



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

ANDREIA ARRUDA SANTOS

**APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE RISCO FMEA PARA ANÁLISES DOS
MODOS DE FALHA DE UMA BARRAGEM DE TERRA: ESTUDO DE CASO
PROJETO FORMOSO DO ARAGUAIA-TO**

TUCURUÍ – PA
2023

ANDREIA ARRUDA SANTOS

**APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE RISCO FMEA PARA ANÁLISES DOS
MODOS DE FALHA DE UMA BARRAGEM DE TERRA: ESTUDO DE CASO
PROJETO FORMOSO DO ARAGUAIA-TO**

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

ANDREIA ARRUDA SANTOS

**APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE RISCO FMEA PARA ANÁLISES DOS
MODOS DE FALHA DE UMA BARRAGEM DE TERRA: ESTUDO DE CASO
PROJETO FORMOSO DO ARAGUAIA-TO**

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:

Fernanda Pereira Gouveia, Dr.^a. em Estruturas e Construção Civil (CAMTUC/UFPA)
(Orientadora)

Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto (UFPA /NDAE/PEBGA)
(Examinador interno)

Prof. Dr. Aline Maria Meiguins de Lima (UFPA/PPGGRD)
(Examinador externo)

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)

A773a ARRUDA, ANDREIA.

APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE RISCO FMEA PARA ANÁLISES DOS MODOS DE FALHA DE UMA BARRAGEM DE TERRA: ESTUDO DE CASO PROJETO FORMOSO DO ARAGUAIA-TO / ANDREIA ARRUDA, ANDREIA ARRUDA SANTOS GOUVEIA . — 2023.

92 f. : il. color.

Orientador(a): Prof.^a Dra. Fernanda Pereira Gouveia
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2023.

1. Camtuc. 3. Universidade Federal do Para. I. Título.

CDD 620.86

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por até aqui ter chegado, aos meus pais, mesmo diante de pouco estudos, poucos recursos financeiros me criaram com uma convicção que eu nunca deveria parar de estudar. Pois assim seria a única forma que eu poderia chegar a lugares que eles nunca tiveram a oportunidade de irem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades, e por ter me dado forças para vencer as barreiras na finalização desse mestrado, conferindo-me saúde e inspiração intelectual para a conclusão deste estudo.

À Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí e ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia pela oportunidade. De uma forma especial agradeço a minha orientadora Dr^a Fernanda Pereira Gouveia, pela paciência, dedicação, pelo compartilhamento de expertises, apoio e por ter acreditado em mim no desenvolvimento dessa pesquisa,

Ao corpo docente do PEBGA, agradeço a todos que, diretamente me ofereceram apoio, incentivo e acolhimento. À turma de Mestrado do PEBGA-2019, pelo companheirismo, apoio, troca de informações e conhecimentos na caminhada para a conclusão deste Mestrado, em especial a minha amiga Regiana Carvalho, que me deu apoio, me abraçou, ouvia minhas angústias, inseguranças e compartilhou momentos felizes, estando sempre juntas nessa caminhada, a você deixo essa singela palavra referenciada na bíblia sagrada em Provérbios 17:17 “O amigo ama em todo o tempo; e para a angústia nasce o irmão.”

Aos amigos Adriana Higino, Evandro e Deisianne, vocês foram muito especiais, me abraçaram e me acolheram sempre que precisei nas minhas viagens do estado do Tocantins ao estado do Pará, a vocês obrigada pela compreensão e todo carinho, vocês foram essenciais para o fortalecimento das relações e conquistas.

Ao professor da Universidade Federal do Tocantins Marcus Vinicius, meu muito obrigada por todo apoio para contato com o Distrito de Irrigação de Formoso do Araguaia.

Ao Distrito de Irrigação de Formoso do Araguaia (DIRF) pela autorização para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Às instituições públicas como o Naturatins pelo apoio para a concepção deste estudo, possibilitando informações valiosas para a consolidação desse estudo.

RESUMO

O Projeto do Rio Formoso, localizado no estado de Tocantins, trata-se do maior projeto de irrigação da América Latina e suas estruturas, compostas por três barragens têm preocupado o órgão fiscalizador devido ao comprometimento do estado de conservação destas estruturas, com evidências de patologias e anomalias em vários pontos. O governo do estado que é o empreendedor das barragens, em 2012 chegou a contratar projetos de revitalização para o empreendimento, porém até os dias atuais as obras não foram executadas, o que torna mais vulnerável a segurança das barragens. O objetivo geral da pesquisa é analisar a situação de risco da barragem Calumbi II, que compõe o Projeto de irrigação Rio Formoso, por meio da aplicação da ferramenta de riscos FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), identificando os modos de falha mais prováveis e de maior potencial. Demais objetivos seriam: a descrição das intervenções recomendadas pela consultoria contratada pelo empreendedor e a análise crítica da ausência da gestão de segurança da barragem. A metodologia da pesquisa foi baseada em quatro etapas: a) caracterização do Projeto Rio Formoso e da barragem estudo de caso; b) levantamento das anomalias e patologias verificadas na barragem; c) aplicação da ferramenta de riscos FMEA e d) análise crítica da gestão de segurança da barragem estudo de caso. Os resultados indicaram que a barragem Calumbi II apresenta várias patologias e anomalias (presença de árvores de grande porte e vegetação arbustiva na crista, fendas de retração, erosões e surgências de água nos taludes), e que apesar de a barragem estar operando nos níveis mínimos, é possível a ocorrência de falhas. A ferramenta FMEA demonstrou que o modo de falha de maior prioridade seria instabilidade de talude de montante (NPR=336), em segundo lugar, falha por *piping* (NPR=320) e em terceiro, porém mais remoto, falha por galgamento da barragem (NPR=144). Pelo aspecto da análise da gestão de segurança da Barragem Calumbi II concluiu-se a vulnerabilidade do empreendimento, uma vez que a barragem não possui PSB e nem PAE, não apresenta instrumentação instalada, não há existência de profissional responsável pela segurança, não dispõe de estudos de avaliações de riscos, não recebe as inspeções regulares periódicas, por parte do órgão fiscalizador.

Palavras-chave: FMEA; Gestão de riscos; segurança de barragem; Projeto Rio Formoso.

ABSTRACT

The Formoso River Project, located in the state of Tocantins, is the largest irrigation project in Latin America and its structures, made up of three dams, have worried the supervisory body due to the compromised state of conservation of these structures, with evidence of pathologies and anomalies at various points. The state government, which is the developer of the dams, in 2012 even contracted revitalization projects for the enterprise, but to date the works have not been carried out, which makes the safety of the dams more vulnerable. The general objective of the research is to analyze the risk situation of the Calumbi II dam, which makes up the Rio Formoso irrigation project, through the application of the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) risk tool, identifying the most likely failure modes and with greater potential. Other objectives would be: the description of the interventions recommended by the consultancy hired by the entrepreneur and the critical analysis of the lack of dam safety management. The research methodology was based on four stages: a) characterization of the Rio Formoso Project and the case study dam; b) survey of anomalies and pathologies found in the dam; c) application of the FMEA risk tool and d) critical analysis of the dam's safety management case study. The results indicated that the Calumbi II dam presents several pathologies and anomalies (presence of large trees and shrub vegetation on the crest, retraction cracks, erosion and water surges on the slopes), and that despite the dam operating at minimum levels, failures may occur. The FMEA tool demonstrated that the highest priority failure mode would be upstream slope instability (NPR=336), secondly, failure due to piping (NPR=320) and thirdly, but more remote, failure due to dam overtopping (NPR=144). From the aspect of the analysis of the safety management of the Calumbi II Dam, the vulnerability of the enterprise was concluded, since the dam does not have a PSB or PAE, it does not have installed instrumentation, there is no professional responsible for safety, it does not have studies of risk assessments, does not receive regular periodic inspections by the supervisory body.

Keywords: FMEA; Risk management; dam safety; Rio Formoso Project.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Atividades Da Gestão De Riscos.....	25
Figura 2 - Procedimento HAZOP.....	29
Figura 3 - Modelo de diagrama de uma árvore de eventos.	31
Figura 4 - Processo de formação de Piping por erosão regressiva.	39
Figura 5 - Processo de formação de <i>Piping</i> por meio de alargamento das paredes.	39
Figura 6 - Processo de formação de <i>Piping</i> por meio de carreamento de finos.	40
Figura 7 - Típica evolução de falha de uma barragem por galgamento ou “overtopping”.	41
Figura 8 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	43
Figura 9 – Localização da bacia e sub-bacias do Projeto.	50
Figura 10 – Mapa com indicação das três barragens.....	51
Figura 11 - Vista geral da barragem e reservatório da Calumbi II.	53
Figura 12 – Projeto da Barragem Calumbi II.	54
Figura 13 – Vista da tomada d’água e adutora Calumbi II.....	55
Figura 14 - Presença de fenda na crista da barragem, provavelmente oriunda de uma trinca no aterro.....	60
Figura 15 – a) Erosão no talude- Estaca 235 (à esquerda); b) estaca 295 (à direita).	60
Figura 16- Escorregamento expressivo (desbarrancamento) no talude de montante.	61
Figura 17 – a) Escorregamento ao lado da estrutura de vertedouro (à esquerda) e Erosão no talude de jusante (à direita).....	61
Figura 18 – a) Presença de vegetação generalizada em toda extensão da Barragem (à esquerda); b) árvore de grande porte entre a estrutura de concreto da tomada d’água (à direita).	62
Figura 19 – a) Presença de árvores no talude à jusante (à esquerda); b) presença de vegetação na crista da barragem (à direita).	63
Figura 20 - a) Comporta inoperante e soterrada (à esquerda) e comporta com presença de oxidação (à direita).	64
Figura 21 – a) Vista do Vertedouro com comportas soterradas e com patologias no concreto (à esquerda) e Registros manuais das comportas danificados (à direita).	65
Figura 22 – a) Tubo com revestimento deteriorado (à esquerda) e b) Tubulações da Tomada de Água com defeito de concretagem.....	65
Figura 23 - Piezômetros instalados em 2021.....	66
Figura 24 – Esquema de rip rap executado em talude de montante.	68

