



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL - PEBGA

REGIANA BARBOSA CARVALHO

**PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA NA GESTÃO DE
SEGURANÇA DE BARRAGEM HIDRÉLETRICA**

TUCURUÍ - PA
2022

REGIANA BARBOSA CARVALHO

**PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA NA GESTÃO DE
SEGURANÇA DE BARRAGEM HIDRÉLETRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de barragem e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Fernanda Pereira Gouveia

TUCURUÍ - PA
2022

REGIANA BARBOSA CARVALHO

**PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA NA GESTÃO DE
SEGURANÇA DE BARRAGEM HIDRÉLETRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de barragem e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Fernanda Pereira Gouveia

Aprovado por:



Prof.^a Dr.^a Fernanda Pereira Gouveia (UFPA/NDAE/PEBGA)

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 Junior Hiroyuki Ishihara
Data: 24/10/2022 15:24:39-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Junior Hiroyuki Ishihara (UFPA /NDAE/PEBGA)

Examinador interno



Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto (UFC/PPEC)

Examinador externo

Documento assinado digitalmente
 SILVRANO ADONIAS DANTAS NETO
Data: 24/10/2022 17:30:53-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

FICHA CATALOGRÁFICA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

C331p Carvalho, Regiana Barbosa.

Proposta de integração da metodologia FMEA na gestão de segurança de barragem hidrelétrica / Regiana Barbosa Carvalho. — 2022.

88 f. : il. color.

Orientador(a): Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2022.

1. Gestão de segurança de barragem. 2. FMEA. 3. Gestão de riscos. 4. Usina hidrelétrica de Tucuruí. I. Título.

CDD 620

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, meu filho amado e meu irmão, pelo carinho, amor, apoio constante e por todo apoio para que tudo pudesse dar certo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me direcionar e me dar forças nos momentos mais difíceis desta caminhada. À Ele toda honra e toda glória.

Aos meus pais, Raimundo (Memória) e Antonia, que sempre forma os meus maiores incentivadores e que não pouparam esforço para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Ao meu amor maior, meu filho Jorge, minha energia diária para não desistir. A minha gratidão e amor por vocês é imensurável. Também agradeço ao meu irmão Gilmar, que sempre esteve na torcendo por mim.

A todos meus amigos, especialmente àqueles que estiveram ao meu lado, que sofreram e comemoraram comigo ao longo desta etapa. Obrigado por sempre me derem forças e não me deixarem desistir, e também pelos conselhos durante todo esse período.

À Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí e ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia pela oportunidade ofertada. A todo corpo docente do PEBGA e, de maneira especial, deixo meu muito obrigado à minha orientadora prof.^a Dr^a Fernanda Pereira Gouveia, pela dedicação, apoio e parceria, além da motivação e confiança.

A minha parceira de Mestrado, Andreia Arruda pelo companheirismo durante as disciplinas e apoio nas diversas etapas da pesquisa, dividindo angústias e alegrias e tornando essa etapa de nossas vidas acadêmicas muito mais agradável e leve e, de certa forma, inesquecível.

Agradeço a todos que contribuíram para a pesquisa, com sugestões e críticas construtivas, as quais foram imprescindíveis para que eu alcançasse o objetivo final.

RESUMO

O cenário de ruptura de barragem no Brasil tem sido mais frequente do que o esperado em todo o mundo e por isso, a gestão de segurança de barragens passou a ser foco central dos empreendedores que têm buscado atender às exigências legais e dos órgãos fiscalizadores. Neste contexto, metodologias de análise de riscos aplicadas em diversos setores da indústria, passaram a ser consideradas no gerenciamento de empreendimentos de barragens, agregando benefícios nas atividades de controle e monitoramento dos barramentos, assim como na previsão de modos de falha e acidentes. Logo, a presente pesquisa apresenta como objetivo geral, propor a integração da metodologia de análise de riscos, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) ao sistema de gestão de segurança da UHE Tucuruí, buscando ampliar a gestão do empreendedor para o âmbito dos cenários de modos de falha e efeitos e suas respectivas causas, incluindo o acompanhamento de indicadores relativos ao status de segurança da barragem (índices de ocorrência e detecção). A metodologia da pesquisa foi baseada em cinco etapas, sendo estas: a) caracterização da barragem estudo de caso; b) identificação das anomalias presentes no histórico da barragem; c); análise do processo de gestão do empreendedor; d) aplicação da metodologia FMEA ao estudo de caso e; e) proposta de integração da FMEA ao sistema de gestão de segurança adotado para a barragem em análise. Os resultados da aplicação do FMEA indicaram que dentre os modos de falhas simulados para o empreendimento, o cenário “erosão interna causada por colmatação de filtros e drenos na margem direita da barragem de terra” apresentou o maior NPR (Number Priority Risk) e, portanto, trata-se do cenário que necessita de priorização de ações. Ainda, para a maioria dos modos de falha, o índice de detecção foi considerado “baixa detecção”, devido a fragilidades do sistema de monitoramento do empreendedor, conforme registros verificados nos relatórios de inspeção regular e de revisão periódica. Concluiu-se também que, foi possível integrar a metodologia FMEA ao fluxograma da usina, aproveitando a etapa de “Revisão periódica”, utilizando a mesma equipe contratada para esta demanda, otimizando o fluxograma. Por fim, a metodologia FMEA, quando considerada no processo de gestão de segurança, pode proporcionar os seguintes benefícios: a) gestão da segurança de barragens orientada para o gerenciamento de cenários de modos de falha e efeitos; b) gerenciamento de mecanismos de controle de riscos e avaliação contínua do sistema de monitoramento do empreendimento.

Palavras-chave: Gestão de segurança de barragem. FMEA. Gestão de riscos. Usina hidrelétrica de Tucuruí.

ABSTRACT

The dam failure scenario in Brazil has been more frequent than expected around the world and, therefore, dam safety management has become a central focus of entrepreneurs who have sought to meet legal requirements and supervisory bodies. In this context, risk analysis methodologies applied in several sectors of the industry, started to be considered in the management of dam projects, adding benefits in the activities of control and monitoring of the structures, as well as in the prediction of failure modes and accidents. Therefore, the present research has as a general objective, to propose the integration of the risk analysis methodology, FMEA methodology (Failure Modes and Effects Analysis) to the safety management system practiced at UHE Tucuruí, seeking to expand the entrepreneur's management to the scope of the failure mode scenarios and their respective causes, including the monitoring of indicators related to the dam's safety status, occurrence and detection rates. The research methodology was based on five steps, namely: a) characterization of the dam, a case study; b) identification of anomalies present in the structure's history; c); analysis of the entrepreneur's management process; d) application of the FMEA methodology resulting in scenarios with higher NPR and; e) proposal to integrate the FMEA into the safety management system practiced by the entrepreneur. The results of the FMEA application indicated that among the failure modes simulated for the dam case study, the scenario "internal erosion caused by clogging of filters and drains in the earthen dam on the right bank" presented the highest NPR, and therefore, this is the scenario that requires prioritization of actions. Also, for most of the simulated failure modes, the detection rate resulted in a 'low detection', due to weaknesses in the dam monitoring system, as recorded in the dam instrumentation reports. In the case of the UHE Tucuruí safety management process, it was possible to integrate the FMEA methodology into the plant's flowchart, taking advantage of the "Periodic Review" stage, using the same team hired for this demand, optimizing the flowchart. Finally, it is expected that the integration of the FMEA methodology in the dam management process will provide the following benefits: a) dam safety management oriented towards the management of failure mode scenarios; b) management of risk control mechanisms and continuous assessment of the project's monitoring system.

Keywords: Dam Safety Management. FMEA. Risk Management. Tucuruí hydroelectric plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pilares da Segurança de barragens.....	19
Figura 2 - Etapas do processo de gestão de riscos em barragens	26
Figura 3 - Matriz de risco para elementos críticos da barragem de Três Marias	30
Figura 4 - Típica evolução de falha de uma barragem por galgamento ou “overtopping”.	35
Figura 5 - Processo de formação de Piping por erosão regressiva.	36
Figura 6 - Processo de formação de Piping por meio de	37
Figura 7 - Processo de formação de Piping por meio de	37
Figura 8- Arranjo geral da UHE Tucuruí.	40
Figura 9 - Registro fotográfico da UHE Tucuruí, com destaque às duas etapas construtivas.....	41
Figura 10 - Sismos registrados.	46
Figura 11 - Reservatório da UHE Tucuruí com indicação da cota máxima.....	47
Figura 12 - Curva cota x volume do reservatório da UHE Tucuruí.	47
Figura 13- Principais características geométricas do vertedouro.	48
Figura 14- Fluxograma da metodologia da pesquisa.	51
Figura 15 - Detalhe de áreas inundadas no centro da cidade de Tucuruí,	67
Figura 16 - Detalhe de áreas inundadas na Vila Residencial da.....	67
Figura 17 - Macroprocessos de segurança de barragem adotado pelo empreendedor. ..	72
Figura 18 - Fluxograma funcional para o processo de gestão de segurança da UHE Tucuruí, elaborado pela autora.	74
Figura 19 - Proposta de fluxograma funcional para o processo de gestão de segurança da UHE Tucuruí, incluindo a metodologia FMEA.	76
Figura 20 - Benefícios esperados com a integração da metodologia FMEA	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Periodicidade limite inspeção de segurança regular.	24
Quadro 2 - Matriz de classificação de Barragens.	24
Quadro 3 - Periodicidade de realização da RPS.	25
Quadro 4 - Levantamento de ocorrências com barragens de usinas hidrelétricas.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de risco para elementos críticos da barragem de Três Marias	32
Tabela 2 - Características da estrutura da UHE Tucuruí.	41
Tabela 3 - Quantitativo dos instrumentos instalados na barragem principal,.....	43
Tabela 4 - Descrições dos índices.....	52
Tabela 5 - Modelo da Tabela FMEA utilizada na pesquisa.	55
Tabela 6 - Resultado da aplicação da metodologia FMEA para a barragem estudo de caso.	58
Tabela 7 - Síntese dos modos de falhas simulados para UHE Tucuruí,.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Água
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
ETA	Event Tree Analysis
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure Modes Effects and Criticality
FTA	Fault Tree Analysis
ICOLD	International Commission on Large Dams
MPF	Ministério Público Federal
NPR	Número de prioridade de risco
PAE	Plano de Ação Emergencial
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SAE	Society of Automotive Engineers
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Geral.....	18
1.2.2 Específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Gestão de Segurança de Barragens no Brasil	19
2.1.1 Legislação de Segurança de Barragem	20
2.1.1.1 Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.....	20
2.1.1.2 Resolução da CNRH nº 223, de 20 de novembro de 2020	22
2.1.1.3 Resolução Normativa nº 696 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de 15 de dezembro de 2015	23
2.2 Gestão de risco aplicada a barragem.....	25
2.2.1 Metodologias de gestão de risco aplicadas em barragem	26
2.2.2 FMEA - Failure mode and effects analysis (análise dos modos de falhas e efeitos)	28
2.3 Principais modos de falhas em barragem	33
2.3.1 Galgamento	35
2.3.2 Piping/ Erosão interna.....	36
2.4 Usina hidrelétrica de Tucuruí (UHE-Tucuruí).....	37
2.4.1 Características técnicas	37
2.4.2 Estruturas Geológicas Relevantes	43
2.4.3 Falhamentos	44
2.4.4 Aspectos geológico-geotécnicos da fundação das estruturas.....	45
2.4.5 Sismicidade Natural	46
2.4.6 Reservatório	47
2.4.7 Órgãos extravasores	47
2.4.8 Plano de Segurança de Barragem (PSB) da UHE Tucuruí	49
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	51
3.1 Aplicação da metodologia FMEA	52
3.1.1 Identificação dos possíveis modos de falha	52
3.1.2 Definição dos índices FMEA	52
3.2 Análise do processo de gestão da segurança de barragem do empreendedor e proposta de integração da metodologia FMEA	56

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
4.1 Aplicação da metodologia FMEA	57
4.1.1 Resultado da aplicação da metodologia FMEA na UHE Tucuruí	65
4.2 Análise da gestão de segurança de barragem de Tucuruí e proposta de integração da metodologia FMEA	70
4.2.1 Análise do Processo de Gestão de segurança da Barragem estudo de Caso.....	70
4.2.2 Proposta de integração da metodologia FMEA no processo de gestão de segurança da Barragem estudo de caso	75
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
5.1 Conclusão	80
5.1.1 Aplicação da Metodologia FMEA na barragem estudo de caso	80
5.1.2 Análise da gestão de segurança de barragem do empreendedor e proposta de integração da metodologia FMEA.....	81
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

Segundo Vianna (2015) as barragens exercem um importante papel social e econômico, mas também têm potencial para causar diversos impactos negativos, principalmente quando não são devidamente planejadas, projetadas, construídas, operadas ou mantidas. Além de considerar também o risco que estas estruturas impõem principalmente para o vale de jusante, em decorrência da possibilidade de ruptura da barragem.

Conforme a ANA (2020), as estruturas sofrem com a ação do tempo durante sua vida útil, não sendo diferente com as barragens. Para que esses problemas sejam evitados ou minimizados é necessário que as estruturas passem por manutenções e inspeções periódicas. E de forma a garantir as condições necessárias de segurança das barragens ao longo da vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle que, se devidamente implementadas, asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida (ANA, 2016).

Além das rotinas de inspeção e manutenção das estruturas, o empreendedor deve considerar no seu processo de gestão de segurança de barragem, especificamente no PSB (Plano de Segurança de Barragem), a identificação e avaliação dos riscos com definição de cenários possíveis de acidentes, em atendimento ao Art.8º, inciso X da Lei que estabelece a atualização da Política Nacional de Segurança de barragens (PNSB), Lei nº. 14066/2020.

O empreendedor da barragem estudo de caso tem buscado atender a todos os critérios estabelecidos pela Política Nacional de Segurança de Barragem-PNSB, incluindo no seu PSB os estudos dos cenários possíveis de acidentes (Gouveia et al., 2022). No entanto, ao analisar o sistema de gestão de segurança da UHE Tucuruí, verifica-se a oportunidade de propor melhorias nos fluxos e etapas do processo, como uma forma de ampliar o que atualmente já é praticado pela empresa, visando uma gestão orientada para análise de riscos.

Algumas pesquisas (que serão discutidas ao longo do trabalho) demonstram que metodologias e ferramentas de gestão de riscos já reconhecidas no meio acadêmico, podem ser aplicadas para o contexto de barragens, podendo citar os métodos: Árvore de Eventos (ETA - Event Tree Analysis); Árvore de Falhas (FTA - Fault Tree Analysis); FMEA (Failure Modes and Effects Analysis); Índice de Riscos; e FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis).

No caso da metodologia FMEA, a autora considera viável a sua aplicação no contexto da pesquisa, uma vez que, segundo Santos et al., (2012) este método não exige estruturas matemáticas ou estatísticas complexas, pretendendo assegurar que qualquer falha potencial plausível seja considerada no estudo do empreendimento.

A análise dos modos de falha permite que as anomalias sejam avaliadas considerando os índices severidade (S), ocorrência (O), detecção (D), e a partir da multiplicação destes parâmetros são obtidos os modos de falha de maior número de prioridade de risco (NPR) (MELO, 2014), e com base nos resultados é possível estabelecer ações de controle e mitigação. Além disso, estes índices podem servir de parâmetros de controle para avaliação do *status* de segurança do empreendimento.

Logo, a proposta de integração da análise FMEA ao escopo do processo de gestão de segurança da UHE Tucuruí, pode aumentar o nível de segurança e confiabilidade do empreendimento, tendo em vista os benefícios que essa análise pode oferecer ao gestor.

1.1 Justificativa

A avaliação dos eventos ocorrido é de grande importância para o gerenciamento e análise de risco, auxiliando no processo de tomada de decisão pelos empreendedores (LIMA, 2014).

No cenário nacional, infelizmente temos acompanhado vários registros de acidentes em de barragens, o que passa a ascender o alerta para uma série de questões que envolvem a gestão de segurança de barragens.

Gouveia et. al (2022) comentam no Relatório pericial do MPF, que desde a implementação da PNSB, em 2017, o empreendedor da barragem estudo de caso tem buscado atender às legislações pertinentes e às exigências dos órgãos fiscalizadores, e neste sentido, vem conduzindo o seu processo de gestão de segurança, considerando no Plano de Segurança de Barragem (PSB) estudos dos possíveis cenários de acidentes.

Estes estudos são realizados por conta da força da Lei nº. 14066/2020 que exige no seu Art.8º, inciso X, que o PSB contenha a identificação e avaliação dos riscos, com definição das hipóteses e dos cenários possíveis de acidentes e desastres. No entanto, os estudos realizados pelo empreendedor têm por objetivo de atender restritamente os critérios da legislação, não sendo considerados os aspectos de gestão de riscos.

Dias (2017) ressalta que gerir riscos em barragens demanda da adoção de medidas voltadas à identificação e controle de riscos. Para isso é preciso conhecer e aplicar

técnicas e princípios de gestão que, em caso de ocorrências danosas, possam reduzir consequências e sua severidade.

Outra motivação para o desenvolvimento da pesquisa é o fato da barragem estudo de caso, apresentar condições favoráveis para a aplicação da metodologia FMEA, visto que segundo Vianna (2015) para a aplicação das técnicas de análise de risco é necessário conhecer detalhadamente os dados relativos à estrutura, considerando informações de projeto, construção, operação e manutenção da barragem.

A UHE Tucuruí dispõe de todas as informações técnicas necessárias para as análises dos cenários de modos de falha e seus efeitos, uma vez que dispõe de relatórios de inspeção, relatórios de revisão periódica, informações sobre os aspectos climatológicos, de vazão, geotécnicos e etc.

Por fim, a integração da metodologia FMEA ao sistema de gestão da UHE, poderá auxiliar o empreendedor na gestão de riscos da usina, já que para este empreendimento o dano potencial associado (DPA) classifica-se como ALTO, conforme ANEEL (2020). Santos (2017) e Gouveia et. al (2018), apresentam uma descrição breve sobre os fatores que resultam na classificação de dano potencial alto, no caso da ocorrência de uma ruptura na barragem de Tucuruí:

a) o potencial de perda de vidas humanas é latente: o núcleo urbano da cidade de Tucuruí encontra-se a aproximadamente dez quilômetros do corpo do barramento. Já a Vila Residencial da Eletronorte situa-se há aproximadamente um quilômetro da barragem de terra da margem esquerda.

b) o impacto ambiental é muito significativo: a área afetada por um evento de rompimento à jusante compreende áreas de interesse ambiental, além de que, deve-se considerar, os prejuízos para a região a montante da barragem (Lago de Tucuruí), a qual é protegida por legislação específica e se configura como uma Área de Proteção Ambiental (APA) do Lago de Tucuruí.

c) o impacto sócio econômico alto: existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem e instalações portuárias. O núcleo urbano da cidade de Tucuruí encontra-se a cerca de dez quilômetros à jusante do barramento e qualquer evento de ruptura afetaria a cidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Propor a integração da metodologia FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) ao Processo de Gestão de Segurança da barragem da UHE Tucuruí.

1.2.2 Específicos

Realizar o levantamento de anomalias presentes no histórico da estrutura, por meio de análise dos relatórios de inspeção e revisão periódica da barragem;

Aplicar a metodologia FMEA para a barragem estudo de caso, identificando os possíveis modos de falha e efeitos, destacando os três cenários de maior prioridade de risco (NPR);

Analisar o processo de gestão de segurança de barragem praticado pelo empreendedor;

Propor a integração da metodologia FMEA no fluxo do processo de gestão da barragem estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

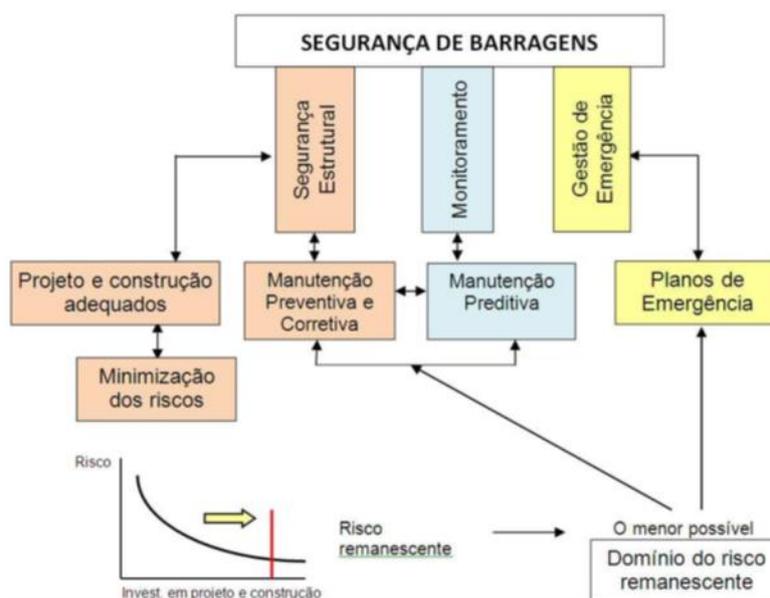
2.1 Gestão de Segurança de Barragens no Brasil

Historicamente no Brasil e no mundo ocorreram diversos eventos que vieram a causar o rompimento de barragens, trazendo consigo prejuízos tanto financeiros, ambientais, como humanos. Segundo Santos (2017), devido ao grande volume de água ou rejeitos armazenados em seus reservatórios, os impactos de uma falha apresentam, em geral, impactos econômicos, sociais e ambientais elevados, não somente ao próprio empreendimento, mas principalmente às áreas urbanizadas à jusante.

