a estabilidade da barragem de concreto a gravidade, estudando a seção vertedoura da barragem de Derivação do Rio Jordão a partir de parâmetros disponibilizados em na literatura característica e através da adoção de valores de referência de barragens semelhantes, através de metodologia determinística e probabilística.

Com base nos parâmetros adotados, foi possível verificar que a seção frente as ações atuantes de forma estática abordadas apresentaram fatores de segurança a flutuação, ao deslizamento e ao tombamento, acima dos valores de fator de segurança mínimos recomendados pela Eletrobrás (2003).

No que se refere ao estudo determinístico, esses apresentaram apenas valores pontuais para fatores de segurança, já que são desprezadas a variabilidade dos parâmetros envolvidos no dimensionamento, ocasionando resultados menos confiáveis no que se refere ao nível de segurança envolvendo essas obras. Tendo isso em vista, a vantagem na utilização de métodos probabilísticos, em comparação com métodos determinísticos, são a obtenção do nível de confiança atrelado ao resultado, através do índice de confiabilidade e a probabilidade de ruptura, permitindo assim uma real visão da segurança da barragem.

Para a escolha de números de simulações de Monte Carlo, a adoção de 50.000 simulações se mostrou eficiente para as condições dessa pesquisa, visto que o teste de convergência realizado para os FSD probabilístico para a probabilidade de falha convergiu a partir de 10.000 simulações.

Também foi possível demonstrar que métodos de confiabilidade podem ser utilizados e são viáveis para uso na engenharia, como visto notório nas referências utilizadas nesta pesquisa, e que o uso complementar em abordagens determinísticas auxilia na tomada de decisões importantes. Há exemplo, podemos citar o estudo desenvolvido por Gutstein (2011), Krüger (2008), Netto (2019), entre outros autores que utilizaram abordagem probabilística em suas pesquisas.

Outro ponto, é que a utilização método de Monte Carlo atualmente é uma alternativa interessante, visto que possui uma facilidade de aplicação em comparação a outros métodos probabilísticos.

Ademais, é possível notar que com a consideração da variabilidade de parâmetros durante o dimensionamento, há um ganho considerável de informações e

dados gerados. E também é possível observar as variações dos parâmetros adotados com mais clareza no método probabilístico.

Assim, a partir das limitações encontradas ao longo do trabalho segue algumas sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Verificar a barragem de Derivação do Rio Jordão com os dados locais mais aproximados ao real, e não utilizar dados de referência como nas maiorias dos casos neste trabalho. Dessa forma tendo uma verificação real da estabilidade da barragem aplicando as abordagens determinísticas e probabilísticas;
- ✓ Analisar a verificação de tensões admissíveis de maneira probabilística;
- ✓ Analisar a estabilidade da barragem de forma dinâmica, considerando as ações provenientes aos sismos;
- ✓ Fazer uma aplicação de outras abordagens probabilísticas e comparar os resultados obtidos;
- ✓ As análises realizadas ao decorrer do estudo podem ser aplicadas a outras seções;
- ✓ Abordar os resultados dos métodos determinísticos e probabilísticos da barragem de concreto a gravidade e verificar com os dados disponibilizados através da instrumentação da barragem;
- ✓ E por fim, aplicar o método aqui utilizado para outros tipos de barragens, como por exemplo, de terra e enrocamento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Segurança de Barragens 2019**. Brasília, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Segurança de Barragens 2020**. Brasília, 2021a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília, 2021b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem**. Brasília, 2016.

AGUIAR, Daniel Prenda de Oliveira. **Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens- ISB**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

ALBERTS, Ronald. **Atualização da cheia de projeto e o seu impacto na probabilidade de falha por deslizamento da barragem. Estudo de caso: UHE Santa Clara. 2020**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues; MUSSI, Jorge Muradi P.; OLIVEIRA, Luiz Fernando P. Controle da Compactação Durante a Construção das Barragens de CCR de Jordão e Salto Caxias. In: **III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo**. Foz do Iguaçu: CBDB, 1998.

AOKI, Nelson. Dogma do Fator De Segurança. In: **SEFE VI – Seminário Engenharia Fundações Especiais e Geotecnia**. São Paulo, 2008.