Figura 25 - Mecanismo de ruptura por piping.	69
Figura 26 – Esquema de uma barragem de terra com filtros e drenos.	70
Figura 27 – Tubulações da tomada d água cortadas para descarregamento de cheias (extravasores).....	71
Quadro 1 - Quadro de pontuação das Características Técnicas de barragens de acumulação de água, conforme Portaria NATURANTIS n. 483/2017.....	20
Quadro 2 - Quadro de pontuação para o Estado de conservação de barragens de acumulação de água, conforme Portaria NATURANTIS n. 483/2017.	21
Quadro 3 - Quadro de pontuação para a classificação do DPA, conforme Resolução nº 143/2012 e Portaria n. 483/2017.	22
Quadro 4 – Lista de documentos consultados.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de risco para barragens de acumulação de água, conforme Resolução nº 143/2012 e Portaria n. 483/2017.	23
Tabela 2 - Abordagem de risco x abordagem de segurança	24
Tabela 3 - Descrição dos verificadores e seus índices.....	35
Tabela 4 - Descrição dos índices.	47
Tabela 5 - Modelo da Tabela FMEA utilizada na pesquisa.	49
Tabela 6 - Características principais da Barragem Calumbi II.....	52
Tabela 7- Características Hidrológicas da Barragem Calumbi II.....	56
Tabela 8 – Dados sismológicos de cidades do estado de Tocantins, coletados do centro de sismológico da UnB.	57
Tabela 9 – Tabela síntese obtida da aplicação do FMEA.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Água
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CRI	Categoria de Risco
DPA	Dano Potencial Associado
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
NATURATINS	Instituto Natureza do Tocantins
MPE	Ministério Público Estadual
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

;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 ARCABOUÇO NORMATIVO DE BARRAGENS DE ACÚMULO DE ÁGUA NO BRASIL	17
2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS E GERENCIAMENTO DE RISCOS	23
2.2.1 Identificação e análise de risco	25
2.2.2 Controle de Riscos	27
2.3 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DE GESTÃO DE RISCOS APLICÁVEIS EM BARRAGENS	28
2.3.1 Análise de Perigos e Operacionalidade (HAZOP - Hazard and Operability Analysis) ..	28
2.3.2 Diagramas de Localização, Causa e Indicadores das Falhas (LCI)	30
2.3.3 Análise por árvore de eventos (ETA – Event Tree Analysis)	30
2.3.4 Análise dos modos de rotura e seus efeitos (FMEA-Failure Modes and Effects Analysis)	32
2.3.5 Etapas para análise da criticalidade (FMECA-Failure Modes and Effects and Criticality Analysis)	35
2.3.6 Análise por árvores de Falhas (FTA- Fault Tree Analysis)	37
2.4 PRINCIPAIS MODOS DE FALHAS EM BARRAGENS DE TERRA	37
2.4.1 <i>Piping</i> / Erosão interna	38
2.4.2 Galgamento	40
2.4.3 Instabilidade de talude	41
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	43
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO RIO FORMOSO E DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO	43
3.1.1 Projeto Rio Formoso	43
3.1.2 Caracterização da barragem	43
3.2 LEVANTAMENTO DO HISTÓRICO DAS ANOMALIAS E PATOLOGIAS DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO	44

3.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA.....	47
3.3.1 Definição dos índices FMEA	47
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO	50
4.1.1 Projeto Rio Formoso.....	50
4.1.2 Caracterização da Barragem Calumbi II	52
4.2 LEVANTAMENTO DAS ANOMALIAS E PATOLOGIAS VERIFICADAS NA BARRAGEM	58
4.2.1 Fendas de retração no maciço.....	59
4.2.2 Erosões e escorregamentos no maciço	60
4.2.3 Irregularidade nos diques.....	62
4.2.4 Presença de vegetação arbustiva.....	62
4.2.5 Surgências de água no talude de jusante	63
4.2.6 Sistema de adução	63
4.2.7 Tubulação de descarga de tomada de água.....	65
4.2.8 Falhas na instrumentação.....	66
4.3 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E SUAS POSSÍVEIS CAUSAS E FORMAS DE MITIGAÇÃO	66
4.4 ANÁLISE CRÍTICA DA GESTÃO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO	72
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
5.1 CONCLUSÃO.....	75
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

De acordo Sohler e Caldeira (2016) as barragens são entre as mais importantes conquistas do homem, indo além de outros tipos de construções, tanto em volume e custo, como em importância social e em risco. Assim, elas exigem métodos mais avançados de construção e projetos.

Segundo Icold (2023) a maioria das barragens existente no mundo são de uso único, mas agora há um número crescente de barragens de uso múltiplo. Usando a publicação mais recente do Registro Mundial de Barragens, a irrigação é de longe o objetivo mais comum das barragens. Entre as barragens de uso único, 48% são para irrigação, 17% para hidrelétricas (produção de eletricidade), 13% para abastecimento de água, 10% para controle de enchentes, 5% para recreação e menos de 1% para navegação e piscicultura. Atualmente, mesmo as terras irrigadas cobrindo cerca de 277 milhões de hectares, ou seja, cerca de 18% das terras através do mundo, ainda são responsáveis por cerca de 40% da produção agrícola e empregam cerca de 30% da população espalhada pelas áreas rurais. Com o grande crescimento populacional esperado para as próximas décadas, a irrigação deve ser ampliada para aumentar a capacidade de produção de alimentos. Estima-se que 80% da produção adicional de alimentos até 2025 será de terras irrigadas. Mesmo com as medidas generalizadas de conservação de água por meio de melhorias na tecnologia de irrigação, será necessária a construção de mais projetos de reservatórios.

Atualmente, diante da compreensão de que riscos existem quando o tema são as barragens, e o que se percebe é uma tendência mundial para encontrar formas de classificar essas barragens e, dentro dessa classificação, avaliar o grau de riscos que cada uma delas oferece. As leis de inúmeros países vêm sendo reformadas e readequadas para que existam indicadores de como a análise de riscos deve ser conduzida visando aproximar-se ao máximo da identificação dos mesmos e, assim, permitindo traçar estratégias de melhoria e controle. Comumente, a análise de riscos apoia-se em regulamentos voltados à segurança de barragens, considera especificidades da barragem (altura, volume, mapa de inundação, etc.), porém, sem que existem padrões globalmente aplicáveis para essa finalidade (CALDEIRA e ESPÓSITO, 2010).

No Brasil a lei federal de segurança de Barragens existe desde o ano de 2010, denominada lei 12.334 e alterada no ano 2020, pela então lei federal nº 14066/2020.

A Lei federal no. 14066/2020 determina em seu Art. 8º que, os Planos de Segurança de Barragem (PSB) contenham a identificação e a avaliação dos riscos, com definição das

hipóteses e dos possíveis cenários de acidentes. Esta exigência passou a integrar o texto da lei, após a repercussão dos acidentes de Mariana e Brumadinho, em 2015 e 2019, respectivamente, demonstrando uma mudança legal, orientada para a gestão de riscos (LEITE, 2019).

No entanto, mesmo com os avanços legais, algumas barragens ainda não se adequaram a Política de Segurança que já completa 13 anos. Conforme dados do Relatório de Segurança de Barragem da Agência Nacional de Águas e Saneamento - ANA (2021), apenas 28% das barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, possuem PSB, sendo que o Plano trata-se de um instrumento da Política fundamental para a atuação dos órgãos fiscalizadores, junto aos empreendedores, pois nele contém todas as informações da barragem, desde dados do “dono” da barragem, dados técnicos da estrutura, planos de inspeções, até a identificação de áreas impactadas por um possível desastre ou acidente.

Neste contexto, tem-se o relevante Projeto de Irrigação Rio Formoso, no estado de Tocantins que contempla três barragens, adutoras canais de adução, coletores de drenagem, barragens, estações de bombeamento de adução e de drenagem, distribuídas nas áreas atualmente implantadas, além de estradas de acesso ao longo de todas as adutoras, coletores gerais de drenagem e canais secundários de irrigação e drenagem. O projeto Rio Formoso é composto pelas seguintes Barragem, Taboca, Barragem Calumbi II e Barragem Calumbi I. Os barramentos existem desde a década de 70, sendo ele um empreendimento com classificação de risco alta e dano potencial alto, causando preocupação ao órgão fiscalizador do estado, segundo registros da ANA (2021).

Projetos de revitalização já foram contratados em 2012/2013 pelo governo do Estado do Tocantins, no entanto, até o presente momento não foram executados, e devido as condições estruturais do complexo, cooperativas do local, passaram a reivindicar intervenções nas estruturas, haja vista que segundo Tocantins (2019) as barragens que compõe o projeto vêm trabalhando com níveis mínimo de capacidade de funcionamento do reservatório.

De acordo Duarte Junior (2011), existe uma gama de ferramentas e metodologias de análise de riscos que podem ser utilizadas para esses propósitos. Dentre elas pode-se citar a Análise da Árvore de Falhas (FTA – Fault Tree Analysis), Análise de Efeitos e Consequências (AQR), Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA - Failure Mode and Effect Analysis), Análise Preliminar de Perigos (APP), Análise Preliminar de Riscos (APR), Estudo do Perigo e da Operabilidade (HAZOP – Hazard and Operability Study), HACCP –

Hazard Analysis of Critical Control Points, HAZID – Hazard Identification Study, entre outras.

Diversos pesquisadores já utilizaram estas ferramentas em estudos de casos de barragens, sendo obtidos ganhos significativos nos resultados de suas pesquisas, sendo eles Carvalho e Gouveia (2022); Fernandes (2020); Fonseca (2018); Viana (2015); Melo (2014); Esposito e Caldeira (2010).

Logo, este trabalho busca aplicar o conhecimento das ferramentas de risco no estudo de caso do Projeto Rio Formoso, em especial à barragem Calumbi II, visando identificar os possíveis modos de falha e suas causas no empreendimento, demonstrando ao órgão fiscalizador a possibilidade de uso do FMEA nas inspeções periódicas realizadas por este ente.

A prevenção dos riscos demanda adoção de medidas, segundo ressalta Dias (2017) para gerir riscos em barragens é necessária a adoção de medidas voltadas à identificação e controle de riscos, avaliando qual a real eficácia das mesmas. Para isso é preciso conhecer e aplicar técnicas e princípios de gestão que, em caso de ocorrências danosas, possam reduzir consequências e sua severidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Projeto Rio Formoso é um aproveitamento hidroagrícola planejado, aproveitando as condições naturais favoráveis do vale do Rio Araguaia, no extremo sudoeste do Estado do Tocantins, com ampla disponibilidade de terras aptas à irrigação, sendo limitadas em seu potencial pela inundação na época chuvosa e pelo déficit hídrico durante o período seco. A cidade de Formoso do Araguaia é o maior município em extensão territorial do Estado do Tocantins e referência em agricultura irrigada em terras contínuas, sendo o maior da América Latina, totalizando 13.431,861 km². (IBGE,2023).