De acordo com o manual de Preenchimento da Ficha de Inspeção de Barragem (MINISTERIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2010) segurança é a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. A Segurança de Barragens pode ser definido como sendo a providência de condições que vise manter a integridade estrutural e operacional da barragem e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (BRASIL, 2010).

Para Biedermann (1997), a segurança de barragens pode ser obtida apoiando-se em três pilares básicos: segurança estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergência, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Pilares da Segurança de barragens



Fonte: Adaptado Biedermann (1997).

A segurança de barragem tem sido uma preocupação pública, diante das grandes tragédias vivenciadas ao longo da história. Os estudos de levantamento de dados referente às rupturas históricas, foram iniciados pelo ICOLD em 1964 e, em 2001, com a publicação do Bulletin 121, consolidou-se uma base referencial dos casos mais substanciais. Segundo Sampaio (2016), apesar de toda tecnologia disponível atualmente, ainda não se pode garantir integralmente a segurança de uma barragem, uma vez que diversas são as variáveis relacionadas a essa questão e que tornam o projeto e gestão do empreendimento mais complexa.

Fusaro et al (2011) afirmam que a gestão da segurança de barragens é uma questão de controle de riscos e tomada de decisões sob condições de incertezas, sendo necessário, dentre os diversos tipos de riscos. Destacando aqueles provenientes da manutenção preditiva (inspeções visuais) e às análises dos dados da instrumentação instalada em uma barragem.

2.1.1 Legislação de Segurança de Barragem

2.1.1.1 Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020

Com os diversos acidente com barragem ocorrido no século XX, ressaltou aos legisladores e órgãos reguladores a importância da criação de um instrumento legal que nivelasse os mecanismos de gestão de barragens, a atuação dos órgãos fiscalizadores e dos empreendedores. Destacando o acidente da barragem de Cataguases, no estado de Minas Gerais em 2003, sendo o estopim para a criação do projeto de Lei nº 1.18/2003, proposto pelo deputado Leonardo Monteiro, resultando na Lei ordinária 12.334, de 20 de setembro 2010, que foi alterada no ano de 2020 pela Lei Federal nº 14.066/2020, que estabeleceu a política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

A Lei 14.066/2020 aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas,

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) tem com um dos seus objetivos, garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a fomentar a prevenção e a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências, bem como regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros de barragens.

No seu Artigo 6º, a Lei nº 14066/2020 elenca os instrumentos que compõem a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

- I - Sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II - O Plano de Segurança da Barragem, incluído o PAE;
- III - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- IV - O Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA);
- V - O Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- VI - O Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- VII - O Relatório de Segurança de Barragens;
- VIII - O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH);
- IX - O monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência;
- X - Os guias de boas práticas em segurança de barragens.

A implantação do Plano de Segurança da Barragem (PSB) é uma atribuição específica do empreendedor e deve estar disponível e acessível, antes do início da operação da estrutura, para a equipe responsável pela operação e gestão da barragem no local do empreendimento e para o órgão fiscalizador (BRASIL, 2020).

O PSB tem como objetivo auxiliar o empreendedor na gestão da segurança da barragem. Para Pereira (2019), o PSB se configura como uma importante ferramenta de registro e atualização de informações, compreendendo manuais de operação, projetos diversos, plano de ação de emergência, relatórios de monitoramento e inspeção regulares.

2.1.1.2 Resolução da CNRH nº 223, de 20 de novembro de 2020

A resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 223/2020 altera a Resolução CNRH n. 144, de 10 de julho de 2012, que estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens. O CNRH é responsável pela implementação da gestão de recursos hídricos no Brasil, sendo o responsável pela definição de critérios gerais de classificação de barragens e estabelecimento de diretrizes para a implementação PNSB.

Em sua resolução n.º 144, de 10 de julho de 2012, o CNRH regulamentou o Art. 20 da PNSB, estabelecendo as “[...] diretrizes para implementação da PNSB aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB)”. Assim, foram definidos os mínimos critérios para a elaboração do PSB, pelo empreendedor, a listar:

- I. identificação do empreendedor;
- II. dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação da Lei n.º 12.334, de 2010, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem;
- III. estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança/a da barragem;
- IV. manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- V. regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- VI. indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem;
- VII. Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;
- VIII. relatórios das inspeções de segurança;
- IX. revisões periódicas de segurança.

Dentre as principais atualizações realizadas na resolução n.º 223/2020, está a possibilidade de concessão pelo órgão fiscalizador do acesso do empreendedor ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) para atualizar as informações que lhe couber, a determinação sobre a alimentação contínua do SNISB pelos fiscalizadores, incluindo a documentação e cadastro das suas barragens reguladas.

O CNRH também ampliou os órgãos a serem informados sobre as suas recomendações de melhoria de segurança das barragens

2.1.1.3 Resolução Normativa nº 696 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de 15 de dezembro de 2015

Os empreendimentos de usinas hidrelétricas devem atender aos critérios definidos pela Resolução Normativa nº 696 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de 15 de dezembro de 2015, que estabelece a classificação, formulação do PSB, realização inspeções regulares e especiais e revisão periódica de segurança.

A documentação mínima que deve compor o PSB é descrita na Lei Federal 14.066/2020 e entre as informações exigidas, destacam-se os relatórios das inspeções de segurança regular e especial; e revisões periódicas de segurança.

As inspeções de segurança regular devem ser realizadas por equipe de Segurança de Barragem, composta de profissionais treinados e capacitados e deverá abranger todas as estruturas de barramento do empreendimento e retratar suas condições de segurança, conservação e operação. Sendo de responsabilidade do empreendedor adotar os procedimentos que julgar convenientes para a inspeção de segurança regular, observadas as particularidades, complexidade e características técnicas do empreendimento. No art. 9º, § 2º, da Resolução nº. 696/2015, define que os relatórios de inspeção de segurança regular deverão conter minimamente estas informações:

- I – Identificação do representante legal do empreendedor;
- II – Identificação do responsável técnico;
- III – avaliação da instrumentação disponível na barragem, indicando necessidade de manutenção, reparo ou aquisição de equipamentos;
- IV – Avaliação de anomalias que acarretem em mau funcionamento, em indícios de deterioração ou em defeitos construtivos da barragem;
- V – Comparativo com inspeção de segurança regular anterior;
- VI – Diagnóstico do nível de segurança da barragem, de acordo com estas categorias:
 - a) normal: quando não houver anomalias ou as que existirem não comprometerem a segurança da barragem, mas que devem ser controladas e monitoradas ao longo do tempo;

b) atenção: quando as anomalias não comprometerem a segurança da barragem no curto prazo, mas exigirem monitoramento, controle ou reparo ao decurso do tempo;

c) alerta: quando as anomalias representem risco à segurança da barragem, exigindo providências para manutenção das condições de segurança; e

d) emergência: quando as anomalias representem risco de ruptura iminente, exigindo providências para prevenção e mitigação de danos humanos e materiais.

VII – indicação de medidas necessárias à garantia da segurança da barragem.

As inspeções de segurança regular devem ser realizadas sempre que houver alteração do nível de segurança da barragem, observada a periodicidade limite conforme disposta no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Periodicidade limite inspeção de segurança regular.

	Classe da Barragem		
	A	B	C
Periodicidade	6 meses	1 ano	2 anos

Fonte: ANEEL, 2015.

A classe da barragem é definida no Art. 3º da Resolução Normativa nº 696/2015, segundo categoria de risco, dano potencial associado e volume do correspondente reservatório, em acordo com a matriz de classificação disposta no Anexo I (Quadro 2) da referida resolução.

Quadro 2 - Matriz de classificação de Barragens.

Categoria de risco	Dano potencial associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Fonte: ANEEL, 2015.

As inspeções de segurança especial visam manter ou restabelecer o nível de segurança da barragem à categoria normal e deverá ser realizada mediante constituição de equipe multidisciplinar de especialistas, substitutivamente à Inspeção de Segurança Regular, sempre que o nível de segurança do barramento estiver nas categorias definidas nas alíneas c ou d do inciso VI do art. 9º da resolução 696/2015. A inspeção especial

também deve ser realizada após ocorrência de evento excepcional: abalo sísmico, galgamento, cheia ou operação hidráulica do reservatório em condições excepcionais.

Conforme no descrito no Art. 14º da Resolução ANEEL nº. 696/2015, a Revisão Periódica de Segurança - RPS tem o objetivo de diagnosticar o estado geral de segurança da barragem, levando-se em conta o avanço tecnológico, a atualização de informações hidrológicas na respectiva bacia hidrográfica, de critérios de projeto e de condições de uso e ocupação do solo a montante e a jusante do empreendimento.

A elaboração da RPS compete ao empreendedor, que deverá ser conduzida pelo responsável técnico. E a periodicidade de realização da RPS é definida de acordo com a classe da barragem, observado o interstício máximo disposto no Quadro 3.

Quadro 3 - Periodicidade de realização da RPS.

	Classe da barragem		
	A	B	C
Periodicidade	5 anos	7 anos	10 anos

Fonte: ANEEL, 2015.

Para usinas novas, a RPS deverá ocorrer até o quinto ano desde o primeiro enchimento do reservatório, independentemente de sua classificação.

Os relatórios resultantes das inspeções de segurança devem indicar as ações a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança da barragem, na qual o órgão fiscalizador estabelecerá prazo para que o empreendedor cumpra as ações previstas nos relatórios de inspeção de segurança.

2.2 Gestão de risco aplicada a barragem

A gestão de riscos consiste em um conjunto de atividades integradas, com a foco na avaliação de risco, que compreende as etapas de análise e apreciação de risco e, suas medidas de controle (VIANNA, 2015). Para Fusaro et al. (2011) essa análise de risco pode ser considerada um processo sistemático, composto pelas seguintes etapas conforme apresentado na (Figura 2):

Figura 2 - Etapas do processo de gestão de riscos em barragens



Fonte: Fusaro et al (2011).

Fernandes (2020) destaca que, para ampliar a noção do risco é essencial que se tenham boas políticas de gestão de risco implantadas, principalmente com a avaliação do quantitativo populacional existente no vale de jusante e que trabalha dentro dos empreendimentos. De acordo Louzada (2018), os riscos podem ser razoavelmente previstos através da tentativa de identificar as causas, as probabilidades de ocorrência e os danos. Uma análise de riscos consiste na utilização de um conjunto de informações disponíveis para estimar os riscos apresentados devido à presença de incertezas (FONSECA, 2018).

2.2.1 Metodologias de gestão de risco aplicadas em barragem

Fusaro et al. (2011) definem que, uma análise de riscos pode ser realizada de forma qualitativa, quantitativa, ou como variações destas. Para Perini (2009), tal escolha dependerá do detalhamento desejado, dos tipos de risco estudados, do propósito da análise e, principalmente, das informações, dados e recursos disponíveis.

A análise de risco é um processo estruturado, que visa estimar tanto a probabilidade de falha, quanto a extensão das suas consequências. Na análise quantitativa as probabilidades e consequências são descritas por palavras. Já nas análises quantitativas, as quantificações são numéricas. Os métodos de caráter qualitativo se apoiam em formas descritivas ou escalas de ordenação numérica para descrever as grandezas de probabilidade e consequência, enquanto que os quantitativos explicitam as incertezas, baseando-se, em valores numéricos da probabilidade e consequência (MELO, 2014).

Na literatura podem ser encontradas diversas metodologias utilizadas para análise de risco com potencial de aplicação em barragens, entre elas podemos destacar: Índices de Risco; Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI); Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA); Análise por Árvore de Eventos (ETA); e Análise Árvore por Falhas (FTA). Alguns métodos como os Índices de Risco, FMEA e LCI estão associadas às análises qualitativas, ao passo que as árvores de eventos (ETA) e de falhas (FTA) podem ser empregadas tanto nas formas qualitativa como quantitativa.

O método LCI foi desenvolvido no Reino Unido por Hughes e colaboradores em 2000, pode ser citado como uma variação do método FMECA. Usa diagramas de localização, causas e indicadores de falhas. Realiza-se em 3 estágios, sendo o primeiro a avaliação do impacto, o segundo a definição dos estudos que dever ser realizados e o terceiro a avaliação FMECA (MELO, 2014).

O primeiro estágio demanda de cinco etapas, I) a coleta de dados e inspeção de campo, II) previsão da vazão de descarga da barragem, III) previsão de níveis de inundação potencial à jusante, IV) previsão dos impactos, V) cálculo da pontuação de impacto. No segundo estágio do método ocorre somente a definição dos estudos a serem realizados posteriormente, conforme os resultados obtidos na avaliação do impacto. No último estágio, que depende da etapa anterior, ocorre a aplicação dos diagramas LCI. Barragens de tipos iguais contam com diagramas similares, porém, as orientações para a pontuação diferem conforme os critérios de altura e idade (MELO, 2014).

A análise por árvore de eventos (ETA - *Event Tree Analysis*) teve sua implementação divulgada a partir dos anos 70 do século passado e está essencialmente associada às indústrias nuclear, química e petrolífera (BAPTISTA, 2008). Segundo Fernandes (2020), a metodologia da Árvore de Eventos tem sido bem útil para a avaliação de riscos em barragens à medida que utiliza os dados provenientes das Fichas de Inspeção de Campo, que são rotinas padronizadas e com uma periodicidade razoável.

A aplicação da árvore de eventos no contexto das barragens envolve a predição do comportamento da barragem, definido como um sistema dividido em vários subsistemas que assegurem a funcionalidade de tal estrutura (ESPÓSITO *et al.*, 2010). Para Vianna (2015), a ETA é normalmente aplicada no contexto da segurança de barragens considerando o comportamento esperado para os diversos modos de falha na condição atual da estrutura, tendo como resultado uma estimativa da probabilidade anual de ruptura.

Já a análise por árvore de falhas – FTA, trata-se de um método indutivo cujo foco está na definição das relações existentes entre diferentes eventos. Seu desenvolvimento ocorreu em 1970, como forma de melhorar análises de riscos em centrais nucleares. Pode ser conduzida por uma abordagem quantitativa, semi-quantitativa ou qualitativa, porém, a quantitativa tem aplicação mais comum (VIANNA, 2015).

Oliveira et al. (2015, p. 896) aduzem que a FTA visa “[...] propor quais possíveis convenções de falhas de componentes de um sistema ou erros humanos poderiam determinar a ocorrência de um fenômeno indesejado e quais destas combinações cooperam para a ocorrência deste evento”.

2.2.2 FMEA - Failure mode and effects analysis (análise dos modos de falhas e efeitos)

A análise dos modos de falha e seus efeitos - FMEA, é considerada uma das primeiras técnicas sistemáticas para a análise de falhas. O método teve sua origem em 1949, na norma Military Standard Mil-STD-1629 – Procedures for performing a Failure mode, Effect and Criticality Analysis, desenvolvida pelo exército norte-americano (PETRONILHO, 2010).

O FMEA destaca-se por ser uma ferramenta de fácil aplicação, uma vez que segundo Santos *et al.* (2012), não exige estruturas matemáticas ou estatísticas, pretendendo assegurar que qualquer falha potencial plausível seja considerada no estudo, utilizando questionamentos como: o que pode dar errado? Como e em que medida pode dar errado? O que pode ser feito para prevenir ou mitigar isso? Abadia (2015) ressalta que a FMEA utiliza avaliações qualitativas, o estudo pode ser realizado mesmo na ausência de análises ou medições matemáticas mais complexas, convertendo a FMEA em um dos motivos mais importantes na aplicação de diferentes processos industriais.

A FMEA é uma metodologia indutiva, descritiva e usualmente qualitativa, que com base na disponibilidade de conhecimento e informação, analisa os potenciais modos de falhas do sistema, auxiliando na documentação e padronizando suas ações, com foco na redução dos riscos de falhas e decisões relativos à segurança (MELO, 2014; ABADIA, 2015; FONSECA, 2018).

Em 1994 a SAE (Society of Automotive Engineers) publicou a norma SAE J1739, que define a forma como a FMEA deve ser realizada. A aplicação da ferramenta FMEA

nesta pesquisa irá baseia-se na norma SAE J1739, considerando os seguintes conceitos e definições:

- O FMEA é uma ferramenta onde se apresenta todos os componentes que podem afetar ou serem afetados por uma falha da estrutura. O sistema FMEA é dividido de forma sistemática em subsistemas sucessivos, até o componente de nível mais básico, para uma compreensão adequada de suas funções, descrevendo seu papel no sistema;
- Uma falha é a cessação, ou interrupção, da capacidade de um componente, um subsistema ou o sistema para realizar uma das funções para as quais foi projetado. O modo de falha é o modo pelo qual uma falha é observada em um componente do sistema, geralmente, descrevendo como ocorreu;
- A causa da falha é o que indica a razão da falha ter ocorrido e detecção é a forma utilizada no controle do processo para evitar as falhas potenciais;
- A causa raiz da falha pode ser resultado de fenômenos tecnológicos, físicos, químicos ou processos biológicos, design ou deficiências construtivas, materiais inadequados ou de má qualidade, falhas operacionais ou mesmo ações humanas, como sabotagem ou atos de guerra;
- O efeito de falha é o impacto de um modo de falha em termos de desempenho do sistema e de seus componentes e consiste em um conjunto de resultados associado à perda de capacidade de um elemento para realizar uma função requerida.

A análise dos modos de falha por FMEA permite que as anomalias sejam avaliadas sob a perspectiva da função na estrutura onde ocorrem, considerando a ocorrência, detecção e severidade. Trata-se de uma análise aprofundada que permite a identificação dos modos de falha individuais de cada anomalia, explorando as consequências das causas e efeitos.

Segundo Melo (2014) em relação à implementação do método, existe uma grande variedade de layouts dos formulários de FMEA acessíveis na literatura, não existindo uma padronização. Sendo usualmente apresentados de forma tabular, geralmente tais formulários abordam os seguintes itens:

- Identificação do sistema;
- Identificação dos subsistemas, componentes (ou elementos);
- Descrição da função dos componentes;

tolerância para determinado evento, ou seja, maior deve ser a assertividade na resposta e medidas imediatas devem ser implantadas.

O índice NPR com as avaliações da detecção, severidade e ocorrência, deve ser calculado como mostra a seguinte fórmula:

$$\text{NPR} = (\text{D}) \times (\text{S}) \times (\text{O}) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

NPR= Número de Prioridade de Risco;

S= Índice de Severidade;

O= Probabilidade de Ocorrência

O Índice de Ocorrência (O) representa a probabilidade da ocorrência da anomalia que resultará em uma falha, ou seja, a frequência com que essas falhas podem ocorrer no período, variando de 1 a 10, quando maior o Índice de Ocorrência, maior será a probabilidade de ocorrência da falha.

O Índice de Detecção (D) considera a possibilidade de serem detectados novos modos de falha antes que elas ocorram e varia em uma escala similar ao índice de ocorrência. Para Abadia (2015) a detecção se define com um valor qualitativo estimativo à facilidade que os sistemas supervisórios ou o pessoal humano podem detectar modos potenciais de falha. E no caso das barragens é um índice importante, visto que alguns mecanismos deflagradores de falhas não demonstram sinais claros ou a tempo se se evitar a ruptura (FERNANDES, 2020).

O Índice de Severidade (S) considera os impactos e danos resultantes da falha e também varia em uma escala similar aos índices anteriores, sendo que quanto maior a severidade, maior o dano associado. O responsável pela condução da FMEA deve consultar fontes de informação como o pessoal da montagem, manuais de operação e assim auxiliar na avaliação qualitativa.

O EFEITO FINAL é a consequência da falha e é o item que deve ser avaliado conjuntamente ao Índice de Severidade (S). Fernandes (2020) destaca em sua pesquisa que, em caso que a Análise de Falha esteja sendo utilizada como passo seguinte a uma Análise de Risco, o efeito final refere-se ao desdobramento progressivo da anomalia, ou seja, o último Evento considerado, que geralmente indica uma instabilidade global ou local.

A CAUSA deve ser avaliada em duas escalas: 1) na microescala, geralmente está associada a uma anomalia e, nesse caso, podem ser utilizadas as anomalias relacionadas nas Análises de Risco; 2) macro escala, e geralmente refere-se a questões relacionadas à inadequação de projetos, técnicas construtivas ineficientes ou problemas de manutenção da estrutura (FERNANDES, 2020). Cada causa deve conter um indicativo numérico de Ocorrência (O).

O plano de ação estabelecido para o controle de cada causa pode ser desmembrado em quantas atividades forem necessárias para que haja o controle do que está causando determinada falha. E sendo elencados como CONTROLE as, medidas para adequação e revisão de projeto, inspeções visuais, verificação dos níveis de instrumentação, análises de estabilidade ou ações mais particulares (FERNANDES, 2020).