ARAUJO, Mariana Bernardo. **Considerações sobre análises probabilísticas de estabilidade de taludes de barragens**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ARAUJO, Mariana Bernardo; SAYÃO, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. Análise probabilística da estabilidade da barragem de santa branca. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 6, p. 6-12, jul. 2018.

ASSIS, André. **Apostila de barragens**. Brasília-DF, 2006 (Apostila).

COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS. **Guia básico de segurança de barragens**. Núcleo Regional de São Paulo, São Paulo, 1999.

BAECHER, Gregory; CHRISTIAN, John. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. The Atrium: John Wiley & Sons Ltd, 2012.

BECK, André Teófilo. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2019.

BRASIL. **Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: 26 fev. 2021.

BRASIL. **Lei n. 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm>. Acesso em: 26 fev. 2021.

CARVALHO, Newton de Oliveira. et al. **Guia De Avaliação De Assoreamento De Reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000.

CBDB. **A história das barragens no Brasil séculos XIX, XX e XXI**. Rio de Janeiro, 2011.

CIFU, Sérgio. Projetos estrutural de barragem de concreto. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, v. 39, n. 63, p. 67-76, set. 2011.

COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS. **GUIA BÁSICO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS**. Núcleo Regional de São Paulo, São Paulo, 1999.

COPEL. **Usina hidrelétrica Governador Jose Richa-Salto Caxias**. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/hotsite_caxias/index.html>. Acesso em: 06 jul.2021a.

_____. **Usina Derivação do Rio Jordão**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcweb/copel-geracao/usina-derivacao-do-rio-jordao/>>. Acesso em: 06 jul.2021b.

_____. **Usina Jose Richa**, 02 mai. 2018. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcweb/copel-geracao/usina-jose-richa/>>. Acesso em: 06 jul.2021.

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

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras**, Casos Históricos, Materiais de Construção Projeto.2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**, Eletrobrás/CBDB, Brasília-DF, 2003.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2021**: Ano base 2020, Rio de Janeiro, 2021.

GUTSTEIN, Daniela. **Estudo de tensões em fundações de barragens de gravidade de concreto pelo método de elementos finitos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

_____. **Projeto de estruturas de barragens de gravidade de concreto por meio de métodos computacionais**: visão geral e metodologia. 2011. Tese (Doutora em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

ICOLD. **As barragens e a água do mundo**: Um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. Tradução Texto Faz Comunicação S/S Ltda. Curitiba: Núcleo regional do Paraná, 2008.

KRÜGUER, Cláudio Marchand. **Análise de confiabilidade estrutural aplicada às barragens de concreto**. 2008. Tese (Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

KUPERMAN, Selmo Chapira; CIFU, Sérgio. Projetos de barragens de concreto. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, v. 34, n. 42, p. 82-89, mai. 2006.

LEVIS, Silvia Delattre. **Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MARQUES, José Lucas Sobral. **Estudo do efeito da inclinação das ombreiras na estabilidade de barragens via modelos numéricos tridimensionais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MILNITZ, Diego. **Modelagem e simulação de processos**. Indaial: Uniasselvi, 2018.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples**. Edgard Blücher: São Paulo, 1995.

MOURA, Flávia Magali Pimenta De. **Estudo comparativo da verificação da estabilidade de barragens de gravidade de concreto compactado a rolo a partir de modelagem em elementos finitos e de métodos analíticos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

NASSER, Rafael Barbosa. **McCloud Service Framework: Arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na Simulação de Monte Carlo na Cloud**. 2012. Dissertação (Mestrado em Informática) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NETTO, Arthur Sausen. **Análise de Estabilidade de Uma Barragem de Terra: Abordagens Determinística e Probabilística**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

NOVAK, Pavel. et al. **Hydraulic Structures**. 3. ed. London: Spon Press, 2004.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Projetos de usina hidrelétricas** passo a passo. 1. ed. São Paulo: Oficina de texto, 2015.

POSSAN, Edna. **Modulo I- barragens:** Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais. Barragens de Concreto. Curso Segurança de Barragens. ANA, 2020.

SANDOVAL, Martin Alexander Purizaga. **Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SANTI, Maria Raquel de Andrade. **Metodologia para avaliação da perda de massa em barragem de concreto compactado com rolo (CCR).** 2008. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **EM 1110-2-2200 - Engineering and Design - Gravity Dam Design.** Washington DC, 1995.