Os recursos hídricos que abastecem o Projeto Rio Formoso são provenientes de três barragens (Taboca, Calumbi I e Calumbi II) e complementados por bombeamentos realizados no rio Formoso no período de dezembro a julho. Desde a sua implantação, a infraestrutura hídrica do Projeto Rio Formoso não foi objeto de um programa de manutenção continuado e efetivo. As intervenções levadas a efeito tiveram apenas um caráter corretivo e pontual (TOCANTINS, 2012).

Conforme Relatório de Segurança de Barragem da ANA (2021), os três barramentos preocupam o órgão fiscalizador, NATURATINS/TO, por se tratarem de estruturas antigas (44

anos) e com registros de diversos problemas estruturais e documentais, possuindo CRI alta e DPA alto. Em detalhes, a barragem possui estruturas comprometidas, redução da capacidade de vazão, vertedouro obstruído, existência de trincas, surgências e escorregamentos de taludes (NATURATINS, 2019).

Esta precária situação das infraestruturas do Projeto Rio Formoso têm sido objeto de reivindicações comunitárias, inclusive ações movidas pelo Ministério Público Estadual, iniciada em 2019, além de matérias divulgadas no âmbito jornalístico de televisão e sites de jornais de grande circulação.

A barragem selecionada, a Calumbi II, está localizada à jusante do complexo formado pelas três barragens, e à jusante deste barramento, está localizada uma grande área de produção agrícola, agrovilas de produtores, uma rodovia federal (BR -242), além da presença permanente de produtores rurais no local (NATURATINS, 2019).

Nesse sentido, a utilização da ferramenta FMEA pode contribuir com o órgão fiscalizador na verificação de possíveis modos de falha e suas causas, ajudando na priorização de ações de fiscalização.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a situação de risco da barragem Calumbi II, que compõe o Projeto de irrigação Rio Formoso, por meio da aplicação da ferramenta de riscos FMEA (Failure Mode and Effects Analysis).

1.2.2 Objetivos Específicos

Realizar o levantamento das anomalias e patologias identificadas na barragem estudo de caso, com base nos Relatórios Técnicos elaborados pelo Governo do estado do Tocantins;

Identificar os modos de falhas definindo a prioridade de risco pelo NPR - número de prioridade de risco e descrever as formas de mitigação dos riscos verificados;

Realizar uma análise crítica da gestão de segurança da barragem estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARCABOUÇO NORMATIVO DE BARRAGENS DE ACÚMULO DE ÁGUA NO BRASIL

Em muitos países, a legislação visando elevar os parâmetros de segurança das barragens tem décadas de promulgação, porém, no Brasil o tema ainda apresentava lacunas consideráveis. Em face de acidentes graves ocorridos após o ano 2000, passa a haver por parte da sociedade e de órgãos diversos uma maior cobrança para o desenvolvimento de leis específicas, não voltadas a outras áreas que deveriam ser adaptadas à questão das barragens (NEVES, 2018).

Até 2010 não havia promulgação da legislação voltada aos recursos hídricos no território nacional, contudo, não havia definição específica da responsabilidade de fiscalização da segurança dessas estruturas no âmbito nacional. Os órgãos ambientais buscavam atuar nesse sentido, porém, na falta de respaldo legal para esse esforço, pouco poderia ser feito. Nos estados brasileiros, porém, ocorreu antes disso a promulgação de alguns decretos visando dar uma ênfase mais específica ao tema, porém, eram normas desencontradas, pois foram criadas com base nas especificidades de cada Unidade da Federação que decidisse por normatizar a questão da segurança de barragens (NEVES, 2018).

No ano de 2010 é promulgada a Lei nº 12.334/2010 que estabeleceu uma Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB), voltada para as barragens de acúmulo de água em qualquer finalidade, bem como para o acúmulo de rejeitos ou resíduos industriais, seja de forma permanente ou temporária. A lei 14.066, de 30 de setembro de 2020, alterou a primeira, a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).

Em âmbito nacional, além da Lei federal, no setor de barragens de acúmulo de água são aplicáveis, a Resolução CNRH nº 223/2020; a Resolução Normativa ANEEL nº 696/2015; a Resolução ANA nº 236/2016.

O art. 1º define que são regidas pela Lei de 2020 as barragens 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 (BRASIL, Lei nº 14.066, 2020).

Quando se refere a desastre, será instalada sala de situação para encaminhamento das ações de emergência e para comunicação transparente com a sociedade, com participação do

empreendedor, de representantes dos órgãos de proteção e defesa civil, da autoridade licenciadora do Sisnama (Sistema Nacional do Meio Ambiente), dos órgãos fiscalizadores e das comunidades e Municípios afetados (BRASIL, Lei nº 14.066, 2020).

A Lei nº 14.066 define que todos os órgãos que atuam na fiscalização devem informar ao órgão de proteção e defesa civil quando suas ações identificarem a necessidade de que em determinadas barragens sejam adotadas medidas emergenciais para sua segurança, tanto documentos quanto vistorias técnicas presenciais devem ser conduzidas e a comunicação entre os órgãos deve ser contínua, além de haver um canal para a realização de denúncias sobre as barragens e sua segurança (BRASIL, lei n. 14.066, 2020).

Como instrumentos previstos na PNSB, citam-se o Plano de segurança da Barragem (PSB), incluído o Plano de Ação de Emergência (PAE), o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência, os guias de boas práticas em segurança de barragens, os sistemas nacionais de informações previstos neste artigo devem ser integrados.

A Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017 tem foco voltado ao PSB – Plano de segurança das barragens e define que o referido documento poderá apresentar até seis volumes:

- Volume I: devem constar informações gerais
- Volume II: a documentação técnica do empreendimento
- Volume III: planos e procedimentos de todas as demandas voltadas para a operação e manutenção das estruturas
- Volume IV: enquadram-se registros e controles
- Volume V: detalhamento das chamadas revisões periódicas de segurança de barragem
- Volume VI: o Plano de Ação de Emergência (PAE) para aquelas barragens com DPA médio ou alto.

O PSB deve ser disponibilizado no local da barragem, se houver um escritório regional do empreendedor este deverá ter uma cópia do documento e a sede do empreendedor também deverá manter o PSB (BRASIL, Resolução ANA nº 236, 2017).

O órgão fiscalizador define quando deverá exigir do empreendedor a adoção de medidas que levem à redução da categoria de risco da barragem e informa de forma imediata à autoridade licenciadora do Sisnama e ao órgão de proteção e defesa civil quando ocorre desastre ou acidente nas barragens sob sua jurisdição, bem como qualquer incidente que possa colocar em risco a segurança da estrutura (BRASIL, Lei nº 14.066, 2020).

O PAE poderá ser exigido conforme dano potencial associado médio e alto; ou risco alto e a critério do órgão fiscalizador e independentemente da classificação quanto ao dano potencial associado e ao risco, a elaboração do PAE é obrigatória para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração (BRASIL, Lei nº 14.066, 2020).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) é responsável pela implementação da gestão de recursos hídricos no Brasil, sendo o agente que implementou os critérios gerais de classificação de barragens no Brasil e estabelecimento de diretrizes para a implementação PNSB.

Destacam-se as Resoluções nº 143/2012 e nº 144/2012 (alterada pela CNRH 223/2020); a primeira estabeleceu critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, enquanto a segunda, estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SINISB).

A Resolução CNRH 223/2020 definiu que os dados do SINISB devem ser usados para a elaboração do Relatório de Segurança das Barragens, que deve compreender de 1º de janeiro a 31 de dezembro do ano de referência, a alimentação e atualização de dados devem ocorrer de forma permanente, para que a qualquer momento a situação das barragens seja passível de verificação, cabe ao empreendedor atualizar continuamente as informações para que sejam precisas e confiáveis a todo o momento.

O CNRH tem a função de apresentar os relatórios de segurança todos os anos, sendo que até 30 de julho deverão ser encaminhados às esferas governamentais cabíveis (Congresso Nacional, assembleias legislativas, etc.) (FERRARA, 2021).

No estado do Tocantins, vigora a Portaria NATURATINS n. 483 de 18 de dezembro de 2017 (ou seja, uma legislação específica para o Tocantins), que regulamenta as ações pertinentes à segurança de barragens outorgadas pelo NATURATINS e dá outras providências. Segundo a normativa as inspeções devem ocorrer dentro de bases regulares, levando a um PSB com informações gerais, documentação cabível, planos e procedimentos, registros e controles, revisão periódica e plano de ação de emergência.

A citada Portaria da NATURANTINS apresenta os mesmos critérios de classificação de categoria de risco e dano potencial, constantes na Resolução nº 143/2012 para barragens de acumulação de água (Quadro 1, 2 e 3).

Quadro 1 - Quadro de pontuação das Características Técnicas de barragens de acumulação de água, conforme Portaria NATURANTIS n. 483/2017.

Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)
Altura $\leq 15m$ (0)	Comprimento $\leq 200m$ (2)	Concreto Convencional (1)	Rocha sã (1)	Entre 30 e 50 anos (1)	CMP (cheia máxima provável) ou decamilenar (3)
15m < Altura < 30m (1)	Comprimento > 200m (3)	Alvenaria de pedra/concreto ciclópico/concreto rolado – CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	Entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)
30m \leq Altura \leq 60m (2)	-	Terra homogênea/ Enrocamento/terra Enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento/rocha alterada com tratamento (3)	Entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos ()
Altura > 60m (3)	-	-	Rocha alterada mole/saprólito/solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou desconhecido/estudo não confiável (10)
-	-	-		Solo residual /aluvião (5)	

Fonte: NATURANTIS (2017).

Quadro 2 - Quadro de pontuação para o Estado de conservação de barragens de acumulação de água, conforme Portaria NATURANTIS n. 483/2017.