O TIPO DE CONTROLE é geralmente definido como prevenção e detecção. A prevenção refere-se às medidas que requerem um planejamento para que ocorram e o envolvimento de uma equipe multidisciplinar para esta ação como, por exemplo, as adequações de projeto. Já a detecção refere-se a atividades que devem ser realizadas diretamente na estrutura e que não requerem grandes intervenções para que sejam realizadas sendo, geralmente, as atividades de rotina já estabelecidas como inspeção e monitoramento.

A Tabela 1 apresenta exemplos de índices de severidade, índices de probabilidade de ocorrência e índices de probabilidade de detecção, respectivamente.

Tabela 1 - Matriz de risco para elementos críticos da barragem de Três Marias

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)		ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)		ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
Si	Efeito	Oi	Probabilidade	Di	Probabilidade
1	Muito Baixo	1	Improvável (< 0,1%)	1	Quase certo
2,3	Baixo	2,3	Remoto (0,1% a 1%)	2	Muito Alto
4,5	Médio	4,5,6	Ocasional (1% a 10%)	3	Alto
6,7,8	Grave	7,8,9	Provável (10% a 20%)	4	Moderadamente Alto
9	Muito grave	10	Frequente (> 20%)	5	Moderado
10	Catarrófico			6	Baixo
..	..	..	..	7	Muito Baixo
..	..	..	..	8	Remoto
..	..	..	..	9	Muito remoto
..	..	..	..	10	Quase impossível

Fonte: Adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013.

A caracterização da barragem estudo de caso trata-se de uma etapa fundamental para a aplicação da metodologia de análise do modo de falhas, uma vez que conhecer os aspectos técnicos, os dados relativos à construção e ao monitoramento da estrutura,

permite a definição dos índices relativos à severidade, ocorrência e detecção dos possíveis cenários de modo de falha e suas respectivas causas.

Todos os dados apresentados à neste item foram compilados do PSB mais recente do empreendedor, no caso referente ao ano 2021.

2.3 Principais modos de falhas em barragem

Na análise de risco é essencial analisar todas os possíveis falha do barramento, determinando a probabilidade da ocorrência de cada cenário de riscos, identificando os caminhos mais críticos para a ocorrência de eventos (FERNANDES, 2020).

Baima (2015), destaca que uma barragem pode romper por múltiplas causas, como a exemplo das barragens de concreto de gravidade que apresentam durante a ruptura, brechas parciais enquanto barragens de concreto em arco tendem a romper subitamente. Já as barragens de aterro usualmente não rompem subitamente ou completamente, pois a formação da brecha ocorre através de um processo erosivo (Canadian Dam Association, 2007).

Hartford e Baecher (2004), destaca que, tipicamente as rupturas estruturais podem ser amplamente agrupadas em três falhas principais: rupturas hidráulicas, devidas à falta de controle do fluxo de água através do maciço, movimento de massas, devido a cargas extremas e distribuições anormais de tensões no maciço e consequente deteiorização da matriz do solo, podendo levar a condições de erosão interna.

Considera-se que, as principais formas de falha em barragens se dão por: Galgamento, quando a cheia é superior a capacidade de projeto dos sistemas de extravasamentos, erosão interna no maciço da barragem de terra e enrocamento, levando a formação de brechas e colapso da estrutura (ALVES, 2018; LIMA, 2014; LADEIRA, 2007).

Historicamente, os países que possuem o maior número de barramentos também são os que apresentam o maior número de casos. Na China, por exemplo, as estatísticas mostram que, de 1954 a 2003, ocorreram 3.481 eventos de falha de barragem, resultando em mais de 30.000 mortes, a perda de mais de cinco milhões de casas e a inundação de 10.000 km² de terras agrícolas (CHENG *et al.*, 2011).

No Brasil, segundo ANA (2019) foram registrados de 2011 a 2019 pelo menos trinta e nove acidentes e cento e doze incidentes envolvendo barragens, sendo que no ano

de 2019 ocorreu rompimento de barragem BI na mina Córrego do Feijão no município de Brumadinho, resultando na liberação do rejeito armazenado, destruição da sede administrativa e vale a jusante, deixando 270 vítimas fatais, 39.520 pessoas afetadas.

Para Menescal (2009) mesmo quando se trata de barragens para a geração de energia hidrelétrica, onde há um alto padrão de controle de segurança, com a sustentabilidade financeira das usinas, podem surgir problemas que culminam em acidentes ou incidentes graves. Com base nisso, foram elencadas as ocorrências de acidente e incidente (Quadro 4) com barragens de usinas hidrelétricas no Brasil, anos de 2014 a 2018, pelo registro divulgados pela ANA nos Relatórios de Segurança de Barragens.

Quadro 4 - Levantamento de ocorrências com barragens de usinas hidrelétricas.

Barragem	Evento	UF	Ano	Causa provável
UHE Jirau	Incidente	RO	2014	Cheia
UHE Santo Antônio do Jari	Acidente	AP	2014	Galgamento
UHE Dona Francisca	Incidente	RS	2014	Cheia
UHE Cachoeira Caldeirão	Acidente	AP	2015	Cheia
PCH Inxu	Acidente	MT	2015	Erosão Interna
UHE Risoleta Neves	Incidente	MG	2015	Rompimento de barragem a montante
PCH Tamboril	Incidente	GO	2017	Rompimento parcial de membrana PEAD
PCH Rodulf	Incidente	SC	2017	Pequeno rompimento em junta de dilatação
PCH Verde 4A	Incidente	MS	2017	Vazamento dentro da casa de força
CGH Agromar	Acidente	MT	2018	Rompimento da Barragem

Fonte: ANA (2014,2015,2016,2017 e 2018).

Para Leite (2019), o acidente de Brumadinho reacende e reforça perante a sociedade o ainda descaso dado para a gestão de risco em barragens, bem como na promoção e aperfeiçoamento de mecanismos técnicos e regulatórios como no caso da Lei nº 14.066/2020. Percebe-se que é necessário que além do estabelecimento de diretrizes visando garantir a segurança de empreendimentos que disponham de barragens através de legislações, também é necessário à fiscalização efetivas para verificar se estão cumprindo integralmente o disposto na lei.

Por isso, é necessário garantir a gestão dos riscos de cada processo, identificando possíveis falhas, de forma que as ações corretivas aconteçam em tempo hábil, evitando tragédias, como já presenciadas.

A seguir serão apresentados, os principais modos de falhas:

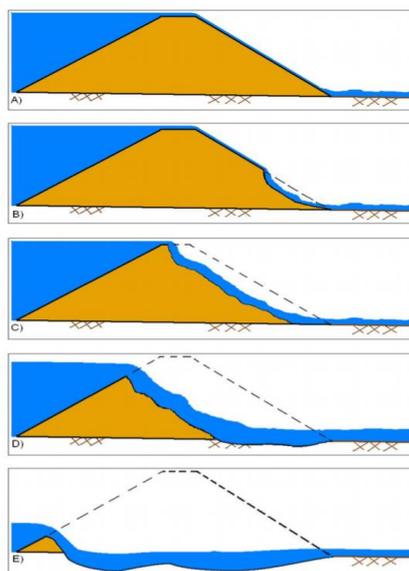
2.3.1 Galgamento

O galgamento, corresponde a elevação do nível d'água do reservatório acima da crista da barragem, provocada principalmente por precipitações pluviométricas maiores do que as estimadas em projeto (BRASIL, 2012). Segundo Mendes (2017), o galgamento é frequentemente originado pela ocorrência de um evento hidrológico extremo (com período de retorno superior ao considerado no dimensionamento dos órgãos de descarga) e que, por isso, leva a que o volume de água não descarregado, exceda o volume disponível no reservatório e, conseqüentemente, galgue a estrutura da barragem.

O galgamento é um modo de falhas mais comuns em barragens que se dá quando uma cheia ultrapassa a capacidade para a qual a estrutura de extravasamento da barragem foi projetada tubular regressiva, ou seja, a água penetra no maciço até encontrar (LIMA, 2014). Para Pereira (2019), uma outra questão que deve ser levada em consideração, é que o rompimento de barragens a montante pode ocasionar a elevação do nível do reservatório de barragens a jusante em barramentos em série, e conseqüentemente a possibilidade de galgamento.

Inicialmente a água passa a escoar sobre a crista da barragem, esse escoamento origina um processo de erosão na face de jusante da barragem que se expande para montante, atingindo a face de montante, permitindo que a vazão através da brecha aumente e resulte em ainda mais erosão e aceleração da formação da brecha (ALVES, 2018). Uma típica falha causada por galgamento é descrita esquematicamente na Figura 4.

Figura 4 - Típica evolução de falha de uma barragem por galgamento ou “overtopping”.



Fonte: USACE, 2014.

Para Alves (2018), a falha por galgamento ocorre quando a vazão defluente da barragem não pode ser adequadamente liberada por estruturas projetadas para este fim (como vertedores ou canais de alívio) e o nível da água no reservatório supera a cota da crista da barragem, podendo ocorrer nas seguintes situações:

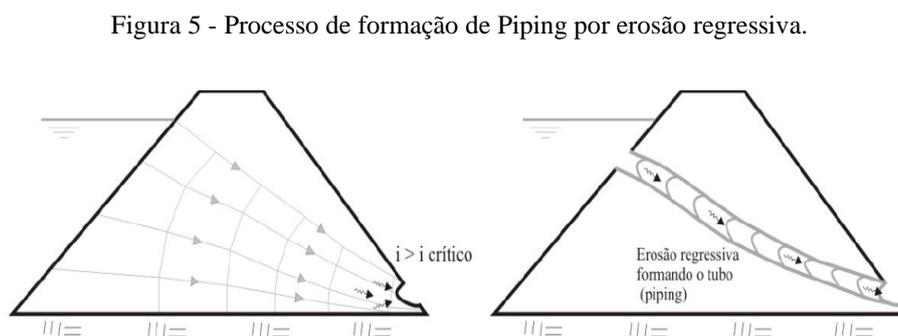
- Cheia com vazões maiores do que as vazões de projeto;
- Rompimento de uma ou mais barragens a montante;
- Mal funcionamento de comportas;
- Formação de ondas no reservatório causadas por escorregamento de encostas.

Para Lee et al, (2013), Bocchiola et al. (2014) e Collishonn (1997), também atribuem o rompimento por galgamento devido à má funcionalidade do reservatório, ocorrida no decorrer da cheia, devido ao vertedouro tornar-se incapaz de verter à água. O manual de inspeção de Barragens da Ana (2016) menciona que o rompimento da barragem devido à falta de capacidade do vertedouro de extravasar a água é dado quando, as cheias afluem no reservatório da barragem e ultrapassam o nível para os quais a estrutura foi projetada, preenchendo quase todo o vertedouro. Fator esse, que pode acarretar no colapso da estrutura, causando o galgamento, esses tipos de situações, portanto, devem ser consideradas situações de emergência.

2.3.2 Piping/ Erosão interna

Os processos de *Piping* foram descritos por Foster et al. (2000 citado por Perini, 2009):

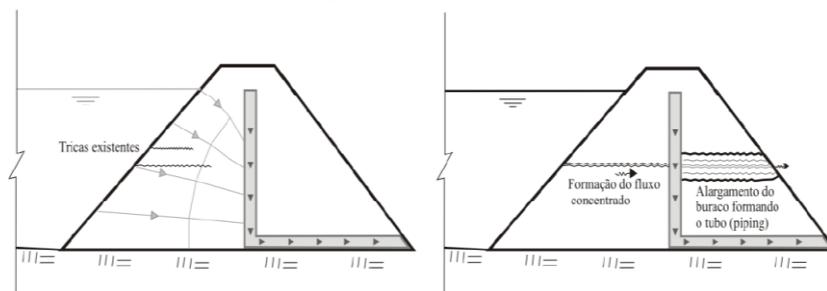
1. Erosão regressiva, no qual a erosão se inicia no talude de jusante, no ponto de saída do fluxo percolado, e progride para montante, formando um tubo que se liga ao reservatório (Figura 5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).



Fonte: Perini, 2009.

2. Erosão em torno de trincas existentes na barragem. Essas rachaduras ou fissuras permitem a formação de um fluxo concentrado, que tem origem direta no reservatório e vai até um ponto de saída, o qual passa a erodir o solo, causando o alargamento deste caminho de água, formando o tubo (Figura 6).

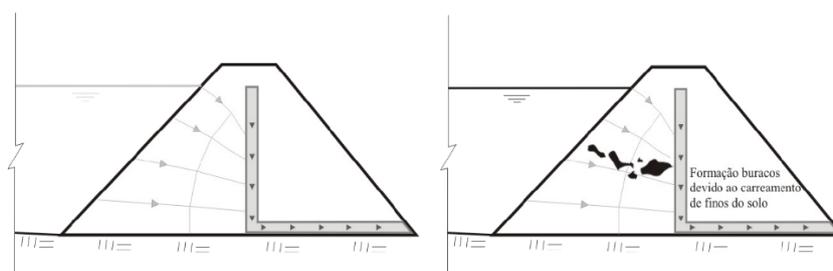
Figura 6 - Processo de formação de Piping por meio de alargamento das paredes.



Fonte: Perini, 2009.

3. Erosão devido ao carreamento de finos. Ocorre geralmente quando os materiais utilizados são mal graduados, permitindo que solos finos escapem por uma matriz granular. Esta lavagem de finos pode destabilizar internamente o solo e permitir a formação do tubo (Figura 7).

Figura 7 - Processo de formação de Piping por meio de carreamento de finos.



Fonte: Perini, 2009.

2.4 Usina hidrelétrica de Tucuruí (UHE-Tucuruí)

2.4.1 Características técnicas

A UHE Tucuruí, construída e operada pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil - ELETRONORTE está situada no rio Tocantins, na bacia hidrográfica de mesmo nome, no Estado do Pará. O empreendimento, localizado no município de Tucuruí e a aproximadamente, 335 km da cidade de Belém (contados pela calha principal do rio Tocantins), foi concebido para o atendimento do mercado de energia elétrica polarizado por Belém e pelas elevadas cargas que seriam instaladas decorrentes de empreendimentos eletrometalúrgicos.

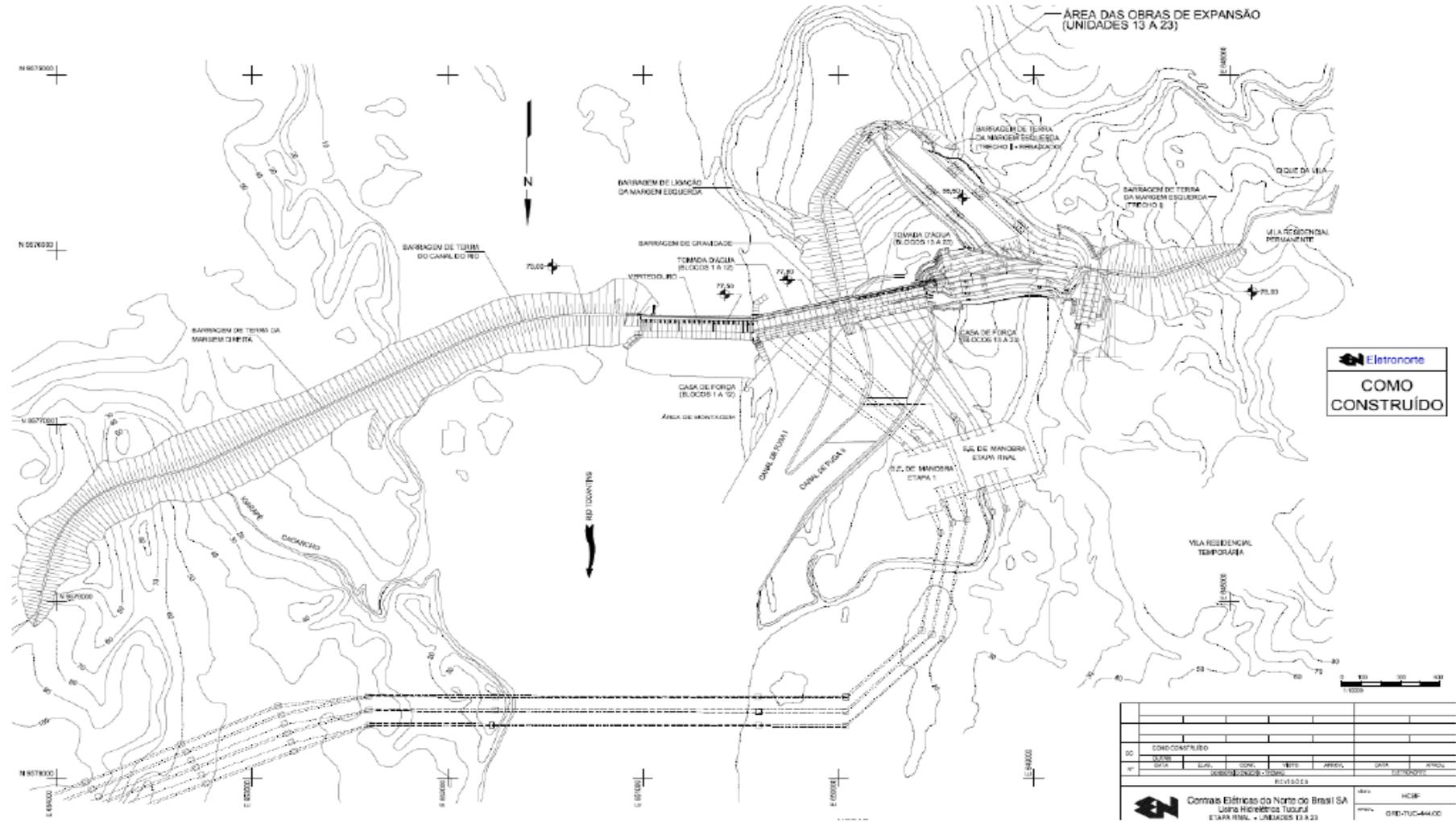
O empreendimento foi construído em duas etapas, totalizando uma capacidade instalada de 8535 MW. A primeira etapa foi concluída em 1992 com a construção da primeira casa de força, que possui 12 unidades geradoras do tipo Francis de 350 MW e duas auxiliares de 22,5 MW. A segunda casa de força, concluída em 2007, conta com 11 unidades geradoras do tipo Francis de 390 MW. No arranjo geral da UHE Tucuruí, o barramento é constituído por estruturas de concreto coroadas na El. 77,50 m e por barragens e diques de terra e enrocamento, coroadas na El. 78,00 m, que interligam as estruturas de concreto às ombreiras. O fechamento na ombreira direita é feito através de uma barragem de terra. Na sequência, as demais estruturas principais, a partir da margem direita são:

- Barragem de terra e enrocamento do canal do rio;
- Muro de transição direito;
- Bloco de transição vertedouro/margem direita (VMTD);
- Vertedouro com vinte e três comportas tipo segmento e dimensionado para descarregar uma cheia de 110.000 m³/s, cercado pelos Muros Guias Esquerdo (MGE) e Direito (MGD);
- Bloco de transição vertedouro/tomada d'água (VTA);
- Tomada d'água principal (12 unidades) incorporada à casa de força;
- Bloco da Tomada d'água auxiliar (2 unidades);
- Barragem gravidade (BG-1 a BG-4) a montante e Área de Montagem (AM-1 a AM-4) a jusante;
- Tomada d'água principal (11 unidades) incorporada à casa de força de segunda etapa;
- Bloco de transição tomada d'água/barragem;
- Barragem de terra e enrocamento;
- Eclusa;

- Barragem de terra margem esquerda
- Diques da eclusa e usina.

As Figura 8 e Figura 9 apresentam, respectivamente, o arranjo geral da UHE Tucuruí e um registro fotográfico aéreo da barragem.

Figura 8- Arranjo geral da UHE Tucuruí.



Fonte: PSB – UHE-Tucuruí (2021).

Figura 9 - Registro fotográfico da UHE Tucuruí, com destaque às duas etapas construtivas



Fonte: Adaptado de Oliveira e Nogueira (2016).

A Tabela 2 apresenta as características técnicas da UHE Tucuruí, quanto aos dados gerais, localização, bacia hidrográfica, características geológicas e etc.