Existência de documentação de projeto (n)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)
Projeto executivo e “como construído” (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
Projeto executivo ou “como construído” (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)	-	Não emite os relatórios (5)
Anteprojeto ou projeto conceitual (6)	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)	-	-
Inexiste documentação de projeto (8)	-	-	-	-

Fonte: NATURANTIS (2017).

Quadro 3 - Quadro de pontuação para a classificação do DPA, conforme Resolução nº 143/2012 e Portaria n. 483/2017.

Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Pequeno < 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente de barragem) (0)
Médio: 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
Grande 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou (8)		ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
Muito Grande > 200 milhões m ³ (3)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)		

Fonte: NATURANTIS (2017).

A partir dos valores obtidos dos três quadros anteriores o empreendimento é classificado na matriz de risco em A, B e C, o que resulta da combinação de categoria de risco com DPA (Tabela 1).

Tabela 1 – Matriz de risco para barragens de acumulação de água, conforme Resolução nº 143/2012 e Portaria n. 483/2017.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	A	C	D
Baixo	A	D	D

Fonte: Adaptado de Resolução nº 143/2012 e Portaria n. 483/2017.

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS E GERENCIAMENTO DE RISCOS

Quanto mais cresce o número de barragens no mundo, qualquer que seja sua finalidade, maiores os riscos de ocorrerem falhas nessas estruturas, causando não apenas impactos financeiros, mas ambientais e comprometendo a segurança e a vida de várias pessoas. Diante disso, analisar os riscos envolvidos não se trata de uma medida secundária, mas central para a segurança das barragens (PERSECHINI *et al.*, 2015).

Qualquer que seja a finalidade de uma barragem, seu projeto precisa ser desenvolvido integralmente com vistas à segurança, já que falhas podem causar impactos consideráveis não apenas no âmbito econômico, mas também atingindo a vida dos cidadãos que vivem nas adjacências (SAMPAIO, 2014).

A segurança de barragens, que no passado não era foco central das atividades na área, ganhou relevância, técnicas e métodos foram desenvolvidos e as tecnologias passaram a permitir que esses esforços se tornassem mais organizados e efetivos e, assim, atualmente a segurança das barragens é uma busca contínua, existem planos sistematizados de monitoramento e controle e as leis sobre o tema são relativamente severas visando à minimização de riscos e redução de impactos (DIAS, 2017).

Existem, atualmente, muitas evoluções técnicas e tecnológicas importantes para a área de gestão de riscos que precisam ser conhecidas e aplicadas como forma de elevar sua eficiência. Além disso, é preciso entender que, em alguma proporção, os riscos sempre estão presentes. Sampaio (2016) enfatiza que, por maior que sejam os cuidados no projeto,

construção e monitoramento, os riscos existem, de modo que deve haver ampla atenção a eles em tempo integral.

Por muitos anos, a abordagem das atividades de segurança se dava com foco no risco, sempre com a preocupação de encontrar os riscos e atuar para sua minimização. No presente, porém, desenvolveu-se uma abordagem específica voltada para a segurança. As barragens, que eram vistas como estruturas seguras, passam a ser destacadas como estruturas que apesar de seguirem padrões técnicas de qualidade elevados, sempre vão apresentar algum grau de risco, não é possível chegar a uma situação de absoluta segurança e total eliminação de riscos (MELO; FUSARO, 2015). Para que se tenha uma percepção da diferença entre as duas abordagens, apresenta-se a Tabela 2.

Tabela 2 - Abordagem de risco x abordagem de segurança

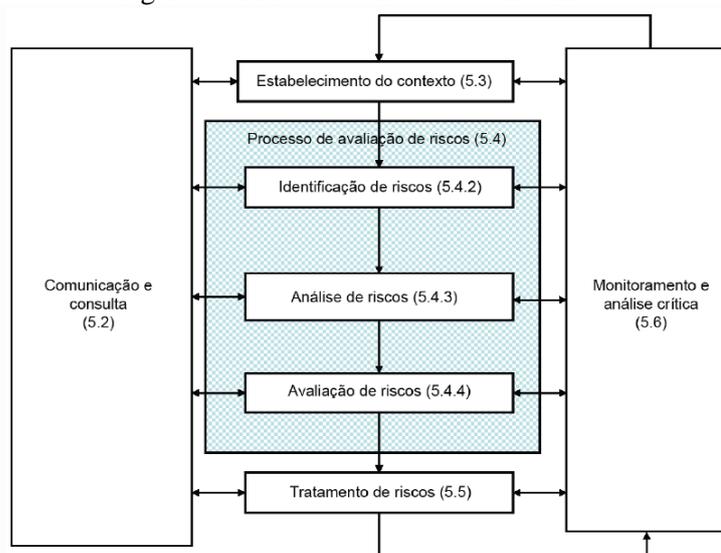
PERSPECTIVA ORIENTADA PARA A SEGURANÇA	PERSPECTIVA ORIENTADA PARA O RISCO
Barragens hidrelétricas são consideradas seguras Padrões técnicos elevados de dimensionamento são adotados Não há risco de ruptura	Não é possível garantir a segurança absoluta Risco de ruptura existe Gestão de risco

Fonte: Adaptado de Melo e Fusaro, 2015.

A ISO 31000 (2018) define o processo de gerenciamento de riscos por meio de sete elementos principais: comunicação e consulta; estabelecimento do contexto; identificação de risco; análise de risco; avaliação de risco; tratamento de risco; e monitoramento e revisão crítica

A gestão de risco envolve a aplicação sistemática, coordenada e integrada de políticas de gestão, bem como de procedimentos e práticas com foco nos esforços de identificação, análise, avaliação, mitigação e controle do risco. As principais atividades da gestão de riscos constam da Figura 1.

Figura 1 - Atividades Da Gestão De Riscos.



Fonte: ISO 31000, 2018.

O risco de ruptura de barragens vem caindo ao longo dos anos, em função do desenvolvimento de melhorias técnicas, bem como realização de inspeções mais frequentes e detalhadas, porém, segue existindo e deve-se compreender que, caso ocorra, os danos causados podem ser irreparáveis, por esse motivo a gestão de riscos deve ser uma prioridade. Deve ocorrer de forma integrada também com o vale a jusante, “[...] de modo que a população também tenha uma percepção do risco existente a fim de evitar uma confiança extrema na segurança da barragem, principalmente nos vales densamente habitados” (MENEZES, 2016).

A identificação e análise de riscos enquadram-se como o primeiro ponto a ser conduzido para que os demais possam ser realizados na sequência.

2.2.1 Identificação e análise de risco

Segundo a ISO 31000 (ABNT, 2018), risco é “o efeito da incerteza nos objetivos”, e a incerteza é “o resultado da falta de conhecimento”. A falta de conhecimento é, portanto, a fonte dos riscos. Convém frisar, no entanto, que risco e incerteza não são sinônimos. Risco normalmente é caracterizado por um valor, em geral a produtória de probabilidade de ocorrência e severidade do efeito, e incerteza é caracterizada por uma faixa de valores, dentro da qual, para uma certa probabilidade, encontra-se o valor verdadeiro da grandeza mensurada.

A ISO 31000 acrescenta ainda que, para o sucesso de uma organização, é necessário gerir seus riscos. A gestão de riscos é, conforme a norma, “o conjunto de atividades coordenadas para dirigir e controlar uma organização no que se refere a riscos”, e ainda, a

gestão de riscos “facilita a melhoria contínua da organização”. A gestão de riscos “aborda explicitamente a incerteza (sua natureza e como ela pode ser tratada)”, ou seja, identifica, analisa, avalia e trata os riscos, adotando controles sobre os mesmos, modificando-os. A gestão de riscos é “dinâmica, iterativa e capaz de reagir a mudanças no ambiente (contexto interno e externo) e conhecimento”. Alguns dos processos chave para a gestão de risco são, portanto, o processo de comunicação, que envolve a participação e consulta e permite perceber as mudanças no contexto, e o processo de aprendizado, que permite transformar as informações recebidas em conhecimento.

O risco refere-se à probabilidade de que um evento venha a ocorrer, combinando-se com as consequências que dele podem advir. Quando há elevada probabilidade de ocorrência de um evento danoso, configura-se uma ameaça, que tende a gerar custos diretos e indiretos, em sua maioria expressivos. Fatores intrínsecos à barragem atuam diretamente sobre os riscos, como as características físicas do solo, regime hidrológico da região e porte da cidade à jusante. Os riscos são calculados de acordo com os danos que podem vir a atingir o entorno em caso de eventos negativos, sendo classificados como riscos elevados, significativos ou baixos, conforme as vidas atingidas, os custos envolvidos e o comprometimento do ambiente (FONTENELLE *et al.*, 2011).

Aguiar (2014) ressalta que a análise de riscos é um dos primeiros passos a ser tomado quando se busca elevar os índices de segurança das barragens, já que tal análise permite desenvolver uma percepção sobre os pontos com riscos mais elevados e, assim, definir medidas para sua correção e controle.

De acordo com Persechini *et al.* (2011), a análise de riscos torna-se uma importante ferramenta para a tomada de decisões. Essa atividade permite uma aproximação quanto a possíveis falhas e, assim, quando podem ser percebidas com clareza e de forma precisa, é mais fácil e há maior efetividade quando se busca desenvolver medidas corretivas de falhas e que evitem danos posteriores de proporções elevadas, com impactos sobre a vida e o ambiente.

A análise de riscos depende da realização de uma avaliação de riscos que permita agrupar dados essenciais na análise da segurança que cada barragem apresenta. São usados modelos matemáticos que permitam apontar pontos de maior ou menor incidência dos riscos e, assim, permitem chegar a um valor que representa esse potencial de forma clara (FONTENELLE *et al.*, 2011).

A análise, qualquer que seja a abordagem selecionada para sua aplicação, deve ser conduzida por uma equipe multidisciplinar, ou seja, profissionais de diversas áreas do

conhecimento associadas à segurança de barragens, como geologia e geotécnica, hidráulica, estruturas, ambiente, entre outras. Esses profissionais devem ter acesso aos diferentes componentes da obra e os fatores ambientais e sociais envolvidos. Os cadastros de barragens no Brasil não podem ser considerados completos, faltam informações mínimas que gerem uma visão real do cenário e permitam uma ação adequada antes de acidentes ou quando tenham ocorrido (AGUIAR, 2014).

2.2.2 Controle de Riscos

Para Adamo *et al.* (2017), o controle de riscos depende de vigilância e inspeções completas, instrumentação, monitoramento e coleta de dados, permite que se desenvolva um planejamento para emergências, inclusive com documentos que detalhem ações necessárias em caso de emergência, indicando quem são os responsáveis e formas de contato, bem como as atividades que permitem chegar a essa compreensão, definindo com que periodicidade deve ser conduzida. Controlar riscos é usar informações precisas para entender onde estão os riscos, como e quando podem ocorrer, o que podem causar e de que forma agir caso venham a se concretizar, colocando em risco o empreendimento e inúmeras vidas humanas, além de terem impactos financeiros e ambientais.

O plano de ação, de acordo com Sampaio (2016), deve deixar muito claro quais as ações a serem executadas caso um acidente se concretize, ou na iminência disso, quais os esforços de prevenção e de correção que devem ser conduzidos e como serão divulgados os alertas para a população que se encontra em algum grau de risco de ser atingida. Todas essas medidas devem ser precoces, ou seja, a busca deve ser, sempre que possível, reduzir os riscos, para que a população não venha a ser atingida de forma irreversível.

Os riscos existem em todo o tipo de estrutura e nas barragens a realidade não é diferente. No entanto, compreender que esses riscos são reais permite que sejam conduzidos ações e esforços para sua verificação, análise e controle e, assim, seus impactos podem ser previstos e evitados a partir de abordagens bem desenvolvidas e baseadas em métodos amplamente utilizados para essa finalidade (PERSECHINI *et al.*, 2015).

A avaliação de riscos visa identificar potenciais ameaças e possíveis modos de ruptura das barragens, com base em uma estimativa estatística dos riscos existentes, tolerabilidade, de que forma medidas corretivas podem levar à sua redução e meios para atenuar os impactos (FONTENELLE *et al.*, 2011).

2.3 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DE GESTÃO DE RISCOS APLICÁVEIS EM BARRAGENS

As barragens são estruturas essenciais para a gestão de recursos hídricos ou contenção de rejeitos (de mineração ou industriais), por outro lado, podem oferecer riscos ao ambiente e indivíduos que se encontram em seu entorno. A segurança das barragens é um tema central de preocupações para que danos posteriores não venham eliminar todos os benefícios que poderiam trazer à região na qual foram construídas e, para isso, avaliar os riscos envolvidos é de suma importância (BRASIL, 2016).

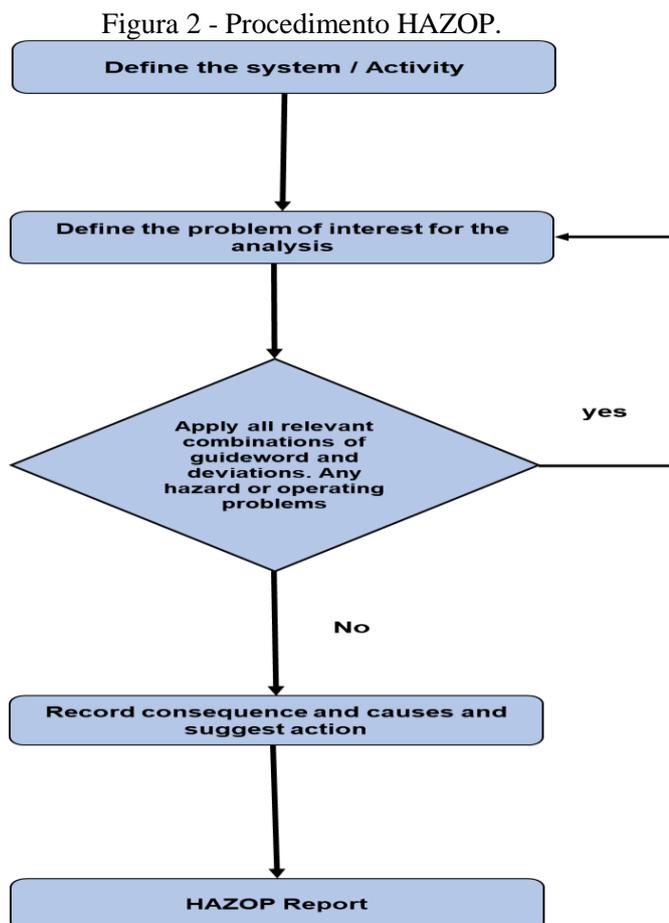
Para Tanus (2018), a avaliação de risco configura-se como um processo com diferentes etapas, por meio do qual é possível verificar se os riscos existentes são toleráveis, bem como decidir se as medidas de controle de risco estão dentro de parâmetros de adequação. Seu intuito é alcançar informações que tornem a tomada de decisões mais efetiva, com base na aceitabilidade das medidas desenvolvidas para controlar os riscos, bem como adotar medidas adicionais quando necessário.

Existem diferentes metodologias que permitem aplicar a avaliação de risco de barragens. Baima e Santos (2014) ressaltam que, qualquer que seja a metodologia aplicada, a avaliação depende de 3 fatores centrais, perguntas que precisam ser respondidas: o que pode acontecer de errado (quais são as ameaças)?; Qual a probabilidade de que isso ocorra?; e quais são os danos decorrentes desse acontecimento?.

Silveira (2002) esclarece que a escolha da metodologia de análise de riscos deve levar em consideração cada caso em particular. Em grandes barragens com deficiências diversas, pode se tornar necessário decidir quais as medidas a serem adotadas de forma urgente e quais podem ser posteriores, sempre com foco na manutenção da segurança. Conhecer os métodos disponíveis é necessário para identificar qual deles se adequa a uma situação específica.

2.3.1 Análise de Perigos e Operacionalidade (HAZOP - Hazard and Operability Analysis)

O método HAZOP configura-se como forma de identificação de perigos que busca avaliar cada parte do sistema para identificar como os desvios de determinados fatores ocorrem e que problemas podem causar. Demanda da classificação dos desvios das grandezas incidentes sobre seu comportamento pela adoção de palavras-chave, enquanto a equipe de análise deve determinar as causas e consequências dos desvios, propondo ações corretivas (SANTOS, 2006). A Figura 2 apresenta os procedimentos HAZOP.



Fonte: Adaptado de Silvanita *et al.*, 2015.

A classificação dos desvios costuma usar diversas palavras-chave, sendo que as mais comuns podem ser citadas como: NÃO, MAIS QUE/MENOS QUE, TAMBÉM, AO CONTRÁRIO DE e À EXCEÇÃO DE. São aplicadas aos processos, atividades, materiais, tempo e espaço. Após essa análise desenvolve-se um documento qualitativo que encampa os possíveis desvios no sistema e as recomendações de segurança, sempre citando um conjunto de procedimentos a seguir. As principais vantagens podem ser definidas como sua característica sistemática, com aplicação simples, enquanto a principal desvantagem refere-se ao fato de não analisar de forma criteriosa os modos passíveis de levar a desvios (SANTOS, 2006).

Para Souza *et al.* (2017), o método conduz a uma análise estruturada, seguindo preceitos lógicos e detalhados e, assim, o conhecimento e a confiabilidade sobre os sistemas tornam-se maiores, apresentando como vantagem central “[...] permitir alterações de concepção e de métodos construtivos, de forma a reduzir o risco, empregando *Defense Design* (defesas de projeto), sistemas de bloqueio e/ou instrumentos para detectar ou prover alarme”.

É um método muito útil para identificar perigos a partir de uma análise preliminar de riscos de maneira sistemática e abrangente. Os problemas de interesse são analisados na tentativa de determinar suas possíveis causas e consequências, justamente em face da compreensão de que podem trazer sérios danos. O problema é investigado com base no componente principal do sistema (SILVIANITA *et al.*, 2015).

2.3.2 Diagramas de Localização, Causa e Indicadores das Falhas (LCI)

Segundo Caldeira (2009) o método de diagrama de localização, causa e indicadores de falhas integra a família dos métodos qualitativos e semi-quantitativos e foi desenvolvido especificamente para barragem. Hughes et al (2000) relata que o método possui experiências de aplicação no Reino Unido, de onde é originado, sendo essas experiências escritas no guia de gerenciamento de riscos de reservatórios no Reino Unido “Risk Management for Uk Reservoirs”. Também no manual consta que o método é passível de ser aplicado a barragens com volume de armazenamento igual ou superior a 25 000 m³ e destina-se a realização de análises de riscos relativas ao estado limite último.

Sobre o LCI, Melo e Fusaro (2015) afirmam que a avaliação do impacto pode ocorrer de modo simplificado através do método ou estudo dam-break, além dos mapas de inundação da barragem. Proceda-se da previsão dos impactos para vale a jusante de < 5km e vale afastado de 5 a 30km. A definição dos estudos subsequentes considera quais estudos deverão ser conduzidos em função dos resultados alcançados na avaliação do impacto. Se o impacto for baixo, não é preciso avaliar o risco associada à obra, o que demonstra a importância ao aspecto que se refere à consequência. A avaliação FMECA (diagramas LCI) é o estágio final e depende da etapa anterior, demanda da aplicação do diagrama LCI para a barragem.

Silva (2015) esclarece que o método apoia-se em conclusões decorrentes de inspeções visuais da obra, todavia, a precisão da análise está diretamente ligada com o restante das informações às quais se tem acesso.