Tabela 2 - Características da estrutura da UHE Tucuruí.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM	
DADOS GERAIS	
Denominação oficial	UHE Tucuruí (2889)
Empreendedor	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (372)
Entidade fiscalizadora	Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)
LOCALIZAÇÃO	
Rio	Tocantins
Município	Tucuruí
Unidade da Federação	Pará (PA)
Coordenadas	03°49'57" S 49°38'59" O
Existência de barragens a montante e a jusante	A montante: UHE Estreito (530 km) e UHE Lajeado (a mais de 970 km), localizadas no rio Tocantins
BARRAGENS DO BARRAMENTO PRINCIPAL	
Tipo	Barragens de Terra e Enrocamento
Altura máxima acima da fundação	70 a 95 m
Cota do coroamento	78 m
Largura do coroamento	7 a 10 m
Inclinação do paramento de montante	1V:1,6H a 1V:2,5H
Inclinação do paramento de jusante	1V:1,5H a 1V:2,6H
BACIA HIDROGRÁFICA	
Área	758.000 km ²
Precipitação média na bacia	A média dos totais anuais de precipitação em Tucuruí é igual a 2.483 mm, sendo que o trimestre mais chuvoso contempla os meses de fevereiro a abril.
Volume anual médio afluente	347.785 hm ³ (para QMÉDIA 1931-2005 = 11.030 m ³ /s)

(Continua)

Vazão máxima registrada	68.400 m ³ /s (março de 1980)
Vazão média de longo termo	11.030 m ³ /s
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS REGIONAIS	
Fundação	Variável
Sismicidade potencial	Baixa
NÍVEIS DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO	
Nível Mínimo Operacional (NMO)	51,6 m
Nível Máximo Normal (NMN)	74,0 m
Nível Máximo Maximorum (NMM)	75,3 m
RESERVATÓRIO	
Capacidade total	50,275 x 10 ⁹ m ³ (na cota máxima normal)
Capacidade útil	38,98 x 10 ⁹ m ³
Área Inundada (NMN)	3007 km ²
EXTRAVASOR DE CHEIAS	
Localização	Barramento Principal
Tipo	Vertedouro controlado por comportas
Descrição da entrada	23 vãos de 20 m de largura, limitados pelos blocos de transição direito e esquerdo
Descrição do canal	Perfil Creager com crista da soleira na El. 52 m
Comprimento	580,0 m
Largura (na seção constante)	20 m
Modalidade de dissipação de energia	Bacia de dissipação pré-escavada
DESCARREGADOR DE FUNDO	
Solução	N/A
Localização	N/A
Vazão (sob o NMN)	N/A
Cota da soleira à entrada	N/A
Comprimento da conduta	N/A
Tipos de comporta	N/A
Comprimento da bacia de dissipação	N/A
Fonte alternativa da energia	N/A
Possibilidade de manobra manual	N/A
Comando à distância	N/A
TOMADA DE ÁGUA – PRIMEIRA ETAPA	
Solução	De concreto, incorporada à barragem
Localização	Barramento Principal (entre VTA e BG)
Comprimento	399,7 m
Controle à entrada	Comporta vagão de rodas, comporta ensecadeira e grades da tomada de água.
Controle à saída	Comporta ensecadeira do tubo de sucção
TOMADA DE ÁGUA – SEGUNDA ETAPA	
Solução	De concreto, incorporada à barragem
Localização	Barramento Principal (entre BG e MT)
Comprimento	335,5 m
Controle à entrada	Comporta vagão de rodas, comporta ensecadeira e grades da tomada de água
Controle à saída	Comporta ensecadeira do tubo de sucção

Fonte: PSB – UHE Tucuruí (2021).

Em relação à instrumentação da barragem, a UHE Tucuruí foi amplamente instrumentada ao longo de toda a estrutura, quando analisados os dados disponíveis no PSB da barragem. No entanto, serão apresentadas informações sobre os tipos do instrumento e suas quantidades instaladas, somente nas estruturas de interesse para a

pesquisa, ou seja, estruturas da barragem de terra e barragem de concreto. A Tabela 3 apresenta os dados da instrumentação da barragem principal da UHE Tucuruí.

Tabela 3 - Quantitativo dos instrumentos instalados na barragem principal, desconsiderando as estruturas de diques e eclusas.

Instrumentos	Quantidades	Instrumentos	Quantidades
Inclinômetro	11	Pêndulo direito	13
Piezômetro tipo Casagrande	318	Piezômetro de contato	81
Medidor de recalque (magnético)	13	Piezômetro de fundação	131
Medidor de Vazão	40	Medidores triortogonais de juntas	142
Piezômetro pneumático	94	Medidores elétricos de juntas	10
Caixa sueca	8	Strain meter simples	14
Célula de pressão total tipo Hall	25	Strain meter com corretor	6
Marco de referência superficial	148	Termômetro de superfície	18
Extensômetro de hastes	47	Termômetro de massa	58
Roseta de deformação	29	Termômetro de rocha	2

Fonte: PSB – UHE Tucuruí (2021).

2.4.2 Estruturas Geológicas Relevantes

Embora se considere que as rochas do Grupo Tocantins e Formação Tucuruí apresentem seus planos de acamamento direcionados preferencialmente segundo alinhamento N-S, com mergulhos moderados para NE, localmente tais atitudes podem sofrer mudanças acentuadas em função de deformações de origem tectônica. Os filitos e clorita-xistos, aflorantes acima do plano da Falha de Empurrão, apresentam xistosidade pronunciada, fazendo um ângulo de aproximadamente 30° com o plano da falha. Nos filitos de granulação fina a xistosidade é geralmente paralela à subparalela ao acamamento, porém nas camadas mais grosseiras observa-se repetidas vezes um ângulo de até 90° entre esses planos, comprovando dobramentos contemporâneos à xistosidade.

Próximo à Falha de Empurrão são frequentes dobras pequenas, fechadas e isoclinais, que deformam a xistosidade, devendo ser atribuídas a uma fase posterior àquela do seu desenvolvimento. Existem também lineações nos filitos identificadas como lineações de minerais alongados. Os metassedimentos da Formação Tucuruí apresentam acamamento e xistosidade concordantes entre si. Em razão do baixo grau de metamorfismo a que foram submetidas essas rochas, torna-se bastante difícil distinguir qual destas feições é a observada. Assim sendo, tais lineamentos foram genericamente denominados acamamento.

As atitudes dos planos de acamamento dos metassedimentos indicam uma clara tendência a mergulhos baixos a moderados, dirigidos preponderantemente para o quadrante NE. Inversões nessas atitudes são comuns e se devem à presença de inúmeros falhamento e dobramentos. Os dobramentos e ondulação, com raras exceções, são suaves com comprimento de onda da ordem de dezenas de metros e pequena amplitude.

2.4.3 Falhamentos

Segundo o documento “TUC-E-GER-902-0002-MT R.0C”, as estruturas geológicas mais marcantes, que compartimentam o maciço rochoso de fundação das obras de concreto da 2ª Etapa são constituídas por discontinuidades: as falhas pertencentes aos sistemas Principais, F1, F2 e F3.

A Falha Principal secciona as fundações das estruturas de concreto da 1ª e 2ª Etapas por completo, estendendo-se até o antigo leito do rio Caraipé, onde foi constatado seu afloramento. Considera-se que essa falha seja a principal feição geológica condicionante do projeto das fundações dessas estruturas, possui desenvolvimento quase horizontal no sentido jusante montante (N-S) e mergulha em ângulo da ordem de 3° a 5° no sentido oeste-leste, às vezes constituindo caixa de falha com até 3,00 m de espessura.

Em suas áreas de exposição, a falha mostra-se epidotizada e silicificada em seu plano, em geral de contato rocha-rocha, às vezes com estrias e localmente com preenchimento xistoso de até 3,00 cm de espessura. O relatório “TUC-EGER- 902-0002-MT R.0C” afirma que ensaios de cisalhamento in-situ, em blocos de 1 x 1m, executados no início das obras da 1ª Etapa, indicaram parâmetros médios de 34° para o ângulo de atrito e zero para coesão para a Falha Principal.

Nas fundações das estruturas da 2ª Etapa, a Falha Principal apresenta características mais favoráveis para o ângulo de atrito, que pode ser estimado em 38°. A Falha Sotoposta, situada cerca de 15,00 m abaixo da Falha Principal, diferindo desta pela reduzida espessura da caixa de falha e por se apresentar praticamente selada. Os parâmetros de resistência dessa discontinuidade são significativamente superiores aos da Falha Principal.

A Falha Sobreposta tem ocorrência restrita aos blocos 13 e 14 das fundações da Tomada de Água, unindo-se em profundidade à Falha Principal. O plano dessa discontinuidade apresenta ondulações acentuadas e mergulhos variados, com até 40°, direcionados indistintamente para os quatro quadrantes, constituindo praticamente uma

“bacia”. Outro aspecto particular é que seu plano se confunde com o da Falha Principal em vários locais.

Quanto à condutividade hidráulica, o maciço rochoso das fundações pode ser considerado praticamente estanque, com perdas de água específicas variando entre 0,1 e 1 l/min/m/kgf/cm². Alguns valores de perdas de água específicas pouco mais elevados, até da ordem de 10 l/min/m/kgf/cm², foram registrados em falhas do Sistema F3, na Falha Principal e no topo rochoso mais fraturado. O relatório “TUC-E-GER-902-0002-MT R.0C” indica que esse maciço rochoso apresenta características geomecânica bastante favoráveis, o que foi comprovado pelo bom comportamento das estruturas de 1ª Etapa.

2.4.4 Aspectos geológico-geotécnicos da fundação das estruturas

Os aspectos geológico-geotécnicos da fundação das estruturas podem ser verificados, de forma sintética:

- Barragem de terra da margem direita
 - Trecho morro de Filito – Maciço rochoso em filito, solo de alteração/residual de filito.
 - Trecho Diabásios/ Quartzito – Dique de diabásios, maciço rochoso de filito, solo de alteração de filito e solo de alteração de filito quartzoso e rítmico.
 - Trecho Terraço-Cagancho – Terraço aluvionar, maciço rochoso de filito, solo de alteração de filito
 - Trecho Metabasitos – Maciço rochoso de metabasitos e solo de alteração/residual de metabasitos.
- Barragem de terra do canal do rio
 - Maciço rochoso de metabasitos, maciço rochoso de metassedimento, maciço rochoso de filito, maciço rochoso de clorita xisto.
- Barragem de terra da margem esquerda e dique da vila
 - Maciço de basalto, solo de alteração/residual de basalto.
- Barragem de terra e enrocamento
 - Maciço de metassedimento, solo de alteração/residual de metassedimento
- Estruturas de Concreto do barramento

- Maciço rochoso de metassedimento.

2.4.5 Sismicidade Natural

A Memória Técnica da Primeira Etapa de implantação da UHE Tucuruí apresenta os registros da rede de sismógrafos da Eletronorte instalada na região de Tucuruí a partir de 08/11/1979. Com os dados coletados à época, verificou-se uma baixa magnitude dos sismos registrados, cujas medições variaram entre 0 (24/12/1979) e 4,1 (05/11/1980), com epicentros distam até 300 km do empreendimento.

A título de complementação, a Sismicidade foi verificada através de um boletim sísmico publicado pelo Centro de Sismologia da USP, o qual é resultado da reanálise do catálogo de eventos do centro e consiste em um conjunto de informações tabuladas para coordenadas, hora de origem e magnitude dos terremotos ocorridos no Brasil que são detectados e analisados pelo centro de sismologia. Enquanto que o catálogo é um produto dinâmico, o boletim, depois de criado, é estático.

Para verificação dos sismos ocorridos em regiões próximas a Tucuruí foi observado o boletim de eventos a partir do ano 2001. Os sismos detectados a partir de 2001, cujos epicentros se situam a uma distância de até 300 km da barragem, constam na Figura 10.

Figura 10 - Sismos registrados.

Data Completa	Localidade	Latitude e Longitude	Distância até Tucuruí (km)	Magnitude
21/6/2007, 1:40:00	Tucuruí, Pará	03° 46' S; 49° 40' W	6,654	0
22/5/2014, 18:56:25	Parauapebas, Pará	05° 56' S; 50° 11' W	241,832	3,3
20/9/2014, 6:18:37	Parauapebas, Pará	06° 25' S; 50° 08' W	292,764	3,1
04/2/2015, 13:34:34	Canaã dos Carajás, Pará	06° 27' S; 50° 04' W	295,103	3,3
14/8/2015, 23:38:18	Água Azul do Norte, Pará	06° 10' S; 50° 34' W	279,574	2,8
25/12/2016, 13:59:34	Canaã dos Carajás, Pará	06° 26' S; 50° 07' W	294,235	3,8
24/3/2017, 9:05:18	Baião, Pará	02° 37' S; 49° 47' W	133,739	3,1
24/3/2017, 9:06:01	Baião, Pará	02° 35' S; 49° 32' W	136,832	3,5
19/6/2017, 6:47:04	Parauapebas, Pará	05° 44' S; 50° 28' W	231,121	2,7
11/7/2017, 5:58:15	Parauapebas, Pará	05° 49' S; 50° 37' W	246,448	2,6
31/8/2017, 6:41:00	Canaã dos Carajás, Pará	06° 25' S; 50° 05' W	291,774	3,5
26/9/2017, 4:51:01	Parauapebas, Pará	05° 56' S; 50° 38' W	258,855	2,7
30/9/2017, 5:03:54	Ourlândia do Norte, Pará	06° 03' S; 50° 50' W	280,316	2,4
01/10/2017, 1:46:21	Parauapebas, Pará	05° 50' S; 50° 34' W	245,728	3,3
04/10/2017, 7:08:39	Parauapebas, Pará	05° 46' S; 50° 39' W	243,187	2,1
04/10/2017, 16:46:55	Parauapebas, Pará	05° 47' S; 50° 33' W	239,943	3,4
04/10/2017, 18:50:40	Parauapebas, Pará	05° 47' S; 50° 30' W	237,66	2,9

Fonte: PSB – UHE Tucuruí (2021).

2.4.6 Reservatório

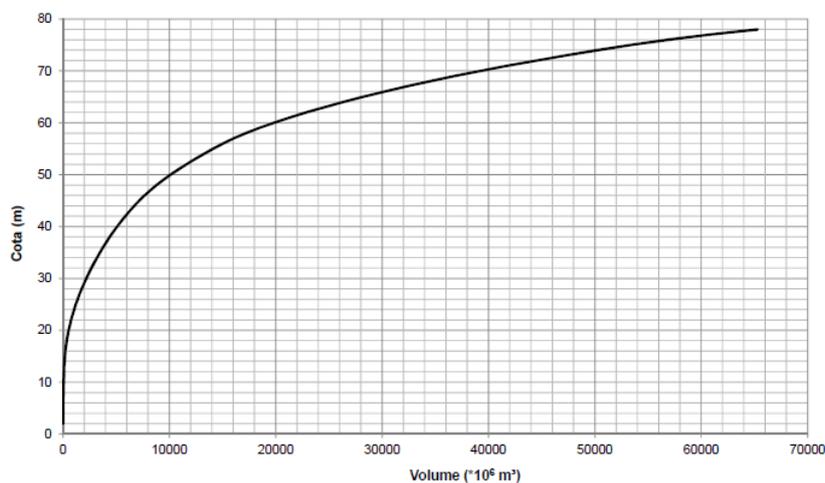
O reservatório da UHE Tucuruí possui os níveis de água característicos listados na sequência. O nível de água máximo normal do reservatório segue ilustrado na Figura 11. Na sequência pode ser observada a curva cota-volume do reservatório na Figura 12.

Figura 11 - Reservatório da UHE Tucuruí com indicação da cota máxima.



Fonte: PSB – UHE Tucuruí (2021).

Figura 12 - Curva cota x volume do reservatório da UHE Tucuruí.



Fonte: PSB – UHE Tucuruí (2021).

2.4.7 Órgãos extravasores

O vertedouro integra o barramento da UHE Tucuruí e possui 570 metros de comprimento, sendo limitado lateralmente pelo bloco de transição vertedouro/muro de transição direito (VMTD) na margem direita e pelo bloco de transição vertedouro/tomada

de água (VTA) na margem esquerda, formando 23 vãos controlados por comporta do tipo segmento. O bloco de transição vertedouro/muro de transição direito (VMTD) possui 10 metros de comprimento e o bloco de transição vertedouro/tomada de água (VTA) possui 11,2 metros.

A estrutura possui perfil vertente tipo “creager” determinado segundo os critérios do U.S. Corps of Engineers, tendo sido projetado para a vazão nominal de 100.000 m³/s com uma carga de 22,0 m sobre a crista da soleira vertente (El. 52 m), através de 23 vãos de 20,0 m de largura. Com a revisão dos estudos de cheias, alterou-se a vazão máxima do vertedouro para 110.000 m³/s, sendo necessário adaptar esta estrutura e seus equipamentos, de maneira que pudesse escoar esta vazão com o nível de água máximo na El. 75,3 m.

Dezesseis dos vinte e dois pilares têm a extremidade de jusante em seção vertical plana, de modo a favorecer a aeração natural da lâmina de água na região. Os seis pilares restantes são prolongados até a extremidade da concha do salto de esquí, constituindo as paredes que dividem a estrutura em grupos de vãos isolados, formando as calhas.

A restituição do escoamento é por lançamento do jato através de uma concha com raio de curvatura de 35 m, ângulo de lançamento de 32° na cota 30 m. A jusante do escoamento foi prevista uma bacia de dissipação pré-escavada na El. - 40m. O vertedouro possui uma laje de concreto armado a jusante, ancorada no maciço rochoso, que protege a estrutura contra a erosão regressiva a partir da bacia de dissipação. Os principais dados geométricos do vertedouro são apresentados na Figura 13.

Figura 13- Principais características geométricas do vertedouro.

Vãos	23
Largura dos Vãos (m)	20,0
Pilares	24
Espessura dos pilares (m)	5
Comportas segmento	23
Cota da crista da soleira (m)	52,0
Carga de projeto (m)	22,0
Cota da bacia de dissipação (m)	-40,0
Vazão de projeto (m ³ /s)	100.000
Vazão vertente limite (m ³ /s)	110.000
Nível de água máximo normal no reservatório (m)	74,00
Nível de água máximo maximorum (m)	75,30

Fonte: PSB – UHE Tucuruí (2021).

2.4.8 Plano de Segurança de Barragem (PSB) da UHE Tucuruí

A UHE Tucuruí teve seu PSB elaborado em dezembro de 2017, atendendo as exigências da Resolução ANEEL nº. 696/2015, que estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL, de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. A normativa, conforme seu Art. 7, determinou que todos os empreendedores proprietários de até cinco usinas, deveriam elaborar os seus Planos, no prazo de até 22 de dezembro de 2017.

A última versão do PSB da UHE Tucuruí é o do ano 2021, sendo um documento bastante consultado no desenvolvimento da presente pesquisa.

Em termos de classificação, os barramentos da Usina Hidrelétrica (UHE) Tucuruí, tanto a barragem principal quanto os diques foram classificados com categoria de risco BAIXA e dano potencial associado ALTO, resultando em classe B, conforme Resolução normativa da ANEEL nº 696/2015.

No caso do dano potencial associado ALTO pode-se citar a pesquisa de Santos (2016), na avaliação da mancha de inundação formada em decorrência do rompimento hipotético, ocorreria a inundação de grandes áreas (84,71 km²) no período de uma hora e dez minutos após o início da formação da brecha de ruptura, com um tempo de resposta de apenas oito minutos para os habitantes da zona urbana de Tucuruí, o que aumenta o potencial de perdas de vidas humanas e torna ainda mais importante a articulação de ações voltadas à segurança da população em situação de risco.

O conteúdo mínimo que o PSB deve conter, segundo o disposto no Art. 8º da Lei nº 14.066 de 2020:

- Dados do empreendedor;
- Dados técnicos referentes à implantação do empreendimento;
- Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;
- Manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem;

- PAE, exigido conforme o art. 11 da Lei nº 14.066, de 2020;
- Relatórios das inspeções de segurança;
- Relatórios das inspeções de segurança regular e especial;
- Revisões periódicas de segurança;
- Identificação e avaliação dos riscos, com definição das hipóteses e dos cenários possíveis de acidente ou desastre; (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020);
- Mapa de inundação, considerado o pior cenário identificado;
- Identificação e dados técnicos das estruturas, das instalações e dos equipamentos de monitoramento da barragem.

É válido destacar que em 21 de setembro de 2017, a Procuradoria da República de Tucuruí do Ministério Público Federal – MPF instaurou inquérito civil (nº. 1.23.007.000201/2017-43) com a finalidade de verificar a efetiva implantação da Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) da UHE-Tucuruí, tendo em vista à época, algumas denúncias advindas da comunidade ao MPF, sobre a real condição de estabilidade da barragem.

O MPF acionou o órgão fiscalizador (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica) e o empreendedor para prestarem informações sobre o assunto. Nos autos, foram designados como peritos para instruir o inquérito civil, uma equipe composta por dois docentes, uma discente e um egresso, do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da UFPA (PEBGA), Campus Tucuruí.

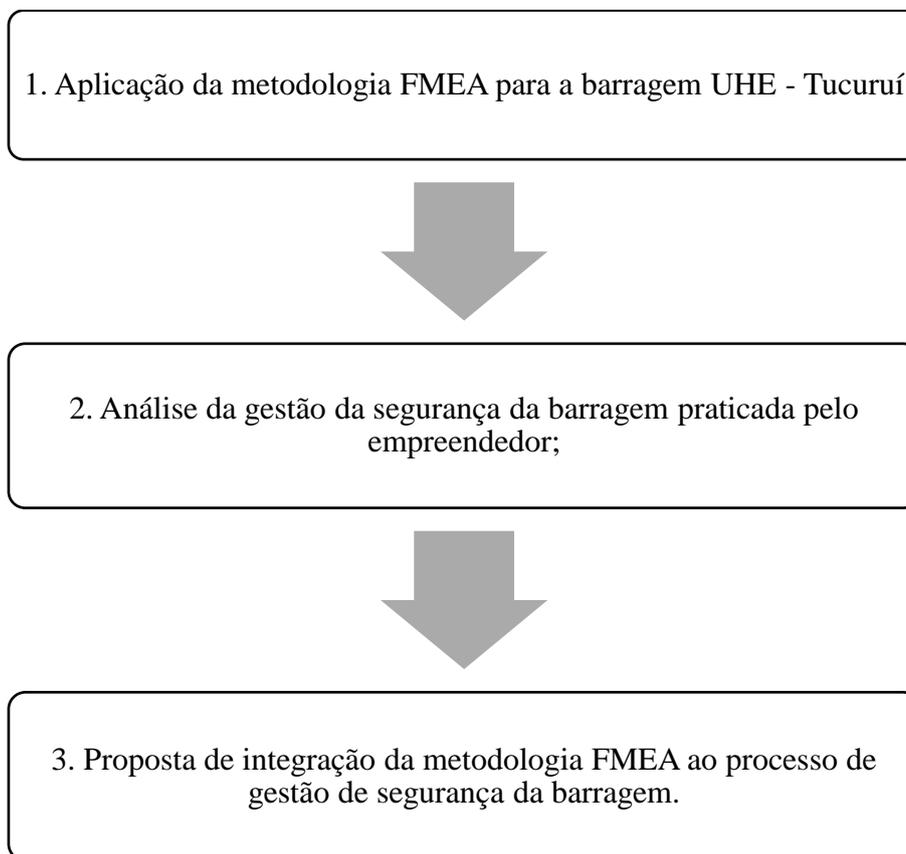
Assim, os peritos passaram a atuar na referida demanda, em parceria com o MPF, sempre que solicitados por este órgão ministerial, produzindo Laudos periciais, sendo estes manuscritos, documentos de importante conteúdo, consultados pela autora da presente pesquisa.

O detalhamento e discussão do Processo de Gestão de Segurança de Barragem implementado pelo empreendedor serão apresentados no item 4.2.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa desenvolvida para o alcance dos objetivos foi baseada em três etapas, sendo as mesmas descritas no fluxograma da Figura 14.

Figura 14- Fluxograma da metodologia da pesquisa.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Os documentos consultados para o levantamento das anomalias existentes no barramento principal foram: os Relatórios de Inspeção Regular de Segurança (IRS), elaborados pela própria equipe técnica do empreendedor, referente ao ano de 2021 e os Relatórios de Revisão Periódica de Segurança (RPS), elaborados por consultores externos, versão 2012 e 2020.

3.1 Aplicação da metodologia FMEA

3.1.1 Identificação dos possíveis modos de falha

A identificação dos possíveis modos de falha foi baseada na revisão de literaturas que discutiram falhas mais frequentes em empreendimento de barragem e também, por meio de consulta aos documentos que compõem o PSB da UHE Tucuruí.

As barragens são suscetíveis aos efeitos de deteriorações causadas por diversos fatores ao longo do tempo. Eventualmente, a ocorrência de apenas um tipo de anomalia já poderá causar danos consideráveis, mas dependendo de seu tipo, causa e localização poderá afetar apenas a questão operacional, mas não a estrutural (ANA, 2013). Ainda, Hartford (2003) sugere que essas anomalias que afetam a segurança da barragem sejam agrupadas em modos de falha, que são os mecanismos pelos quais uma barragem pode romper.

3.1.2 Definição dos índices FMEA

A partir dos cenários de modos de falha definidos, prosseguiu-se à atribuição dos índices de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) para cada modo, sendo estes índices propostos por Melo (2014) adaptado de Espósito e Palmier (2013), conforme Tabela 4. Os valores atribuídos foram sendo devidamente justificados, buscando-se coerência nas atribuições de cada índice, em termos de ordem de grandeza.

Tabela 4 - Descrição dos índices.

ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)		ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)		ÍNDICE DE DETECÇÃO (D)	
Si	Efeito	Oi	Probabilidade	Di	Probabilidade
1	Muito Baixo	1	Improvável (< 0,1%)	1	Quase certo
2,3	Baixo	2,3	Remoto (0,1% a 1%)	2	Muito Alto
4,5	Médio	4,5,6	Ocasional (1% a 10%)	3	Alto
6,7,8	Grave	7,8,9	Provável (10% a 20%)	4	Moderadamente Alto
9	Muito grave	10	Frequente (> 20%)	5	Moderado
10	Catarrófico			6	Baixo
..	..	..	..	7	Muito Baixo
..	..	..	..	8	Remoto
..	..	..	..	9	Muito remoto
..	..	..	..	10	Quase impossível

Fonte: Adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013.

Para a atribuição do índice S foi utilizado como base revisão de literaturas sobre impactos e danos, resultantes dos modos de falhas mais frequentes em empreendimentos

de barragens. Em termos de pontuação, quanto maior o índice S, maior é o efeito daquele modo de falha. O efeito da severidade pode variar entre “muito baixo” (1) a “catastrófico” (10), conforme Tabela 4.

Para a definição dos índices O e D foram utilizados os documentos que contemplam o PSB da UHE-Tucuruí (2021), em seu Volume V – Revisão Periódica de Segurança, a saber:

- Relatório de ISR
- Relatório de RPS
- Relatório de Revisão dos Estudos Hidrológicos,
- Relatório de Avaliação da Instrumentação
- Relatório de avaliação das Estruturas Extravasoras, dissipadoras e de Operação
- Relatório de avaliação de estruturas de concreto
- Relatório executivo da revisão periódica da segurança da barragem,
- Relatório de avaliação da barragem dique de terra e enrocamento
- Relatório de revisão dos estudos geológicos e sismológicos

Para a atribuição do índice O, foi realizada a análise dos mesmos relatórios supracitados e as pesquisas de Santos (2017) e Lara (2016). Conforme a Tabela 4, a probabilidade de ocorrência pode variar de “improvável” ($< 0,1\%$) a “frequente” ($> 20\%$).

Para cada ocorrência, também se define um mecanismo de controle, e o tipo do controle a ser atribuído a cada causa geradora do modo de falhas. Conforme descrito por Fernandes (2020), para o controle de cada causa, pode ser desmembrado em quantas atividades forem necessárias, de forma que haja o controle do que está causando determinada falha. E para o tipo de controle é geralmente definido como, prevenção (medidas que requerem um planejamento) e, detecção (atividades que devem ser realizadas diretamente na estrutura).

No caso da determinação do índice D, analisaram-se os seguintes fatores: quantidade de instrumentação do barramento com leituras ativas, existência de nível de controle para o instrumento em análise (uma vez que foram verificados instrumentos de auscultação sem parâmetros de nível de controle de alerta), periodicidade das leituras dos instrumentos, entre outros, tendo em vista que todos estes fatores apresentam correlação com o nível de detecção D da barragem. A probabilidade de detecção, pode variar desde “quase incerta” (1) até “quase impossível” (10).

Por fim, procedeu-se à determinação do NPR (Number Priority Risk) para cada modo de falha simulado para a barragem estudo de caso, por meio da interação multiplicadora entre índices S, O e D (Tabela 5).

Tabela 5 - Modelo da Tabela FMEA utilizada na pesquisa.

Função	Modo de falha	Efeito final do modo de falha	Índice (S)	Causas	Índice (O)	Controle	Tipo de controle	Índice (D)	NPR
---------------	----------------------	--------------------------------------	-------------------	---------------	-------------------	-----------------	-------------------------	-------------------	------------

3.2 Análise do processo de gestão da segurança de barragem do empreendedor e proposta de integração da metodologia FMEA

A análise do processo de gestão de segurança de barragem da UHE Tucuruí foi realizada com base no Relatório Pericial do MPF: Relatório Pericial do PSB da UHE-Tucuruí (2022), o qual apresenta informações sobre os processos de gestão de segurança implementadas e desenvolvidas pelo empreendedor da usina.

Com a análise do documento, foi elaborado um fluxograma funcional de todas as etapas do processo de gestão de segurança da barragem estudo de caso, para melhor visualização dos fluxos e processos, e posteriormente com base neste fluxograma, realizou-se a proposta de integração da metodologia FMEA no processo de gestão do empreendedor.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Aplicação da metodologia FMEA

A Tabela 6 contém o resultado da aplicação da metodologia FMEA para a barragem principal da UHE Tucuruí. Destaca-se que as justificativas da nota de cada índice de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) já estão consideradas na própria tabela, com o intuito de facilitar a compreensão da análise dos modos de falha e seus respectivos NPR, de forma integrada. A critério da pesquisa serão discutidos apenas os três modos de falha com maior NPR.

Tabela 6 - Resultado da aplicação da metodologia FMEA para a barragem estudo de caso.

Função	Modo de falha	Efeito final do modo de falha	Índice (S)	Justificativa do índice	Causas	Índice (O)	Justificativa do índice	Controle	Tipo controle	Índice (D)	Justificativa do índice	NPR
1 Barragem de concreto												
1.1 Paramento de montante												
Conter o reservatório	1.1 (1) Galgamento da barragem	Formação de processos erosivos externos e possível abertura de brecha	9 (Muito grave)	Na pesquisa desenvolvida por Santos (2017) foi simulado o rompimento hipotético da UHE Tucuruí, onde a mancha de inundação formada, inundou grandes áreas (84,71 km ²) no período de uma hora e dez minutos após o início da formação da brecha de ruptura, e com um tempo de resposta de apenas oito minutos para os habitantes da zona urbana de Tucuruí, aumentando potencial de perdas de vidas humanas. Vale ressaltar que não foi atribuído índice 10 (catastrófico), pois conforme apontado pela Ana (2012), um galgamento de uma barragem de concreto não produz necessariamente uma ruptura, porém, as sobrecargas a que a barragem pode ser submetida podem conduzi-la à ruptura.	Níveis de água excepcionais	1 (Improvável) (< 0,1%)	A probabilidade de ocorrência de um galgamento na UHE Tucuruí foi considerada IMPROVÁVEL devido o Relatório de avaliação das estruturas extravasoras e dissipadora de energia, que compõem a Revisão periódica da barragem (PSB – UHE Tucuruí, 2021), indicarem que os dados de níveis do reservatório vêm apresentando, ao longo dos anos, níveis aceitáveis. Conforme a atualização dos estudos de cheias realizado pela usina, a vazão decamilenar, obtida a partir da série de vazões médias diárias naturais com 71 anos de dados observados e mais uma marca de cheia, foi de 95.320 m ³ /s. Essa vazão equivale a 95,3% da capacidade de projeto do vertedouro com o reservatório no NA Máximo Normal, (El. 74,00) que é de 100.000 m ³ /s. E no NA Máx. Maximorum (El. 75,30), a estrutura permite descarregar uma vazão de até 110.000 m ³ /s, ou seja, um valor de 15,4% maior que a decamilenar instantânea encontrada. Conforme apontado no Relatório de Revisão dos Estudos Hidrológicos- Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), à borda livre normal da usina é de 3,50 m e a borda livre mínima é de 2,20 m, atendendo com folga conforme os definido no documento "Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas", elaborado pela Eletrobras em outubro de 2003, o que deixa o barramento com um risco mínimo de transbordamento numa eventual ocorrência de cheias excepcionais com dispositivos de descarga operando conforme projeto).	Monitoramento Hidrológico	Deteção	3 (Alto)	Conforme apontado no Relatório de Revisão dos Estudos Hidrológicos- Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), a usina utiliza estações fluviométricas das estações de Marabá e Fazenda Alegria para a previsão de vazões afluentes ao reservatório da UHE Tucuruí. Sendo possível o monitoramento das informações de nível de água, vazão e precipitações destas estações a cada quinze minutos, bastando apenas acessar o site do Sistema de Monitoramento Hidrológico da Agência Nacional de Águas. O relatório ainda destaca que, além dos postos fluviométricos, existem instaladas na região da UHE Tucuruí, duas PCDs, sendo uma para monitorar o nível do canal de fuga e outra para monitorar o nível do reservatório, e o acesso aos valores indicados nesses dois postos pode ser feito através do Centro de Operação da Usina. E monitoramento fluviométrico é feito por cinco estações hidrométricas, em atendimento à Resolução Conjunta ANA ANEEL nº 03, de 10 de agosto de 2010	27

					Falhas nos sistemas de vazão	<p>1 (Improvável) (< 0,1%)</p> <p>A ocorrência de Galgamento pois as características hidráulicas dos dispositivos de descarga garantem considerável capacidade de vertimento da barragem (LARA, 2016). Análises desenvolvidas por Lara <i>et al.</i> (2014) e testes numéricos indicam que mesmo com a ocorrência de um evento extremo, da ordem da decamilenar, considerando a falha de até duas comportas, não seria o suficiente para galgar a barragem da UHE Tucuruí. Conforme apontado no relatório de avaliação das estruturas extravasora e dissipadoras de energia (2020), na hipótese de ocorrência de cheia com pico superior à vazão de projeto, conforme os resultados de ensaios em modelos hidráulicos reduzidos realizados à época, estima-se com confiança que as bordas livres são ainda compatíveis com o trânsito de vazões da ordem de até 115.000 m³/s por esse vertedouro, sem riscos de galgamento das obras do aproveitamento. O relatório também indica que o vertedouro desde a sua entrada em operação do aproveitamento, não sofreu qualquer intervenção física que pudesse alterar sua capacidade de descarga, concluindo que, em relação à segurança ao galgamento das obras que compõem o barramento, o vertedouro na situação atual de conservação e manutenção da sua estrutura civil e de operacionalidade dos seus equipamentos, atende às exigências da legislação nacional pertinente a segurança de barragens no tocante ao aspecto em foco.</p>	Inspeção visual	Deteção	<p>2 (Muito Alto)</p> <p>Em análise ao Relatório de Revisão dos Estudos Hidrológicos- Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), foi verificado que para garantir a segurança da Barragem, com relação aos picos de vazões decamilenares, o Vertedouro é disposto de 23 comportas segmento que podem ser operadas remotamente e, no local automática e manual através das 12 (doze) Centrais Hidráulicas. Cada central opera duas comportas adjacentes e são dotadas de dois motores elétricos, um para cada comporta. Além de que é previsto, no caso de falha em um dos motores, a comporta seja operada através do motor da sua adjacente. O relatório destaca ainda, que em caso de uma eventual falta de alimentação elétrica nos 04 (quatro) transformadores da SE do Vertedouro, principal fonte de energia para o acionamento das comportas, para o mesmo tem instalado um Sistema Auxiliar de Emergência através de 01 (um) Grupo Diesel de Emergência adequado ao acionamento das comportas. Ressaltando que a realização de testes “in-situ” de operação das comportas, contemplando inspeção visual e funcional de todos os componentes de acionamento das comportas são executados atendendo uma periodicidade programada.</p>	18
1.2 Túnel de drenagem e da falha da lagoa										
Controle da percolação através da barragem	1.2 (1) Percolação excessiva com presença de Eflorescência	Perda de massa do concreto, causando diminuição da capacidade mecânica	5 (Médio)	<p>Analisando o cenário de modo de falha “percolação excessiva com presença de eflorescência na barragem de concreto causada por ineficiência do sistema de drenagem”, a severidade atribuída foi de nível médio, com índice 5, entendendo-se que se trata de uma falha com progressão mais lenta, comparada com uma erosão interna, por exemplo, e pode ser controlada com mais eficiência, sem levar à uma ruptura do barramento.</p>	Ineficiencia do sistema de drenagem	<p>2 (Remoto) (0,1% a 1%)</p> <p>De acordo com as leituras recebidas dos medidores de vazão ativos apontadas no relatório, houve um decréscimo das vazões ao longo do tempo, o que acompanha a tendência do histórico das vazões das drenagens (drenos). Indicando que não há ocorrência de grandes fluxos nos medidores de vazão que despertem dúvidas quanto à eficiência dos tratamentos da fundação e do sistema de drenagem. Com tudo não se pode realizar uma análise isolada, sendo necessário verificar os dados da instrumentação de Piezometria, com objetivo de confrontar os valores da subpressão da estrutura. No caso da UHE Tucuruí, não será possível, visto que no relatório de instrumentação da Eletronorte (2020), apenas 20%, dos piezômetros de contato apresenta registros recentes no GESTIN, entre 2018 e 2020, sendo que o total desses instrumentos de auscultação instalados na barragem de concreto, somam 81.</p>	<p>Manutenção e monitoramentos dos drenos</p> <p>Prevenção</p>	<p>Inspeção visual</p> <p>Deteção</p>	<p>6 (Baixo)</p> <p>A deteção para o modo de falha em análise foi considerada baixa, sendo atribuído índice 6, visto que no Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), apontam que as leituras dos medidores de vazão localizados no túnel de drenagem, têm sido realizadas em período maiores ao definido no programa de monitoramento do empreendedor (período previsto quinzenal, período realizado trimestral). Ainda, o último dado registrado foi de aproximadamente oito meses após a última leitura dos instrumentos. Com relação aos demais medidores, não foram levantados dados desde abril de 2003, exceto o instrumento TUCMVZ- 035-1 (MV35), localizado no Túnel de Drenagem, o qual teve como última leitura o mês de dezembro de 2015. Ressalta-se que no caso das leituras dos drenos instalados nas estruturas de concreto, não foram definidos níveis de controle (níveis de alerta e atenção), podendo comprometer as análises das vazões de drenagem interna, e conseqüentemente o nível de deteção de situação de emergência.</p>	60

										É importante destacar que para as leituras dos drenos instalados nas estruturas de concreto, não foram definidos níveis de controle (níveis de alerta e atenção), comprometendo a análise das vazões de drenagem interna, e conseqüentemente o nível de detecção de situação de emergência.		
Controle da percolação através da barragem	1.2 (1) Percolação excessiva com presença de Eflorescência	Aumento do potencial de <i>piping</i> na fundação	7 (Grave)	Para a ANA (2013), essa passagem das águas de percolação pode promover a dissolução e carreamento do material, provocando a criação de vazios nesses contatos, descontinuidades ou falhas, podendo causar aumento de supressão, possibilidade de movimentação relativa (recalques e/ou escorregamentos, etc.) e afundamentos. Para Coelho (2017), a falta de controle da percolação na barragem ou em sua fundação é uma das principais causas de rupturas.	Níveis de água excepcionais	1 (Improável) (< 0,1%)	De acordo com Relatório de Avaliação de Estruturas de Concreto - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), para o monitoramento das pressões no maciço de fundação foram instalados diversos piezômetros nas estruturas de concreto da Usina, verificando que a piezometria apresenta um comportamento estabilizado ao longo dos anos, com oscilações conforme as variações dos níveis d'água e com valores abaixo dos valores estimados em projeto. Verificando que não há indícios de comprometimento da segurança da barragem por conta de subpressões e que o Sistema de Drenagem e de Percolação está desempenhando adequadamente a sua função de drenar o maciço, aliviando a subpressão no contato das estruturas com o maciço da fundação	Monitoramento das instrumentações de auscultação (Medidores de vazão e piezômetros)	Detecção	6 (Baixo)	Por meio da análise do Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), observou-se que as instrumentações existentes são consideradas suficientes para avaliar o comportamento de segurança da UHE Tucuruí. Conforme apontado nesse relatório, a estrutura de concreto possui um total de 567 equipamentos de instrumentação distribuído ao longo das principais estruturas de concreto e suas fundações. Destacando piezômetro de contato (81 equipamento), piezômetro de fundação (131 equipamento) e medidores de vazão (22 equipamentos). No entanto, as informações do mesmo relatório, apontam que apenas 20% dos piezômetros de contato apresenta poucos registros recentes no GESTIN, entre 2018 e 2020, sendo que o total desses instrumentos de auscultação instalados na barragem de concreto, somam 81. Vale destacar que os níveis de controle (níveis de alerta e atenção) haviam sido considerados apenas para as estruturas da 1ª etapa, comprometendo a análise da estabilidade da estrutura, e conseqüentemente o nível de detecção de situação de emergência.	42
1.3 Estrutura vertente												
Controle do nível do reservatório	1.3 (1) Cavitação	Colapso da estrutura vertente	6 (Grave)	Segundo Rocha (2020), as implosões das bolhas formadas no processo de cavitação, poderão causar microtrincas e conseqüentemente erosões localizadas, e em situações extremas essas trincas evoluem para danos maiores e isso poderá comprometer a integridade da estrutura, levando-a ao seu colapso.	Deterioração e deslocamento na Laje	2 (Remoto) (0,1% a 1%)	De acordo com Relatório de Avaliação de Estruturas de Concreto - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), algumas anomalias foram identificadas, sem interferir na segurança da barragem. As partes emersas das estruturas do Vertedouro indicaram, de um modo geral, um bom estado de conservação com alguns casos pontuais, e sem indícios de quaisquer anomalias que possam comprometer o seu desempenho, durabilidade e a sua estabilidade estrutural	Inspeção visual	Detecção	6 (Baixo)	Conforme apontado Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), a estrutura de concreto do vertedouro possui um total de 137 equipamento de instrumentação distribuído ao longo da estrutura. Porém a análise das informações do mesmo relatório, apontam que apenas 20% dos piezômetros de contato apresenta poucos registros recentes no GESTIN, entre 2018 e 2020, sendo que o total desses instrumentos instalados na barragem de concreto, somam 81. Vale destacar que os níveis de controle (níveis de alerta e atenção) haviam sido considerados apenas para as estruturas da 1ª etapa, comprometendo a análise da estabilidade da estrutura, e conseqüentemente o nível de detecção de situação de emergência.	72
2. Barragem de terra e enrocamento												
2.1 Barragem de terra margem direita _BTMD												