2.3.3 Análise por árvore de eventos (ETA – Event Tree Analysis)

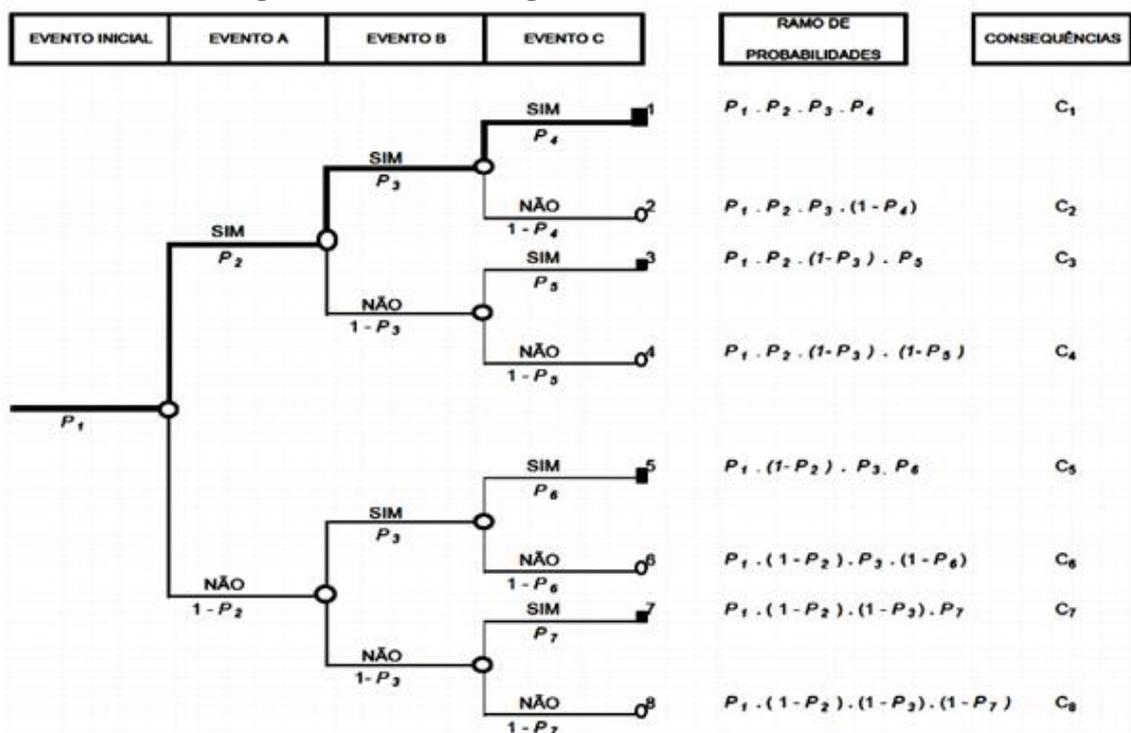
Segundo Pimenta (2009) apud Hartford Baecher (2004) não há clareza sobre a existência do início do método da Análise por árvores de eventos, sua implementação só aparece com divulgação a partir dos anos 70, essencialmente voltada as indústrias nucleares, química e petrolífera.

Pimenta (2009) relata que o método é lógico, do tipo indutivo, que dado um evento iniciador, promove uma análise de sequencias logicas de ocorrências de eventos, ou estado do sistema, por intermédio de construções gráficas.

O método permite abordar a complexa inter-relação de ocorrências envolvidas em único evento, tendo sido amplamente adotado para avaliar a segurança de barragens. Uma árvore de eventos começa com um evento inicial, que pode estar ligado a diferentes ocorrências, como um terremoto, inundação ou chuvas intensas. A partir deste evento inicial, vários resultados são possíveis, cada um com sua própria probabilidade de ocorrência. Trata-se de um modelo de todas as possibilidades passíveis de ocorrência no futuro e representa, até certo ponto, a visão subjetiva e específica do analista (DONELLY, 2005).

Conforme DeNeale *et al.* (2019), uma árvore de eventos começa com um evento inicial e representa graficamente as sequências de eventos hipotéticos subsequentes que, por fim, podem levar à falha. Os modelos de árvore de eventos são difundidos na análise de risco de segurança de barragens. As etapas no desenvolvimento de uma análise por meio de árvore de eventos são: definição de falha, identificação dos eventos iniciais, criação da árvore no sistema, desenvolvimento de modelos de componentes individuais, verificação da correlação entre falhas de componente ou modos de falha, avaliação de probabilidades e correlações para eventos, parâmetros e processos e cálculo da confiabilidade do sistema (Figura 3).

Figura 3 - Modelo de diagrama de uma árvore de eventos.



Fonte: Melo e Fusaro, 2015.

Ladeira (2007) destaca que o método é bem sucedido diante do correto entendimento de eventos que apresentam relação com o sistema, sendo essencial definir com clareza o que significa evento. “[...] na identificação da sequência de eventos deve-se evitar a descrição de eventos que não estão relacionados fisicamente ao fenômeno”.

Um grande benefício da análise de risco reside na estruturação do problema como uma árvore de eventos, buscando a identificação de interações e correlações, independentemente de os cálculos quantitativos de confiabilidade serem ou não realizados. Ainda que existem vários métodos para analisar riscos, as árvores de eventos se tornaram a abordagem mais comum nos estudos de segurança de barragens, pois fornecem uma estrutura intuitiva dentro da qual o analista pode organizar a variedade de considerações e preocupações quanto a uma barragem específica (DENEALE *et al.*, 2019).

Conforme essas árvores progredem do início ao fim em ordem cronológica, permitem que os usuários avaliem e registrem de que forma uma cadeia de eventos pode se desenrolar. Essas árvores são adaptáveis a condições únicas em uma barragem específica, os problemas são apresentados em fragmentos e então reunidos em uma visão maior (DENEALE *et al.*, 2019).

2.3.4 Análise dos modos de rotura e seus efeitos (FMEA-Failure Modes and Effects Analysis)

A associação Brasileira de Norma Técnicas na norma NBR 5462 (1994), define a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (AMFE) como a tradução para a sigla originária do inglês FMEA (Failure Mode and Effects Analysis).

De acordo Balan (2015) a Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE), também conhecida internacionalmente pela sigla FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), é uma técnica de análise de riscos de uso geral, podendo ser usada de forma qualitativa ou quantitativa. A AMFE é uma técnica de análise de riscos que nasceu dentro da indústria aeronáutica, desenvolvida por Engenheiros de Confiabilidade, que buscavam a confiabilidade das aeronaves, sendo ela uma análise sistemática que possibilita as diversas maneiras pelas quais um equipamento ou sistema pode falhar, e os efeitos que poderão ser gerados por estas falhas, estimando ainda as taxas de falha, levantando as mudanças e alternativas para diminuir a probabilidade de falhas, aumentando assim a confiabilidade do sistema.

Segundo Aiag (2017) a história do desenvolvimento do FMEA remonta a mais de 60 anos, os seguintes marcos são importantes para o método. O método FMEA foi desenvolvido pelos militares dos EUA como Especificação Militar MIL_1629. Foi utilizada como uma

técnica de evolução para confiabilidade, a fim de retratar os efeitos de falhas de sistemas e equipamentos. As falhas foram classificadas de acordo com a influência no sucesso, nas pessoas e na segurança dos equipamentos.

De acordo com Ladeira (2007, p. 54), “[...] esse método pode ser aplicado na engenharia de barragens transversal em todas as fases, desde concepção e projeto, passando pela construção, primeiro enchimento, até a fase de operação, o que o torna particularmente interessante”.

A análise ocorre por método iterativo, descritivo e qualitativo. De acordo com as informações disponíveis e os conhecimentos existentes, avaliação sistemática e raciocínio lógico, permite melhorar a compreensão dos pontos que geram riscos, justificando as decisões de segurança de sistemas. Não há nenhuma exigência por estruturas matemáticas ou estatísticas. Mesmo sem esses elementos, a FMEA visa garantir que possíveis falhas sejam levadas em consideração, compreendendo-se quais as falhas que podem ocorrer, qual sua probabilidade e ações preventivas ou mitigatórias (FONSECA, 2018).

O método FMEA é um exame dos potenciais modos de falha relacionados às barragens. Baseia-se na revisão de dados e informações existentes, pessoal de campo e operacional, inspeção do local, análises de engenharia concluídas, identificação de possíveis modos de falha, causas e desenvolvimento de falhas e entendimento das suas consequências. Seu objetivo é aumentar a compreensão e conhecimentos sobre a exposição ao risco associada à barragem. É essencial a participação de uma equipe diversificada de indivíduos com informações sobre o desempenho e a operação da barragem, capacitados para uma análise criteriosa (DONELLY, 2005).

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 Aiag (2016) cada modo de falha do FMEA tem relação de causa e efeito (cadeia de falha ou rede) e é avaliado para estimar o risco. Existem critérios de classificação para a avaliação de risco. Sendo eles:

- Severidade (S): representa a gravidade do efeito de falha;
- Ocorrência (O): representa a ocorrência da causa da falha;
- Detecção (D): representa a detecção da causa da falha ocorrida e/ou modo de falha.

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.

Relacionado ao número de prioridade de riscos (RPN), Carpinetti (2016) relaciona ao produto da interação dos índices de severidade, ocorrência e detecção, ou seja, O índice RPN com as avaliações da detecção, severidade e ocorrência, deve ser calculado como mostra a seguinte fórmula:

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

Onde:

RNP= Número de Prioridade de Risco;

S= Índice de Severidade;

O= Probabilidade de Ocorrência

A Tabela 3 apresenta exemplos de índices de severidade, índices de probabilidade de ocorrência e índices de probabilidade de detecção, respectivamente.

Tabela 3 - Descrição dos verificadores e seus 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	Catastrófico	-	-	6	Baixo
..	-	-	-	7	Muito Baixo
..	-	-	-	8	Remoto
..	-	-	-	9	Muito remoto
..	-	-	-	10	Quase impossível

Fonte: Adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013.

2.3.5 Etapas para análise da criticalidade (FMECA-Failure Modes and Effects and Criticality Analysis)

Soares (2014) justifica que o Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA – Análise de Modos de Falha, Efeitos e de Criticidade) surgiu em 9 de novembro de 1949 como um procedimento padrão para operações militares, referenciados no documento MIL-P-1629, que foi transformado em norma no ano de 1974 (MIL-STD-1629), e intitulado Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis ou FMECA (Procedimentos para execução de uma análise de modo de falha, efeitos e de criticidade).

A norma MIL-STD-1629A (MIL-1629A, 1980) define a FMECA da seguinte forma:

“Avaliar e documentar sistematicamente o impacto do potencial de falha de cada função e equipamento no sucesso de uma missão, pessoal e sistema de segurança, desempenho do sistema, manutenibilidade e requerimentos de manutenção”. (MIL1629A,1980, item 1.1).

A norma (MIL-1629A, 1980) tipifica o FMECA que o mesmo deve ser realizado no início da fase de projeto, como ferramenta de apoio a concepção do produto e para estabelecer prioridades de ações corretivas, e estabelece uma série de ações para a execução da metodologia. As ações são iniciadas com o planejamento da execução do FMECA, o que, segundo a norma, “envolve os procedimentos do contratante para a execução dos requisitos

especificados desta norma, preparando o FMECA para refletir as mudanças de projeto e a utilização dos resultados da análise para orientar o design.” (MIL-STD-1629A, 1980, pg. 6).