Conter o reservatório	2.1 (1) Deslizamento de Talude a jusante	Colapso da estrutura	9 (Muito grave)	O deslizamento de taludes pode provocar processo erosivo, permitindo a passagem da água e devido a velocidade do processo, não haverá tempo hábil para realização de intervenções. Para Lauriano (2009), os problemas de infiltração e entupimento do sistema de drenagem interno da barragem de terra, geram brechas que se iniciam como pontos de vazamento e crescem a partir do ponto de surgimento (<i>piping</i>).	Entupimento de drenos	1 (Improvável) (< 0,1%)	A análise ao Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), apontam que a instrumentação existente confirma a eficiência dos sistemas de controle de drenagem e de percolação executados, mostrando que as poropressões medidas pelos instrumentos de auscultação estão conforme o esperado.	Monitoramento das instrumentações de auscultação	Detecção	6 (Baixo)	De acordo com análise do Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), verificou-se que as instrumentações existentes são consideradas suficientes para avaliar o comportamento de segurança da UHE Tucuruí. A barragem de terra da margem direita tem um total de 141 equipamentos de instrumentação distribuído ao longo da estrutura. No entanto foi apontado no mesmo relatório, que dos 14 medidores de vazão instalado na barragem terra e enrocamento, apenas seis apresentaram leitura recentes, três na barragem margem direita e três na esquerda. A operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região. O relatório também evidenciou que do total de piezômetros de Casagrande (283 piezômetros) apresentados no arquivo extraído do GESTIN, 64 não possuem leitura ou não tem sido lido recentemente. Além do que, dos noventa e três piezômetros pneumáticos instalados, apenas 43 tem suas leituras apresentadas no arquivo extraído do GESTIN, sendo que, dentre os 43 piezômetros, aproximadamente 30% (13) tem sido lido recentemente.	54
	2.1 (2) Galgamento	Colapso da estrutura	10 (Catastrófico)	Lara (2016), o galgamento de uma barragem de terra, o processo de erosão do talude iniciará na face de jusante do corpo da barragem, e essa passagem da água fará com que o talude eroda progressivamente em direção ao centro do corpo da barragem. E A evolução do processo progredirá em direção à face de montante do barramento e até atingir o nível do leito do rio, alargando a brecha de ruptura. Vale ressaltar que foi atribuído índice 10 (catastrófico), pois conforme apontado pela Ana (2012), o galgamento em barragem de terra produz um arraste de materiais e a posterior ruptura, justificando um valor elevado para a avaliação da severidade.	Níveis de água excepcionais	1 (Improvável) (< 0,1%)	o Relatório de avaliação das estruturas extravasora e dissipadora de energia- Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), apontam que os dados de níveis do reservatório, vem apresentando ao longo dos anos níveis aceitáveis. Conforme a atualização dos estudos de cheias realizado pela usina, a vazão decamilenar, obtida a partir da série de vazões médias diárias naturais com 71 anos de dados observados e mais 1 marca de cheia, foi de 95.320 m³/s. Essa vazão equivale a 95,3% da capacidade de projeto do vertedouro com o reservatório no NA Máximo Normal, (El. 74,00) que é de 100.000 m³/s. E no NA Máx. Maximorum (El. 75,30), a estrutura permite descarregar uma vazão de 110,000 m³/s, ou seja, um valor de 15,4% maior que a decamilenar instantânea encontrada. Conforme apontado no Relatório de Revisão dos Estudos Hidrológicos- Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), à borda livre normal da usina é de 3,50 m e a borda livre mínima é de 2,20 m, atendendo com folga conforme os definido no documento "Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas", elaborado pela Eletrobrás em outubro de 2003, o que deixa o barramento com um risco mínimo de transbordamento numa eventual ocorrência de cheias excepcionais com dispositivos de descarga operando conforme projeto).	Monitoramento Hidrológico	Detecção			

				Falhas nos sistemas de vazão	1 (Improvável) ($< 0,1\%$)	A ocorrência de Galgamento pois as características hidráulicas dos dispositivos de descarga garantem considerável capacidade de vertimento da barragem (LARA, 2016). Análises desenvolvidas por Lara <i>et al.</i> (2014) e testes numéricos indicam que mesmo com a ocorrência de um evento extremo, da ordem da decamilenar, considerando a falha de até duas comportas, não seria o suficiente para galgar a barragem da UHE Tucuruí. Conforme indicado no relatório de segurança da Eletronorte (2020), na hipótese de ocorrência de cheia com pico superior à vazão de projeto, os resultados de ensaios verificados nos modelos hidráulicos reduzidos realizados à época, estimou-se com confiança que as bordas livres são ainda compatíveis com o trânsito de vazões da ordem de até 115.000 m ³ /s por esse vertedouro, sem riscos de galgamento das obras do aproveitamento. Os relatórios da empresa apontam que os instrumentos de auscultação instalados nas principais estruturas de concreto e suas fundações, permanecem indicando comportamentos inalterados das estruturas durante o período analisado	Inspeção visual	Deteção	3 (Alto)	Relatório de avaliação das estruturas extravasora e dissipadora de energia- Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021) destacou que para garantir a segurança da Barragem, com relação aos picos de vazões decamilenares, o Vertedouro é disposto de 23 comportas segmento que podem ser operadas remotamente e, no local automática e manual através das 12 (doze) Centrais Hidráulicas. Cada central opera duas comportas adjacentes e são dotadas de dois motores elétricos, um para cada comporta. Além de que é previsto, no caso de falha em um dos motores, a comporta seja operada através do motor da sua adjacente. O relatório destaca ainda, que em caso de uma eventual falta de alimentação elétrica nos 04 (quatro) transformadores da SE do Vertedouro, principal fonte de energia para o acionamento das comportas, para o mesmo tem instalado um Sistema Auxiliar de Emergência através de 01 (um) Grupo Diesel de Emergência adequado ao acionamento das comportas. Ressaltando que a realização de testes “in-situ” de operação das comportas, contemplando inspeção visual e funcional de todos os componentes de acionamento das comportas são executados atendendo uma periodicidade programada.	30
2.1 (3) Erosão Interna	Piping	10 (Catastrófico)	A severidade relacionada ao modo de falha de maior NPR computou o valor máximo (10), que implica em um cenário catastrófico, dado a gravidade da situação que pode ser instaurada por uma falha de erosão interna, com efeito de <i>piping</i> . Esta falha, segundo Flores-Berrones e López-Acosta (2011) inicia em qualquer ponto da região de jusante da barragem, definida pela ação do fluxo da água, propagando-se regressivamente em direção ao reservatório, aumentando gradativamente o tubo dentro na	Rocha fraturada, podendo causar percolação excessiva e carreamento de materiais na barragem de terra	1 (Improvável) ($< 0,1\%$)	Segundo Relatório de Avaliação da Barragem de Terra e Enrocamento – PSB – UHE Tucuruí (2021) houve a identificação de uma condição desfavorável de fundação decorrente do elevado grau de fraturas na rocha (barragem de terra da margem direita), que, no entanto, foi sanado por meio de sucessivos tratamentos; quanto a condição de percolação excessiva, os resultados das análises de instrumentação da barragem de terra verificados no mesmo Relatório, indicaram eficiência no sistema de controle de drenagem e de percolação, uma vez que as medidas de poropressão encontram-se conforme o esperado.	Controle rígido dos critérios de projetos e construções	Prevenção	6 (Baixo)	De acordo com análise do Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), foi verificado que as instrumentações existentes são consideradas suficiente para avaliar o comportamento de segurança da UHE Tucuruí. A barragem de terra da margem direita tem um total de 141 equipamento de instrumentação distribuído ao longo da estrutura. Porém dos 14 medidores de vazão instalado na barragem terra e	60

2.1 (3) Erosão Interna	Piping		<p>estrutura até gerar uma brecha que resulta na ruptura da barragem. Caldeira (2008) comenta que este tipo de anomalia pode causar grande prejuízo a infraestrutura do barramento, comprometendo a estabilidade, o sistema de drenagem interna (se houver) e a segurança como um todo da obra e da região de jusante.</p> <p>Apesar de ser amplamente detectado nos primeiros enchimentos do reservatório, o <i>piping</i> pode ocorrer em qualquer estágio da vida útil da barragem. Essa anomalia é, portanto, de grande relevância aos proprietários e gestores de barragens em relação ao gerenciamento e a administração das mesmas (Fell <i>et al.</i>, 2003; Caldeira, 2008; ICOLD, 2013, 2016; Ferdos, 2016).</p>			Instrumentação e inspeções visuais (Medidor de vazão e Piezômetro)	Detecção	<p>enrocamento, apenas 6 apresentaram leitura recentes, três (3) na barragem margem direita e três (3) na esquerda, pontuando que a operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região. E relacionado ao total de piezômetros de Casagrande (283 piezômetros) instalado na estrutura, 64 não possuem leitura ou não tem sido lido recentemente. E dos 93 piezômetros pneumáticos, apenas 43 tem suas leituras registrada, dentre esses, aproximadamente 30% (13) tem sido lido recentemente. Destacando que a operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região.</p>	
			Colmatção de filtros e drenos	<p>2 (Remoto) (0,1% a 1%)</p>	<p>Com base nas análises do Relatório de Avaliação da Barragem de Terra e Enrocamento – PSB – UHE Tucuruí (2021) que apontam a existência de um eficaz sistema de controle de drenagem e de percolação da barragem, indicando que as poropressões medidas pelos instrumentos estão conforme os limites de controle esperados.</p>	Manutenção e monitoramentos dos drenos	Detecção	<p>6 (Baixo)</p> <p>De acordo com análise do Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021) as instrumentações existentes são consideradas suficientes para avaliar o comportamento de segurança da UHE Tucuruí. A barragem de terra da margem direita tem um total de 141 equipamentos de instrumentação distribuído ao longo da estrutura. No entanto foi apontado no relatório, que dos 14 medidores de vazão instalado na barragem terra e enrocamento, apenas 6 apresentaram leitura recentes, 3 na barragem margem direita e 3 na esquerda. Destacando que a operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região.</p>	120

2.1 (3) Erosão Interna			Movimentação diferencial decorrente de sismo e aumento pressão de cisalhamento	1 (Improvável) ($< 0,1\%$)	De acordo com os relatórios de avaliação da barragem de terra e enrocamento (2020), a eficiência da implantação dos respectivos sistemas para o controle de fluxo pela fundação da Barragem de terra da margem direita, é constatada pelos piezômetros instalados na fundação, mostrando que houve redução das subpressões. Os relatórios também apontam que as informações dos sismos ocorridos na região não indicam nenhum valor de alta magnitude. Portanto, considerado adequada a utilização dos coeficientes de aceleração iguais a 0,05g na direção horizontal e 0,03g na direção vertical, conforme proposto.	Monitoramento Sismológico	Detecção	5 (Moderado)	De acordo com análise do Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021) as instrumentações existentes são consideradas suficientes para avaliar o comportamento de segurança da UHE Tucuruí. A barragem de terra da margem direita tem um total de 141 equipamentos de instrumentação distribuído ao longo da estrutura. No entanto foi apontado no relatório, que dos 14 medidores de vazão instalado na barragem terra e enrocamento, apenas 6 apresentaram leitura recentes, 3 na barragem margem direita e 3 na esquerda. Destacando que a operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região. O relatório evidencia que do total de piezômetros de Casagrande (283 piezômetros) apresentados no arquivo extraído do GESTIN, 64 não possuem leitura ou não tem sido lido recentemente. Destacando que dos noventa e três piezômetros pneumáticos instalados, apenas 43 tem suas leituras apresentadas no arquivo extraído do GESTIN, sendo que dentre esses, aproximadamente 30% (13) tem sido lido recentemente. Destacando que a operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região.	50
					Monitoramento das instrumentações de auscultação (Medidores de vazão e piezômetros)	Detecção				
			Aberturas de trincas no maciço devido a movimentações diferenciais	1 (Improvável) ($< 0,1\%$)	No Relatório de Avaliação da Barragem de Terra e Enrocamento – PSB – UHE Tucuruí (2021), apontam que na região superficial das fundações, os tratamentos objetivaram minimizar as deformações diferenciais e de alívio de tensões, bem como, evitar, principalmente no caso de fundação rochosa, a possibilidade de carreamento de material do maciço compactado pelas fundações. E que a resistência mecânica e a deformabilidade dos maciços de fundação, tanto das barragens quanto dos diques são compatíveis com o nível de tensões a que estão submetidos por conta das obras de terra e enrocamento.	Instrumentação	Detecção	5 (Moderado)	De acordo com o Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), as instrumentações existentes são consideradas suficientes para avaliar o comportamento de segurança da usina. A barragem de terra da margem direita conta com 141 instrumentos distribuído ao longo da estrutura. No entanto dos 14 medidores de vazão instalados na barragem terra e enrocamento, apenas 6 apresentaram leitura recentes, 3 na barragem margem direita e 3 na esquerda. O relatório evidencia que do total de piezômetros de Casagrande (283) apresentados no arquivo extraído do GESTIN, 64 não possuem leitura ou não tem sido lido recentemente. Destacando que dos noventa e três piezômetros pneumáticos instalados, apenas 43 tem suas leituras apresentadas no arquivo extraído do GESTIN, sendo que dentre esses, aproximadamente 30% (13) tem sido lido recentemente. Destacando que a operação adequada deste instrumento é de grande importância para a identificação de processos de <i>piping</i> nesta região.	50

4.1.1 Resultado da aplicação da metodologia FMEA na UHE Tucuruí

A Tabela 7 apresenta uma síntese dos modos de falhas e seus respectivos, efeito final, causas e NPR, obtidos a partir da aplicação da metodologia FMEA na barragem principal de Tucuruí. Dentre os modos de falha simulados, os três que alcançaram o maior NPR foram: “erosão interna causada por colmatação de filtros e drenos na margem direita da barragem de terra” (NPR=120), seguido dos modos de falhas “Percolação excessiva com presença de Eflorescência causada pela ineficiência do sistema de drenagem na barragem de concreto” (NPR=60) e “erosão interna causada por um cenário de rocha fraturada com percolação excessiva e carreamento de materiais na barragem de terra” (NPR=60).

Tabela 7 - Síntese dos modos de falhas simulados para UHE Tucuruí, destacados os três modos de maior NPR.

MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	CAUSAS	NPR
Barragem de Concreto			
Galgamento	Formação de processos erosivos externos e possível abertura de brecha	Níveis de água excepcionais	27
		Falha no sistema de vazão	18
Percolação excessiva com presença de Eflorescência	Perda de massa do concreto, causando diminuição da capacidade mecânica	Ineficiência do sistema de drenagem	60
		Aumento do potencial de <i>piping</i> na fundação	42
Cavitação	Colapso da estrutura vertente	Deterioração e deslocamento na Laje	42
Barragem de terra margem direita _BTMD			
Deslizamento de Talude a jusante	Colapso da estrutura	Entupimento de drenos	54
		Níveis de água excepcionais	30
Galgamento	Colapso da estrutura	Falha no sistema de vazão	30
		Rocha fraturada com percolação excessiva e carreamento de materiais na barragem de terra	60
Erosão Interna	<i>Piping</i>	Colmatação de filtros e drenos	120
		Movimentação diferencial decorrente de sismo e aumento pressão de cisalhamento	50
		Aberturas de trincas no maciço devido a movimentações diferenciais	50

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Dentre todos os cenários simulados, o modo de falha de “erosão interna causada por colmatação de filtros e drenos na margem direita da barragem de terra” obteve o maior NPR (que é dado pela multiplicação dos índices $S \times O \times D$). Considera-se este resultado coerente com as condições da barragem em análise, haja vista que as notas atribuídas para cada índice foram baseadas nos relatórios de inspeções regulares, revisões periódicas e pesquisas científicas sobre o empreendimento.

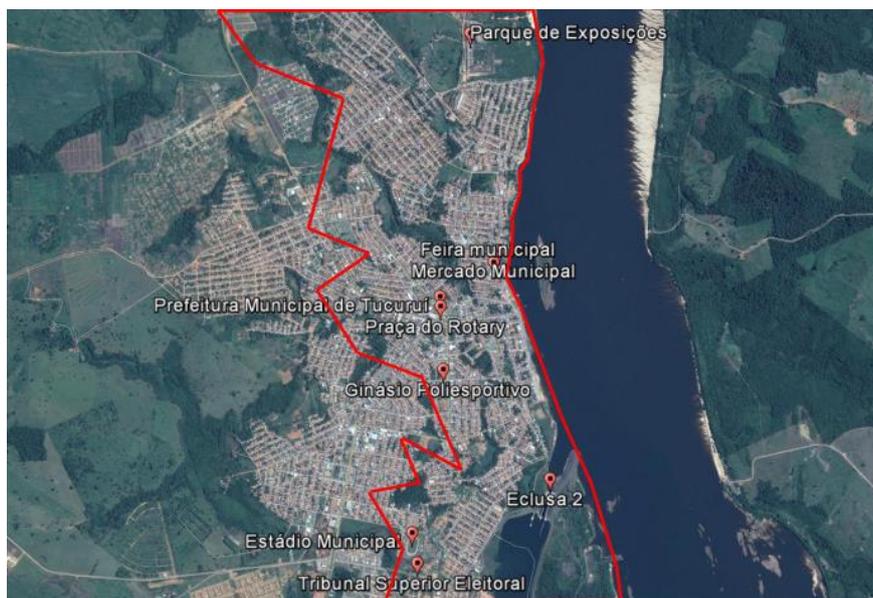
O índice severidade computou o valor máximo (10), o que implica em um cenário catastrófico, dada a gravidade da situação que pode ser instaurada por uma falha deste tipo, cujo efeito final seria o fenômeno de *piping*. A erosão interna, segundo Berrones e Acosta (2011) inicia em qualquer ponto da região de jusante da barragem, definida pela ação do fluxo da água, propagando-se regressivamente em direção ao reservatório, aumentando gradativamente o tubo dentro na estrutura até gerar uma brecha que resulta na ruptura da barragem.

Caldeira (2008) comenta que este tipo de anomalia pode causar grande prejuízo a infraestrutura do barramento, comprometendo a estabilidade, o sistema de drenagem interna (se houver) e a segurança como um todo da obra e da região de jusante.

Apesar de ser amplamente detectado nos primeiros enchimentos do reservatório, o *piping* pode ocorrer em qualquer estágio da vida útil da barragem. Essa anomalia é, portanto, de grande relevância aos proprietários e gestores de barragens em relação ao gerenciamento e a administração das mesmas (Fell *et al.*, 2003; Caldeira, 2008; ICOLD, 2013, 2016; Ferdos, 2016).

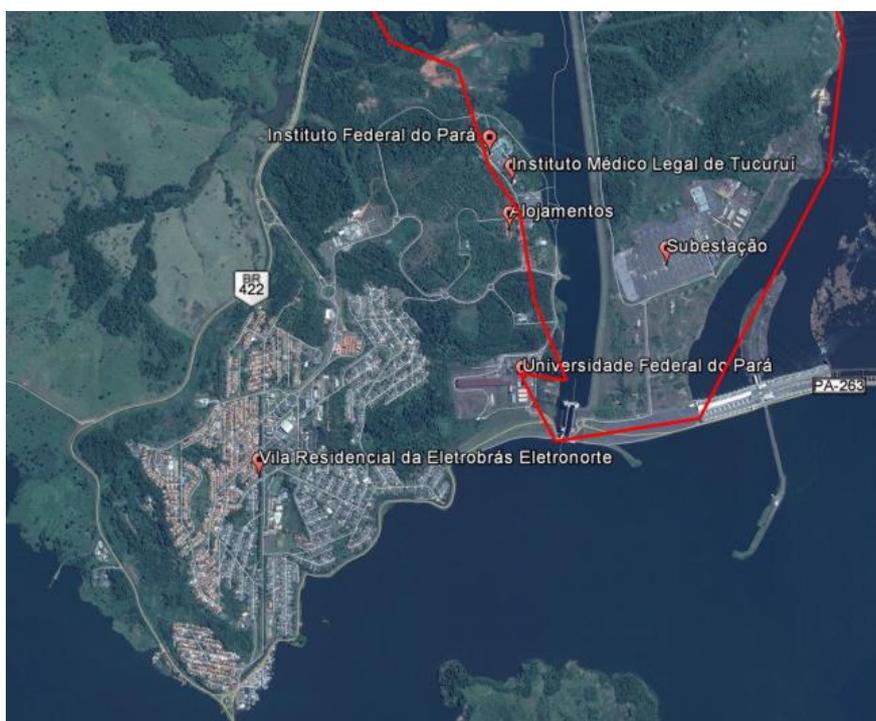
Para ilustrar a região à jusante da barragem estudo de caso, cita-se a pesquisa de Santos (2017) que realizou uma simulação hidrodinâmica de ruptura da barragem principal de Tucuruí, elaborando a mancha de inundação contendo as indicações dos principais locais afetados (Figura 15 e Figura 16), sendo estes: estruturas da Eclusa 2; bairros residenciais, centro comercial, importantes equipamentos urbanos (praças, escolas, estádio municipal, órgãos públicos da esfera municipal, estadual e federal e etc.) na zona urbana de Tucuruí; instituições de ensino superior (Universidade Federal do Pará e Instituto Federal do Pará) e o Instituto Médico Legal de Tucuruí (IML), localizados na Vila residencial da Eletrobrás Eletronorte; regiões turísticas (praias nas margens do rio Tocantins) e a rodovia BR- 422 (Transcametá).

Figura 15 - Detalhe de áreas inundadas no centro da cidade de Tucuruí, em um cenário de ruptura.



Fonte: Santos (2017).

Figura 16 - Detalhe de áreas inundadas na Vila Residencial da Eletrobrás Eletronorte, em um cenário de ruptura.



Fonte: Santos (2017).

Na análise da probabilidade de ocorrência, atribuiu-se índice (2), que representa uma probabilidade remota de ocorrência, uma vez que conforme análise dos relatórios de

inspeção o sistema de controle de drenagem e de percolação da barragem é eficaz, no qual os dados de séries históricas indicam que as medidas de poropressão encontram-se dentro dos limites de controle.

Com relação ao índice de detecção, o valor atribuído foi (6), o que implica em baixa detecção de falhas. Os relatórios de avaliação das instrumentações registraram que dos 14 medidores de vazão instalados na estrutura do barramento de terra, apenas 06 apresentaram leituras recentes (última leitura em dezembro de 2020), o que pode comprometer o processo de monitoramento e avaliação das condições de estabilidade da barragem. A instrumentação de barragens é de grande importância, pois permite detectar pontos na barragem onde existem níveis críticos de segurança estrutural e operacional (SILVA, 2016).

Analisando o cenário de modo de falha “erosão interna causada por rocha fraturada com percolação excessiva e carreamento de materiais na barragem de terra”, atribuiu-se o maior índice de severidade (10) pelos mesmos motivos explanados anteriormente.

Considerou-se para a ocorrência desta falha um índice igual a (1), ou seja ocorrência improvável, devido as seguintes condições: na fase de projeto da barragem, conforme o Relatório de Avaliação da Barragem de Terra e Enrrocamento – PSB – UHE Tucuruí (2021) houve a identificação de uma condição desfavorável de fundação, decorrente do elevado grau de fraturas na rocha (barragem de terra da margem direita), que, no entanto, foi sanado por meio de sucessivos tratamentos; quanto a condição de percolação excessiva, os resultados das análises de instrumentação da barragem de terra verificados no mesmo Relatório, indicaram eficiência no sistema de controle de drenagem e de percolação, uma vez que as medidas de poropressão encontram-se conforme o esperado.

Para variável detecção, o índice atribuído foi (6) que significa uma detecção baixa. No Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021) verificou-se que dentre os 14 medidores de vazão instalados na estrutura do barramento de terra, apenas 06 apresentaram leituras recentes (última leitura em dezembro de 2020). Além disso, do total de piezômetros de Casagrande (283 piezômetros), 64 piezômetros não possuem leitura ou não têm sido lidos recentemente. Dentre os 93 piezômetros pneumáticos instalados, apenas 43 tem leituras e aproximadamente 30% (13) tem sido lido recentemente.

Essa é uma situação que pode comprometer a avaliação da estabilidade e da segurança da barragem. Silva *et al.* (2021), alerta que um sistema de monitoração com base em dados de instrumentos confiáveis auxilia na prevenção de possíveis acidentes e incidentes, pois os dados obtidos podem revelar uma condição crítica possível ou permitir avaliar se uma determinada condição requer medidas corretivas ou não.

Analisando o cenário de modo de falha “percolação excessiva com presença de eflorescência na barragem de concreto causada por ineficiência do sistema de drenagem”, a severidade atribuída foi de nível médio, com índice 5, entendendo-se que se trata de uma falha com progressão mais lenta, comparada com uma erosão interna, por exemplo, e pode ser controlada com mais eficiência, sem levar à uma ruptura iminente do barramento.

Para a definição da ocorrência, o índice atribuído foi (2), ou seja, ocorrência remota, uma vez que os resultados das análises de instrumentação dos medidores de vazão ativos apontadas no Relatório de Avaliação da Instrumentação - Revisão periódica (PSB – UHE Tucuruí, 2021), indicaram decréscimo dos valores das vazões ao longo do tempo, o que acompanhou a tendência do histórico das vazões das drenagens (drenos).

Contudo, não se pode realizar uma análise isolada, sendo necessário verificar as leituras dos piezômetros, com objetivo de confrontar os valores da subpressão da estrutura com os dados das vazões. No caso da UHE Tucuruí, esta análise ficaria prejudicada, visto que no relatório mencionado, apenas 20% dos piezômetros (dos 81 piezômetros de contato instalados) apresentam registros recentes no sistema GESTIN, entre 2018 e 2020.

A detecção para o modo de falha em análise foi considerada baixa, sendo atribuído índice (6), visto que as leituras dos medidores de vazão localizados no túnel de drenagem têm sido realizadas em período maiores ao definido no programa de monitoramento do empreendedor (período previsto quinzenal, período realizado trimestral). Ainda, o último dado registrado foi de aproximadamente oito meses após a última leitura dos instrumentos de auscultação.

Com relação aos demais medidores, não foram levantados dados desde abril de 2003, exceto o instrumento TUCMVZ- 035-1 (MV35), localizado no Túnel de Drenagem, o qual teve como última leitura o mês de dezembro de 2015. Ressalta-se que no caso das leituras dos drenos instalados nas estruturas de concreto, ainda não foram definidos níveis de controle (níveis de alerta e atenção), o que é um ponto de atenção, pois a ausência destes parâmetros pode comprometer as análises das vazões de drenagem interna, e consequentemente o nível de detecção de situação de emergência.

De forma geral, avaliando o preenchimento da tabela FMEA para a barragem estudo de caso, verificou-se que o índice de detecção, para a maioria dos modos de falha simulados, resultou em níveis baixos, indicando um ponto de atenção no aspecto monitoramento do empreendimento.

Analisando a dinâmica da metodologia FMEA, recomenda-se a realização de inspeções *in loco* para confirmação de eventuais informações consultadas ao longo do preenchimento da tabela, as quais podem não refletir assertivamente a realidade do empreendimento, o que pode levar a pontuações de índices incoerentes. Ainda, a metodologia FMEA é um registro daquela condição e deve ser sempre revisada e atualizada, visando um processo de melhoria contínua (VIANNA, 2015).

Considera-se por fim, que a metodologia é de fácil aplicação, caracterizando-se por ser uma análise, conforme Fonseca (2018), iterativa, descritiva e qualitativa que promove, com base na disponibilidade de conhecimento e informação, a sistemática e raciocínio lógico para a compreensão das fontes de risco e a justificativa para as decisões relativas à segurança. Sendo importante e necessária a consulta de toda a documentação técnica referente ao empreendimento para que os índices sejam definidos com maior autenticidade.

Ressalta-se que a documentação técnica necessária para a análise FMEA é a mesma verificada para compor o PSB da barragem, exigida pela Lei nº. 14.066/2020 (dados gerais e características do empreendimento, relatórios de inspeção regular, inspeção especial e revisão periódica e etc.), o que facilita a utilização do método.

4.2 Análise da gestão de segurança de barragem de Tucuruí e proposta de integração da metodologia FMEA

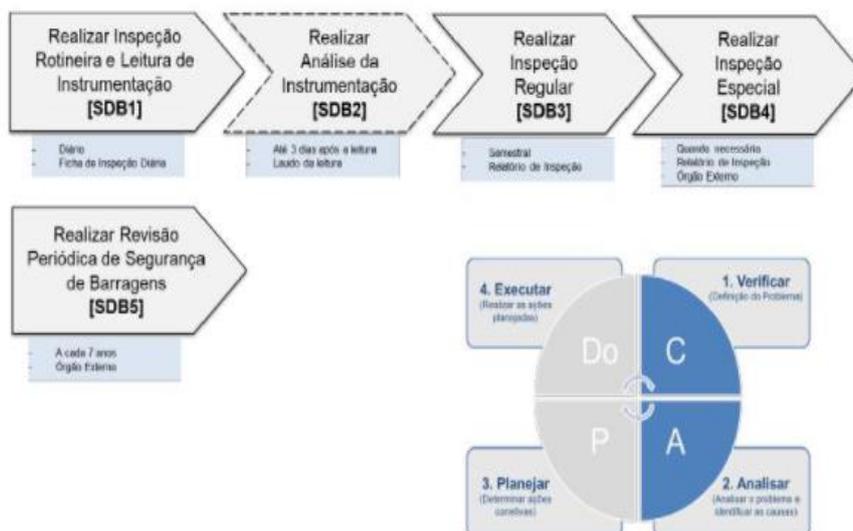
4.2.1 Análise do Processo de Gestão de segurança da Barragem estudo de Caso.

- Objetivo do procedimento;
- Área de aplicação;
- Referencias;
- Conceituação (terminologia);
- Descrição sistemática do procedimento de gestão da segurança;
- Responsabilidade;
- Penalidade;

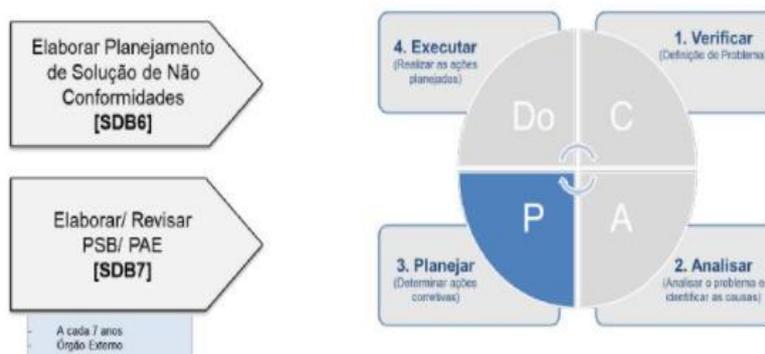
- Disposições gerais;
- Registros;
 - Cronograma Anual de ISR
 - Relatório de ISR – Relatório de ISE
 - Relatório ou Parecer Técnico de Análise de Instrumentação
 - Plano de Providências
 - Plano de Segurança de Barragem - PSB
 - Plano de Ação de Emergência - PAE
 - Relatório da RPS
 - Formulário de Segurança de Barragem- FSB
 - Anotação de Responsabilidade Técnica- ART
 - Relatório Anual Sobre Atividades Afetas a Segurança de Barragens - RASB
 - Relatório Extraordinário sobre atividades afetas a Segurança de Barragens - RESB
- Anexos – contêm os fluxos dos macroprocessos de segurança de barragem, compreendendo os processos de verificação e análises, de planejamento e de execução (Figura 17).

Figura 17 - Macroprocessos de segurança de barragem adotado pelo empreendedor.

Processos de Verificação e Análise



Processos de Planejamento



Processos de Execução



Fonte: Eletronorte (2020) apud Gouveia *et. al* (2022).

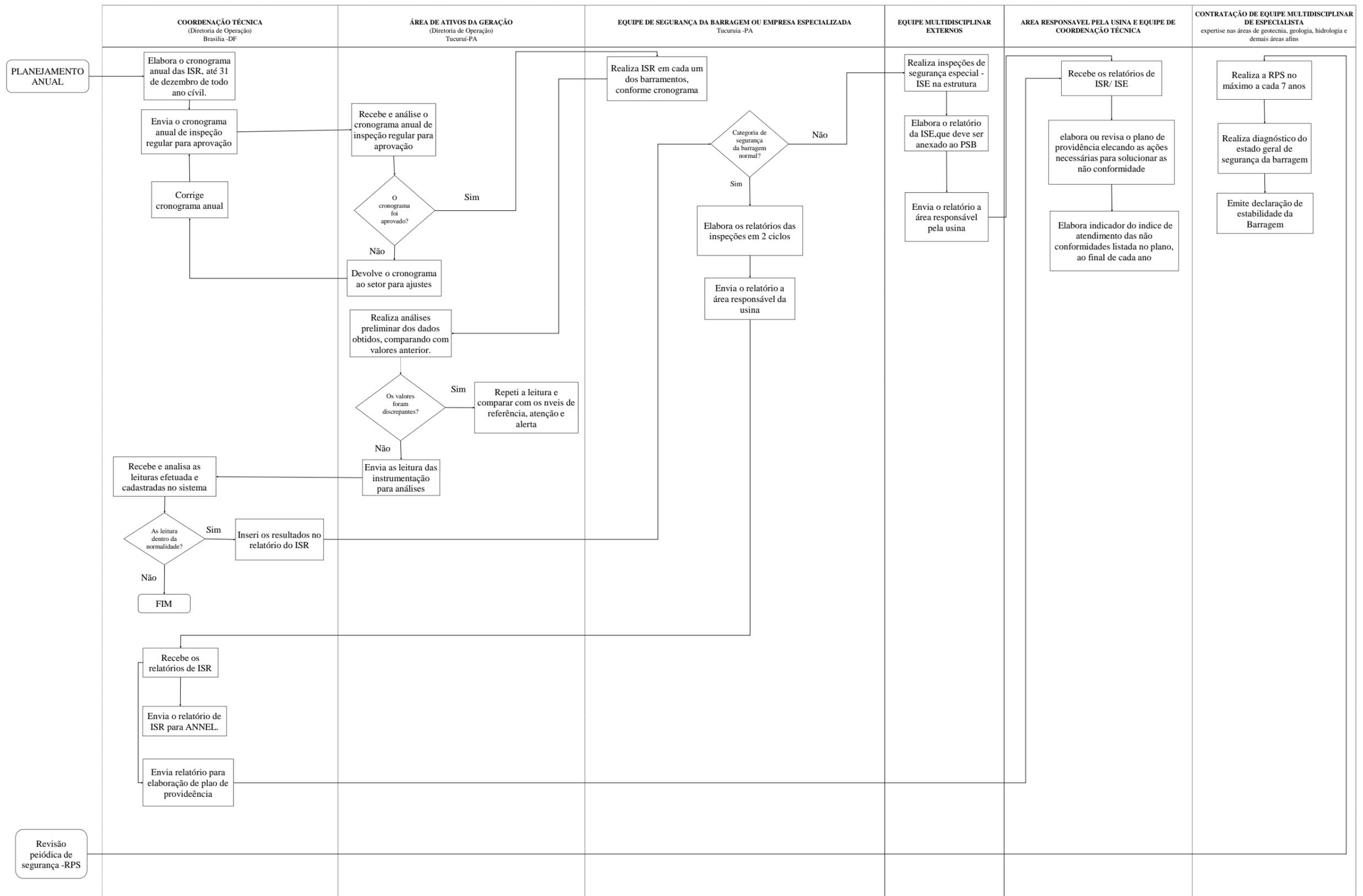
Verificou-se que os procedimentos descritos na normativa, refletem basicamente a aplicação dos instrumentos definidos pela Lei Federal nº. 14.066/2020 e a Resolução ANEEL nº 696/2015.

Analisando os fluxogramas da Figura 17, os Processos de verificação e análise compreendem todas as inspeções exigidas pela legislação, respeitando os prazos específicos: as inspeções rotineiras e leituras dos instrumentos de auscultação (diariamente); as inspeções regulares (semestral) e especial (quando necessário, havendo contratação de consultores externos); e a revisão periódica (a cada 7 anos, havendo a contratação de consultores externos).

Nos Processos de planejamento, elabora-se o planejamento das soluções e de não conformidade; e revisa-se o PSB/PAE (a cada 7 anos, havendo contratação de consultores externos). O fluxo segue para os Processos de execução, onde são executadas as demandas planejadas na etapa anterior.

A partir do entendimento do macroprocesso foi elaborado um fluxograma funcional do micro processo, específico para UHE-Tucuruí. A Figura 18 apresenta o fluxograma funcional do processo de gestão de segurança da UHE-Tucuruí, elaborado pela autora da pesquisa.

Figura 18 - Fluxograma funcional para o processo de gestão de segurança da UHE Tucuruí, elaborado pela autora.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

O fluxograma elaborado para a UHE-Tucuruí (Figura 18), conforme informações coletadas nos Laudos periciais e no documento geral do Processo de Gestão do empreendedor apresenta como ponto de partida, a etapa de Planejamento anual da gestão de segurança, que contempla a elaboração do cronograma das ISR, por parte da coordenação técnica que fica lotada na Sede, em Brasília-DF. Este cronograma segue para aprovação pela área de ativos da geração.

Com o cronograma aprovado, a Equipe de segurança da barragem realiza as inspeções regulares de rotina, avaliando os dados de instrumentação (os quais são comparados com os valores anteriores, analisando convergências ou discrepâncias). Com os valores de leitura em conformidades, a coordenação técnica recebe, analisa as leituras e cadastra no sistema interno da empresa, o GESTIN, encaminhando as análises para a Equipe de segurança da barragem.

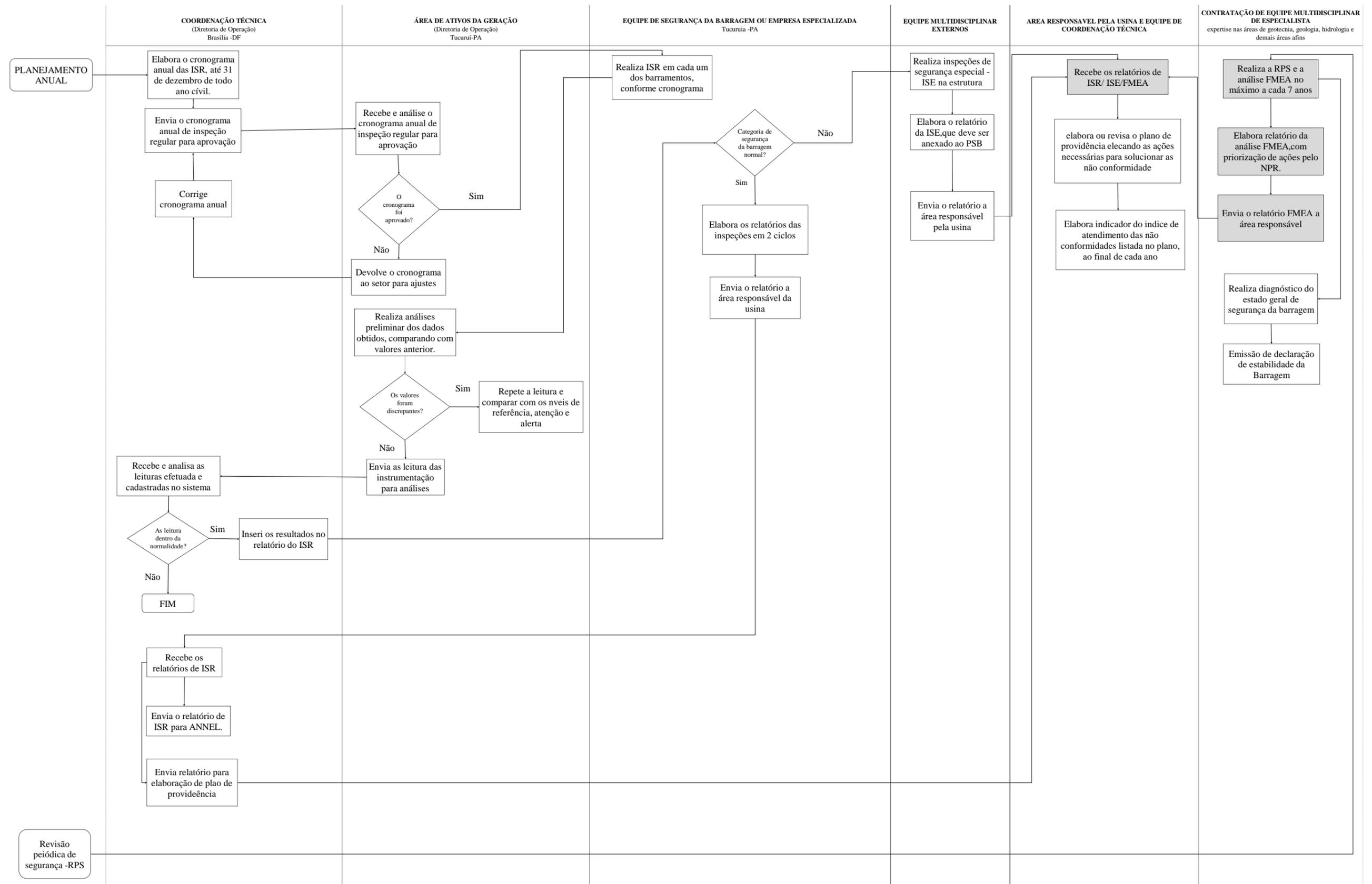
Com dos dados de instrumentação e das ISR, a Equipe local de segurança, elabora o relatório de ISR e encaminha a área responsável pela usina e a Equipe de coordenação técnica elabora ou revisa o Plano de providência (documento que contém as definições das ações necessárias para solucionar as não conformidades).

No caso de necessidade de realização de inspeção especial ISE, o fluxo adotado é o mesmo supracitado, porém a inspeção é realizada por uma equipe multidisciplinar externa à empresa.