Assim, para o planejamento da execução do FMECA de acordo a norma MIL-STD-1629A (MIL1629A, 1980) solicita que as planilhas de elaboração da FMEA, e as suas premissas e regras do detalhamento mínimo, sejam a definição de falhas e o que será registrado, além das prioridades de análises, a forma de escrever os resultados e as áreas da organização que deverão receber os resultados, estejam definidos.

A norma MIL-STD-1629A (MIL-1629A, 1980) faz a exigência que a FMECA seja realizado de acordo o planejado inicialmente e que a análise identifique os modos de falha potencial possíveis.

Sua aplicação permite que sejam avaliados efeitos e sequência de acontecimentos para cada tipo de falha, alcançar a determinação precisa da importância desses modos de falha, aferir possíveis impactos sobre a segurança do sistema e criar uma classificação dos modos de falha que foram avaliados. Com esses dados, é possível controlar as diferentes modalidades de falha do sistema e, assim, evitar riscos ao seu funcionamento (VIANNA, 2015).

O método FMECA avalia a criticidade verificada a partir dos índices de ocorrência e severidade e existem outras métricas do FMECA, como o índice de detecção e o número de prioridade de risco (NPR). O índice de ocorrência (O) indica a probabilidade de a falha ocorrer, o índice de severidade (S) aponta o impacto ou gravidade dos efeitos da falha, o índice de detecção (D) ressalta a eficiência (ou probabilidade) dos controles de detecção da falha e o número de prioridade de risco (NPR ou RPN – *Risk Priority Number*) é produto da ocorrência, severidade e detecção (MELO; FUSARO, 2015, p. 10).

Quando o nível de severidade e probabilidade de ocorrência dos modos de falha são analisados, a técnica passa a ser chamada de Análise Crítica de Modos de Falha e Efeitos – FMECA (BOUTI, 1994). Santos (2006) enfatiza que não basta entender qual a severidade das consequências de cada tipo de falha, é preciso definir sua criticidade com base em taxas de falha de cada componente, informações advindas dos fabricantes e que devem ser correlacionadas com o uso desses componentes em situações específicas, como temperatura, humidade, realização de manutenções, etc.

2.3.6 Análise por árvores de Falhas (FTA- Fault Tree Analysis)

Ladeira (2007) informa que o método se configura pela apresentação gráfica de símbolos devidamente normalizados e que demonstram a associação entre diferentes eventos. Sua aplicação pode ocorrer em diferentes fases da engenharia de barragens e permite identificar uma série de combinações de eventos passíveis de causar a ruptura do sistema, o que torna o método efetivo no tratamento de acidentes de grandes proporções. Para que se possa construir e interpretar a FTA, é essencial que ocorra a padronização de símbolos, além da aplicação de programas computacionais. Sua aplicação pode ser considerada demorada, pelo tempo que toma para sua construção e análise.

Por meio da ETA é possível chegar a modelos de resultados para um evento com potencial de causar acidentes severos ao sistema. Inicia-se a árvore com um evento primário ou iniciador e, a partir dele, são avaliadas todas as possíveis consequências e probabilidades de ocorrência. Seu desenvolvimento leva a uma árvore que representa eventos e probabilidade e, assim, como gera uma análise em partes, há maior chance de tratar e combinar os resultados em cada parte, gerando uma visão global do cenário quando os dados são agrupados (SANTOS, 2006).

Os analistas da árvore de eventos perguntam o que pode acontecer se ocorrer um evento inicial, já os analistas de árvores de falhas perguntam como um resultado específico pode acontecer. Em conceito, as árvores de falhas são fotografias que mostram as condições em um instante no tempo, mas podem também mostrar condições na transição entre dois eventos em uma árvore de eventos ou o evento superior pode ser usado como o evento inicial em uma árvore de eventos (DENEALE *et al.*, 2019).

2.4 PRINCIPAIS MODOS DE FALHAS EM BARRAGENS DE TERRA

Para Baima (2015), uma barragem pode romper por múltiplas causas, a exemplo das barragens de concreto gravidade que tendem a apresentar, durante a ruptura, brechas parciais em uma ou mais seções monolíticas enquanto barragens de concreto em arco tendem a romper subitamente e completamente. Em comparação, 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).

De acordo Alves (2018); Lima (2021), 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

Para Alves (2018), as principais formas de falha de uma barragem são:

- Galgamento por cheia superior à de projeto dos sistemas de extravasamento;
- Infiltração e erosão interna da parte do maciço de terra ou enrocamento da barragem, fenômeno conhecido como “Piping”;
- Falha estrutural (concreto) ou falha geotécnica no maciço da barragem ou na fundação.

Segundo Melo (2014), a identificação dos modos potenciais de falha (ruptura) de uma barragem de terra e enrocamento converge nas categorias gerais listadas por Lafitte (1993 citado por Hartford e Baecher, 2004):

- Falhas hidráulicas devido a níveis excepcionais: inclui, por exemplo, galgamento e subsequente erosão externa devido a vertedouro com capacidade de descarga insuficiente, ou até mesmo associado a danos em comportas ou erros de operação.
- Movimentos de massa devido a carregamentos excepcionais (excetuando as cheias incluídas no item anterior), propriedades inadequadas dos materiais, ou singularidades geológicas não detectadas: inclui, por exemplo, instabilidade de taludes (por equilíbrio limite), deformações que conduzem a galgamento, liquefação de solos, instabilidades de fundação ou ombreiras, rebaixamento rápido associado a escorregamento do talude de montante e deslizamentos de encostas para o interior do reservatório que acarretem em galgamento.
- Erosão interna: inclui, entre outros, desenvolvimento de *Piping* no núcleo da barragem e erosão de solos de fundação ou juntas (preenchimento de descontinuidades).

A seguir serão apresentados os principais modos de falhas verificados em barragens de terra.

2.4.1 *Piping*/ Erosão interna

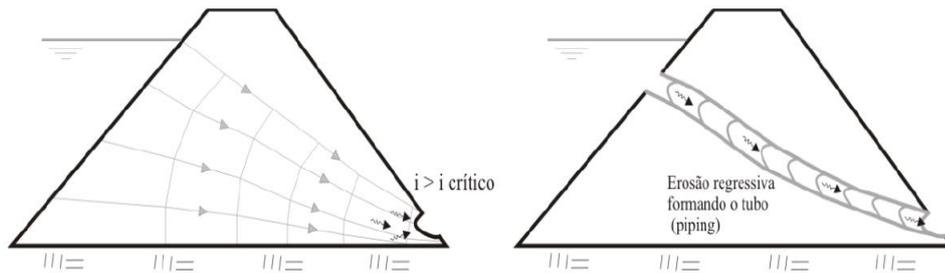
Piping em barragens de terra e rocha refere-se ao fenômeno de que as partículas finas no corpo da barragem são retiradas do interior da barragem pela infiltração de água, causando danos à barragem. O fenômeno de *piping* é propenso a acontecer no solo, como a distribuição de fissuras. Após a ocorrência de *piping*, partículas finas no solo continuam a precipitação das partículas grossas dos poros, e os poros originais continuam a se expandir, estendendo-se do interior da barragem para a fundação profunda da barragem. Se a tubulação não for encontrada ou as medidas eficientes não forem tomadas de forma adequada, os furos

espalhados serão conectados entre si, e a formação do piping através do canal será rapidamente desenvolvida (SUL et al, 2020).

Foster et al. (2000) descreve, três processos de *Piping* que podem ocorrer:

- a. 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)

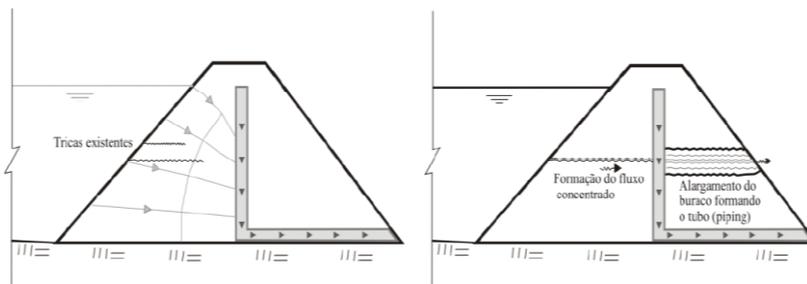
Figura 4 - Processo de formação de Piping por erosão regressiva.



Fonte: Perini, 2009.

- b) 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).

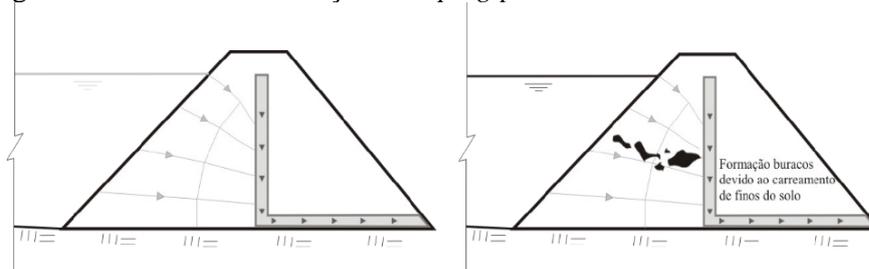
Figura 5 - Processo de formação de *Piping* por meio de alargamento das paredes.



Fonte: Perini, 2009.

- c) 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 desestabilizar internamente o solo e permitir a formação do tubo (Figura 7).

Figura 6 - Processo de formação de *Piping* por meio de carreamento de finos.



Fonte: Perini, 2009.

2.4.2 Galgamento

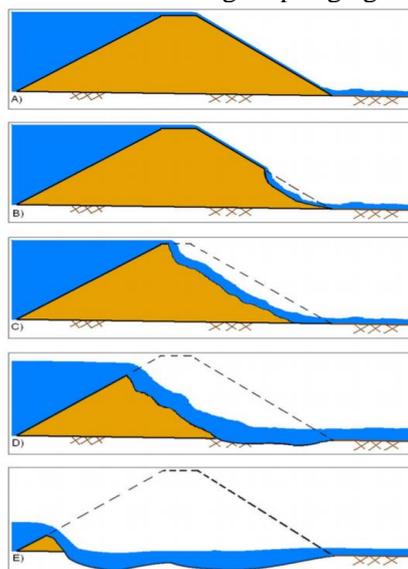
Segundo Lima (2014) galgamento é considerado um modo de falhas mais comuns em barragens que se dá quando uma cheia ultrapassa a capacidade para a qual a estrutura de extravasamento da barragem foi projetada tubular regressiva, ou seja, a água penetra no maciço até encontrar. Já Pereira (2019), cita outro questionamento 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.