4.2.2 Proposta de integração da metodologia FMEA no processo de gestão de segurança da Barragem estudo de caso

Após elaboração do fluxograma da UHE-Tucuruí foi possível visualizar todas as etapas e processos adotados pela empresa e visando considerar a análise FMEA de uma forma otimizada, realizou-se a integração desta metodologia na etapa existente “elaboração do RPS”, conforme fluxograma funcional, ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Proposta de fluxograma funcional para o processo de gestão de segurança da UHE Tucuruí, incluindo a metodologia FMEA.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

A proposta de integração da metodologia FMEA no processo de gestão de segurança da barragem resume-se, da seguinte forma:

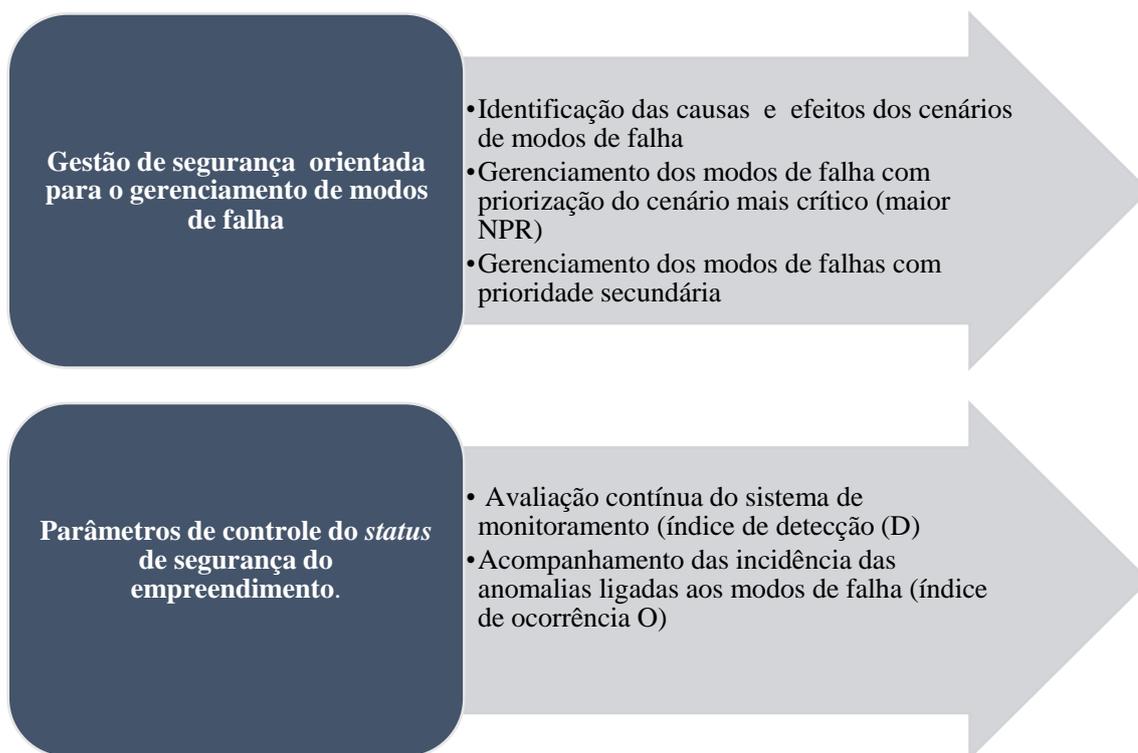
- 1) Uma Equipe multidisciplinar composta por especialistas (consultores externos) realiza a RPS e seus respectivos relatórios, conforme fluxo vigente. A mesma equipe ficaria responsável por realizar a análise FMEA e elaboração do relatório que deverá conter a priorização dos modos de falhas por meio do NPR;
- 2) O relatório de análise FMEA é encaminhado a área responsável pela usina, a qual já é incumbida de receber os relatórios de ISR/ISE;
- 3) Após recebimento do relatório de análise FMEA a área responsável pela usina, elabora o Plano de Providencia que deverá conter as ações necessárias para solucionar as possíveis não conformidades verificadas nos relatórios de ISE, ISR e o FMEA;
- 4) Por fim, a área responsável pela usina, elabora os indicadores de conformidade definidos no Plano de providência.

Em relação a periodicidade da análise FMEA para facilitar a integração do que já se pratica na empresa, propõem-se a mesma periodicidade definida para a etapa de Revisão periódica, que ocorre a cada 7 anos. Entretanto, caberia uma sugestão, no sentido de reduzir a periodicidade para pelo menos 5 anos, tendo em vista que 7 anos é o prazo máximo recomendado pelo órgão fiscalizador, conforme Resolução ANEEL nº. 696/2015. Julga-se que seria uma alteração a favor da segurança do empreendimento, visto que as estruturas estão inseridas em um contexto ambiental, vulneráveis às alterações climáticas.

Outra importante consideração na proposta de integração está relacionada à necessidade de prever procedimentos de atualização dos índices FMEA (ocorrência e detecção), tendo em vista que esses parâmetros estão intrinsecamente relacionados com as condições estruturais e também com as respostas do monitoramento da estrutura, sendo passíveis de alterações ao longo da vida útil da barragem. A metodologia FMEA é uma técnica que deve ser analisada em todos os instantes relevantes e significativos, ao longo do período de vida da obra (FONSECA, 2018).

Ao se considerar no processo de gestão da segurança de barragem a integração da metodologia FMEA verificou-se que é possível obter os seguintes benefícios, representados na Figura 20.

Figura 20 - Benefícios esperados com a integração da metodologia FMEA no processo de Gestão de Segurança de barragem.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Como um dos benefícios esperados com a integração da metodologia FMEA, tem-se a identificação das causas e efeitos dos cenários de modos de falha, bem como gerenciamento dos cenários de maior NPR e daqueles com prioridade secundária.

Vale ressaltar que, a definição dos cenários de acidentes já é considerada nos estudos de inundação que constam no Plano de Ação de Emergência – PAE do empreendimento, em atendimento ao Art.8º, inciso X, da Lei nº. 14.066/2020. No entanto, o empreendedor acaba se limitando à simulação de cenários de ruptura, com o restrito objetivo de elaboração do mapa de inundação considerando o pior cenário.

Com a integração do FMEA, o empreendedor passaria a controlar outros parâmetros relacionados à avaliação do *status* de segurança da barragem, no caso, os índices de ocorrência (O) e detecção (D), de forma dinâmica e integrada, diferente do que é verificado nos estudos de cenários de inundação (no documento do PAE), que trabalham os cenários de acidentes de forma estática, com o objetivo de elaboração do mapa de inundação para o pior cenário.

Ainda, a utilização da metodologia FMEA permitiria a avaliação contínua do sistema de monitoramento da barragem, uma vez que para a atribuição do índice detecção

(D), faz-se necessário a análise do histórico de dados da instrumentação, das informações das inspeções visuais e etc.

Outro ganho seria o acompanhamento contínuo das incidências de anomalias relacionadas com os modos de falha previstos na tabela FMEA, dado que para a atribuição do índice ocorrência (O) devem ser analisados os relatórios de inspeção regular e periódica, verificando as probabilidades de ocorrência daquela determinada anomalia.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

5.1.1 Aplicação da Metodologia FMEA na barragem estudo de caso

Dentre os modos de falha simulados para a UHE Tucuruí, o cenário com maior NPR foi o “erosão interna causada por colmatção de filtros e drenos na margem direita da barragem de terra” (NPR=120). Pode-se concluir que este resultado é coerente com a realidade do empreendimento, tendo em vista que cada índice foi aplicado e justificado com base na documentação técnica relativa ao *status* do empreendimento (relatórios de inspeção, relatórios de instrumentação, de revisão periódica e etc.).

O NPR de cada modo de falha (o qual é resultado da multiplicação dos índices S x O x D) trata-se de um indicador importante na metodologia FMEA, entretanto, é necessário, analisar cada índice de forma isolada para que haja uma interpretação mais crítica do NPR. Ou seja, é possível existir, por exemplo, um modo de falha com ocorrência remota, entretanto, com uma performance de detecção baixa, o que poderia elevar o valor do NPR, passando a ser um modo de falha com maior prioridade de risco.

Na maioria dos cenários considerados, o índice de detecção apresentou níveis baixos, indicando um ponto de alerta para o empreendedor no que se refere ao sistema de monitoramento da barragem, uma vez que os relatórios de inspeção e de instrumentação detectaram as seguintes situações: leituras realizadas em período maiores do que aqueles definidos no programa de monitoramento, instrumentos que já não são monitorados há mais de décadas e instrumentos que não apresentam níveis de controle definidos (níveis de atenção e alerta).

Por fim, destaca-se a facilidade de aplicação da metodologia FMEA, comparado com outros métodos disponíveis na literatura, pois o mesmo caracteriza-se por ser uma análise qualitativa, que se baseia em dados reais relativos às condições do empreendimento. Pondera-se, porém, que para que o preenchimento e a análise da tabela FMEA apresentem um resultado mais fidedigno, recomenda-se a participação de especialistas com expertise nas diversas áreas que compõem os sistemas estrutural, funcional e ambiental do empreendimento; geólogos, engenheiros geotécnicos, engenheiros hidráulicos e etc.

5.1.2 Análise da gestão de segurança de barragem do empreendedor e proposta de integração da metodologia FMEA.

O processo de gestão de segurança da barragem da UHE Tucuruí é norteado por uma normativa geral elaborada pelo empreendedor, que define os procedimentos para a implementação da PNSB, explicitando três macros fluxos: Processos de verificação e análise (que compreendem aos procedimentos de inspeção das estruturas), Processos de planejamento (onde elabora-se o planejamento das soluções e de não conformidade previstas na primeira etapa e revisa-se o PSB/PAE) e; Processos de execução (onde são executadas as demandas planejadas na etapa anterior).

Conforme verificado, a dinâmica do gerenciamento da gestão de segurança da usina, não considera uma normativa específica, que contenha o detalhamento dos fluxos e etapas do processo de gestão, e seus respectivos responsáveis pelas ações, sendo necessária a elaboração de um fluxograma funcional detalhado.

Somente após a elaboração do fluxograma detalhado do processo de gestão de segurança foi possível proceder à proposta da metodologia FMEA, haja vista a existência de uma etapa propícia para a integração desta análise. A etapa selecionada foi a “Elaboração de Revisão Periódica (RPS)”, a qual é realizada de forma periódica, sendo conduzida por consultores externos. A metodologia FMEA por sua vez, seria realizada acompanhando os mesmos critérios.

Quanto aos benefícios, é possível concluir que, a utilização da metodologia FMEA pode proporcionar ao empreendedor, em primeira análise, a identificação das causas e efeitos dos cenários de modos de falha, bem como gerenciamento dos cenários de maior NPR e daqueles com prioridade secundária.

Ainda, existem ganhos com a adoção da metodologia, uma vez que permite a obtenção de parâmetros de controle que podem auxiliar na avaliação do status de segurança da barragem, sendo estes, o índice de detecção (D), que possibilita avaliação contínua do sistema de monitoramento e; o índice de ocorrência (O), que possibilita o acompanhamento das incidências das anomalias relacionadas aos modos de falha.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o propósito de complementar os estudos apresentados na presente pesquisa, as seguintes sugestões para trabalhos futuros são sugeridas:

Realização de inspeções *in loco*, para validação das pontuações dos índices constantes na tabela FMEA, confrontando com os resultados obtidos nessa pesquisa;

Aplicação da análise FMEA trabalhando quantitativamente as probabilidades relacionadas aos índices ocorrência e detecção;

Aplicação da metodologia FMEA nas estruturas dos diques e eclusas de Tucuruí, avaliando seus efeitos ao barramento principal, montante e jusante da UHE Tucuruí.

Aplicação de outros métodos de gestão à barragem estudo de caso, tais como Árvore de Eventos (ETA), comparando os resultados entre as metodologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADIA, Manuel Rodrigo Urbano. **Desenvolvimento de uma base de conhecimento com regras FUZZY e produção visando monitoramento baseado em condição de uma usina hidrelétrica.** Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Distrito Federal. 2015. 232p.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. Brasil. **Curso de Segurança de Barragens.**

2013. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/11/Unidade_1-modulo2.pdf>. acesso em: 02 set. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS DO BRASIL - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno.** Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Guia de orientação e formulários para inspeções de segurança de barragem.** Brasília: ANA, 2016. 217 p., il. (Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, 2).

ASDSO, Association of State Dam Safety Officials. **Dam failures and incidentes.** Disponível em: <<https://damsafety.org/dam-failures>>. acesso em: 23 mai. 2021.

AGUIAR, D.P.O. **Contribuição ao Estudo do Índice de Segurança de Barragens –** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2014.

BAIMA, Sandra Keila de Oliveira: **Uma Metodologia multicritério construtivista para a avaliação da vulnerabilidade de barragens e regiões a jusante.** Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. 35, 37, 39.

BAPTISTA, Maria de Lurdes Pimenta. **Abordagens de risco em barragens de aterro.** Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009.

BOCCHIOLA D, Rosso R (2014) **Safety of Italian dams in the face of flood hazard.** Adv. Water Resour 71:23–31.

BRASIL. Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Lei Nº 12.334. Brasília, DF: DOU de 21 de setembro de 10. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos [...].** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BIEDERMANN, R: **Safety concept for dams: development of the swiss concept since 1980.** Berne, Switzerland, v. 21, 1997. 26.

CALDEIRA, L. M. M. S. **Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro.** 248f. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico. 2008.

CANADIAN DAM ASSOCIATION. **Technical Bulletin 8: Geotechnical Considerations for Dam Safety**. 2007.

COLLE, G.A. **Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. 2008.104p.

COLLISCHONN, W. **Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). 1997. 192 f. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

DE LIMA, J. Estudo de Caso: **Diagnóstico e Ações de Recuperação Estrutural da Barragem de Jucazinho/PE**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 6, n. 4, p. 46-53, 9 set. 2021.

DIDELES, B. T. M.; MALVEIRA V. T. C. **Application of risk analysis methods on tailings dams**. Soils and Rocks, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 97-117, jan-abr. 2013.

DOS SANTOS, Verlei Oliveira. **Segurança de barragens de concreto: auscultação por instrumentação da barragem da UHE Dona Francisca – RS**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. 295 f.

ESPÓSITO, T. E.; CALDEIRA, L. **Gestão da segurança de uma pilha drenada de rejeitos de minério de ferro: a aplicação das análises FMEA/FMECA**. Anais do COBRAMSEG 2010. Gramado, Brasil. 8 p.,2010.

ESPÓSITO, T.; PALMIER L. R. **Safety for the Gangorra and Itaúna dams against internal erosion**. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 1-19, dez. 2017.

FELL, R.; WAN, C. F.; CYGANIEWICZ, J.; FOSTER, M. **Time for development of internal erosion and Piping in embankment dams**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 129, p. 307-314. 2003.

FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY). **Federal guidelines for dam safety risk management**. United States: 2015.

FERDOS, F. **Internal erosion phenomena in embankment dams**. Doctoral Thesis - Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology. 2016.

FUSARO, T.C. **Segurança de Barragens**. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Complementariedade entre o monitoramento e análises de risco na gestão da segurança de barragens. 2015.

FONSECA, Marcus Nicholas Esquivel. **Análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos: um evento de mineração no Brasil**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial,

Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Salvador, 2018.

FREITAS, Mariana Duarte **Nogueira Análise da integridade física de barragens de terra a partir de métodos sísmicos** Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2020.

FUSARO, T. C. F et al. **Curso: Segurança de Barragens, Módulo III: Gestão e Desempenho de Barragens, Análise e Gestão de Riscos**. Material produzido no âmbito do Convênio nº001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas – ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI. 2011.

GALO, D. B. **Análise de Riscos em Barragens de Rejeitos com Uso de Técnicas Semiprobabilísticas de Estabilidade de Taludes: Um Estudo de Caso** - Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia ambiental urbana) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador.

GOUVEIA; F.P; SANTOS, M.B; NETO, A.F.L. **Relatório Parcial de Perícia de Segurança de Barragem – UHE Tucuruí (Laudo Pericial MPF-Tucuruí)**. Tucuruí, 2018. Disponível em: https://ascom.ufpa.br/links/editais/Relatorio_final_UFPA_pericia_seguranca_barragem_UHE_Tucuruí-PA_2018.pdf. Acesso em: 03 de dezembro de 2021.

GOUVEIA; F.P; SANTOS, M.B; NETO, A.F.L. **Relatório Pericial de Segurança de Barragem – UHE Tucuruí (Laudo Pericial MPF-Tucuruí)**. Tucuruí, 2022.

HARTFORD, D. N. D.; BAECHER G. B. **Risk and uncertainty in dam safety – CEA Technologies Dam Safety Interest Group**. ISBN 0 7277 3270 6, Londres, Inglaterra: Thomas Telford Publishing, 2004. 391p.

ICOLD (INTERNACIONAL COMISSION ON LARGE DAMS). **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment**. Bulletin 120. 2013.

ICOLD (INTERNACIONAL COMISSION ON LARGE DAMS). **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance**. Bulletin 164. 2016.

KEMPKA, M.; **Estimativa da Distribuição Longitudinal das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida**. 2014. 120f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 2014.

LEITE, S.R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy** - Dissertação (Mestrado - Mestrado Profissional em Computação Aplicada) -- Universidade de Brasília, Brasília, 2019. 222 p.

LIMA FILHO, J. B. **Estudo de caso: Diagnóstico e ações de recuperação estrutural da Barragem de Jucazinho/PE**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.6, n. 3, p. 46-53, 2021.

MARTINI, B. D. **Sistema WEB para gestão de segurança de barragens**. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 2018. 95 p.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de Geotecnia**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MELO, A. V. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT**. Dissertação. Mestrado em Geotécnica. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014. 244 p.

MENESCAL, Rogério de Abreu: **Gestão de segurança de barragens no Brasil: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo**. 2009. 727p. Tese de Doutorado, Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. 6, 35

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Preenchimento da Ficha de Inspeção de Barragem**. Brasília: MIN, 2010. 117 p.

Moraes B.C.; Sodré G.; Souza E.B.; Ribeiro J. B. M.; Meira Filho, L. G.; Ferreira D.B. da S.; de Oliveira J.V. **Climatologia da precipitação na Amazônia. Revista Brasileira de Geografia Física** V. 08 N. 05. 2015.

OLIVEIRA, J.B.V.R. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens**. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 149 p.,2010.

OLIVEIRA, T. V.; NOGUEIRA, A. A. **Analysis of development of carbonation and surface wear of the concrete: a case study in Ship Lock 1 of the transposition system of Tucuruí dam**. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 1:17, 2016.

PAIVA, R.L.; PINHEIRO, V. K. **Aplicação de metodologia FMEA e FMECA para análise de risco em barragens**. Monografia de Projeto Final – Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. xiv, 60 p. 2019.

PEREIRA, L.F. **Segurança de barragens no Brasil: um breve comparativo com a legislação internacional e análise da influência da cobertura do solo de APPs sobre manchas de inundação: estudo de caso da PCH Pedra Furada, Ribeirão – PE**. Dissertação (mestrado em Geotecnia) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia – FaEng – Campus João Monlevade, João Monlevade 2015.64 f.

PERINI, D. S. **Estudos dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PIMENTA FILHO, M. A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios.** Dissertação (Mestrado e Transportes) –Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 143f.

PIMENTA, M. L. B. **Abordagens de riscos em barragens de aterro.** 2009. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

RIBAS J.R., SOHLER F.A.S., MARQUES R.A. **Identificação e análise dos riscos de construção em hidrelétricas: uma abordagem multicritério na AHE Simplício.** IN: XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Porto de Galinhas: CBDB; 2013.

SAKURADA, E. Y. **As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos.** 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SAMPAIO, J. A. L. The deficiencies of the emergency action planning for dams in Brazil. **Revista Brasileira de Direito.** Vol. 12 (2): 7-17, 2016.

SANTOS, M.B. **Análise Computacional do Rompimento Hipotético da Barragem de Tucuruí-PA com o Auxílio do Software Mike Flood.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental), Universidade Federal do Pará, 2017.

SANTOS, J. K. R. de S. **Aplicabilidade da FMEA no processo de elaboração de serviço em nuvem: o caso de uma pequena empresa de alta tecnologia.** Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Pernambuco. CCSA, 2018.

SANTOS, R. N. C. DOS; CALDEIRA, L. M. M. S.; SERRA, J. P. B. **FMEA of a tailings dam.** Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, v. 6, n. 2, p. 89-104, 2012.

SILVA FILHO, D. **Dimensionamento de usinas hidroelétricas através de técnicas de otimização evolutiva.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SILVA, D.S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Geotecnia, 2016.

SILVA, M. DE A. **Quantificação da incerteza do potencial de faturamento no tempo de barragens de concreto a gravidade.** Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. xiv, 60 p. 2019.

SILVA, Tiago Barbosa da. **Análise de fluxo, estabilidade e tensão-deformação de uma barragem no Agreste de Pernambuco.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil e Ambiental. Caruaru, 2020.

SOUSA, D. J. S. C. (2013). **Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico.** Dissertação (Mestrado), Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Especialização em Geotecnia, Porto, Portugal.

SOUZA, M. M. **Estudo para projeto geotécnico da barragem de Alto Irani**. 2013. 129f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

VALERIUS, M. B. (2014). **Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 245/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

VIANNA, L.F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão**- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2015. 118 f.

VIDAL, E. C. **Avaliação de Patologias em Conjuntos Habitacionais de Bauru, com enfoque em anomalias de Fundações e Coberturas**.2012. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração de Geotecnia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

YOKOZAWA, Stéphanie Yumi. **Avaliação dos métodos probabilísticos aplicados na análise de risco devido à instabilidade de barragens**. 2019. xvi, 111 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.