Conforme o manual de inspeção ANA (2016) um rompimento de uma barragem por galgamento pode ocorrer devido à falta de capacidade de um vertedouro de extravasar água, sendo esse rompimento 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.

Já segundo Shen et al (2018) a falha por erosão progressiva ocorre quando o solo tem maior permeabilidade e menor resistência ao cisalhamento. O aumento do nível da água da lagoa aumenta com a água de montante, e o fluxo galga a barragem antes da frente de molhamento da linha freática atingir a face do talude a jusante. O fluxo de água superficial induzido pela tubulação corrói a declive a jusante, causando pequenos deslizamentos de terra e finalmente rompendo a barragem.

Alves (2018) cita os passos iniciais em que 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. Uma típica falha causada por galgamento é descrita esquematicamente na Figura 7.

Figura 7 - Típica evolução de falha de uma barragem por galgamento ou “overtopping”.



Fonte: USACE, 2014.

Segundo Alves (2018), a falha oriunda de 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.

2.4.3 Instabilidade de talude

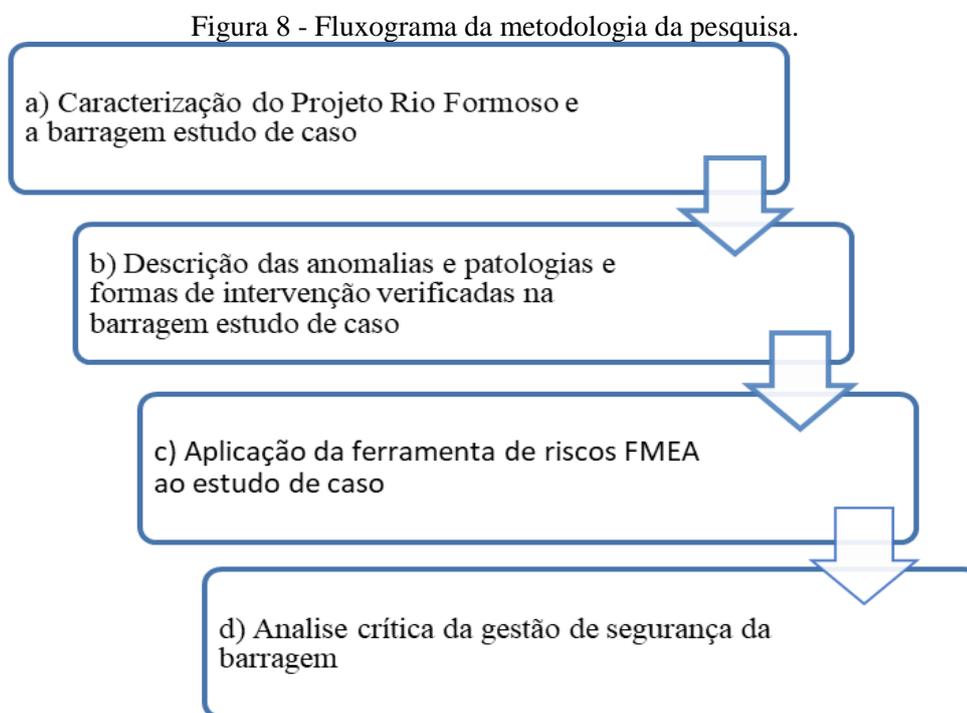
Segundo Ana (2016) a instabilidade dos taludes está relacionada com a ocorrência de deslizamentos e deslocamentos e pode ser agrupada em duas categorias, pode ela ser por ruptura superficial e por ruptura profunda. A ruptura superficial pode ocorrer no talude de montante ou de jusante nas seguintes Situações, quando o talude de montante ocorre o rebaixamento rápido com deslizamentos superficiais, que não causa ameaça a integridade da barragem, mas pode gerar obstrução da tomada de água e deslizamentos progressivos mais profundos. Já a ruptura por talude de jusante, ocorre deslizamentos rasos provocando aumento na declividade do talude e podem indicar perda de resistência do maciço, por saturação do talude, percolação ou fluxo superficial.

De acordo Fao (2011) a instabilidade de talude ocorre em barragens de aterro homogéneo, quando elas estão mais antigas, a acumulação demasiada causa pressão nos poros no interior do aterro e a ocorrência de percolação poderão ser um problema, especialmente para reservatórios com um nível alto ou com rápidas flutuações de nível de água por longos períodos de tempo; ou para uma barragem com fundações impermeáveis. Se a percolação for excessiva, isto poderá levar a instabilidade e eventualmente a falha de toda ou parte da face a jusante.

Segundo Shen et al (2018) o rompimento de taludes ocorre em barragens com alta permeabilidade e baixa resistência ao cisalhamento. O nível da água da lagoa aumenta com água de montante, e o fluxo transborda a barragem antes da frente de molhamento da linha freática atinge a face do talude a jusante.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa desenvolvida para o alcance dos objetivos foi baseada em quatro etapas, conforme descrito no fluxograma da Figura 8.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO RIO FORMOSO E DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO

3.1.1 Projeto Rio Formoso

Para a caracterização do Projeto Rio Formoso foram consultados relatórios técnicos de inspeção do Naturatins, consulta aos relatórios de Revitalização do Projeto Rio Formoso, para a descrição do projeto foram utilizadas consultas a dissertações, teses, normativas, resoluções.

3.1.2 Caracterização da barragem

Para a realização da etapa de caracterização técnica da barragem Calumbi II foram realizados levantamentos junto ao órgão fiscalizador NATURANTINS; consulta aos relatórios de Revitalização do Projeto Rio Formoso, elaborados pela Secretaria da Agricultura, da Pecuária e do Desenvolvimento Agrário do estado do Tocantins (GOVERNO DE TOCANTINS, 2013).

O levantamento de informações da barragem sobre a gestão de segurança do empreendimento, no que se refere a existência de PSB, assim como de sua classificação de risco, foi baseada na consulta ao Relatório de Segurança de Barragem (RSB) da ANA (2021) e dos Relatórios de Inspeção RISB da NATURATINS (2018) e (2019).

Foram levantados ainda; dados sísmológicos através das informações disponíveis pela estação sísmológica da Universidade de Brasília (UnB) no período de 1988 a 2014, coletados das estações de Natividade To e Santa Maria To.

3.2 LEVANTAMENTO DO HISTÓRICO DAS ANOMALIAS E PATOLOGIAS DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO

Para o levantamento das anomalias existentes na barragem Calumbi II foram consultados os Relatórios Técnicos referentes ao Projeto de Revitalização do Rio Formoso: Relatório Técnico RT12 - Projeto Executivo de Recuperação das Barragens (GOVERNO DO ESTADO DE TOCANTINS, 2013), fornecido pelo Distrito de Irrigação Rio Formoso (DIRF). Este relatório faz parte de um pacote de relatórios, elaborados por uma empresa de consultoria contratada pela Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins (Contrato nº. 021/2012). Ainda, foram analisados os Relatórios Inspeção de Segurança de Barragem (RISB) nº. 21/2018 e n.43/2019, elaborados pelo órgão fiscalizador estadual, o NATURATINS e visita em campo realizada por esta autora, em 2021 (Quadro 4). Vale ressaltar que a análise desta pesquisa compreende o horizonte temporal de 2013 a 2019; sendo 2019 o último relatório emitido pelo NATURANTINS.

Quadro 4 – Lista de documentos consultados.

Relatórios/Documentos oficiais	Resumo do Conteúdo	Como foi obtido ?
1) REVITALIZAÇÃO DO PROJETO RIO FORMOSO. RT 08: Análise e Avaliação dos Estudos, Projetos e Programas Referentes à Revitalização do Projeto Rio Formoso. Julho/2012. (Relatório contratado pela Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins elaborado pela empresa MAGNA ENGENHARIA). Contrato n. 021/2012.	Análise e avaliação de estudos e projetos já realizados referentes ao Projeto Rio Formoso, estudos hidrológicos; determinação das demandas de água a serem exercidas pelos diferentes cultivos existentes no Projeto; avaliação econômico-financeira do Projeto e instrução dos processos necessários à obtenção das outorgas do direito de uso da água a serem solicitadas junto ao NATURATINS; projeto executivo das obras de recuperação e orçamento e estudos para o encaminhamento, junto a ANA, da solicitação do Certificado de Sustentabilidade da Obra Hídrica – CERTOH (exigido para a execução das obras de revitalização).	Primeiramente foi realizado contato telefônico com o DIRF (Distrito de Irrigação Rio Formoso) para o agendamento de uma reunião presencial (na Sede, localizada em Formoso do Araguaia – TO) para explicitação dos objetivos da dissertação. Após a reunião foi encaminhado um Ofício institucional solicitando o envio de todos os Relatórios Técnicos relacionados ao Projeto de Revitalização Rio Formoso
2) REVITALIZAÇÃO DO PROJETO RIO FORMOSO - RT 12: Projeto Executivo de Recuperação das Barragens - Volume 3: Barragem Calumbi II - Tomo I: Memorial Descritivo. / Tomo II: Peças Gráficas Agosto/2013. (Relatório contratado pela Secretaria de Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins elaborado pela empresa MAGNA ENGENHARIA). Contrato n. 021/2012.	Síntese da situação atual e concepção das obras de recuperação da barragem; descrição das obras de recuperação do maciço da barragem; descrição das obras da tomada de água da barragem; descrição das obras do novo descarregador de cheias do vertedouro; dimensionamento hidráulico das obras projetadas; Análise da estabilidade dos taludes da barragem; disponibilidade de materiais para construção - distância de transporte. / Peças gráficas.	
3) REVITALIZAÇÃO DO PROJETO RIO FORMOSO. RT 05: Solicitação de outorga do direito do uso da água Volume I Grupo Obras Cíveis não Lineares: Barragens Taboca Calumbi I e Calumbi II. Agosto / 2013 (Relatório contratado pela Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins elaborado pela empresa	Definição do projeto Rio Formoso; disponibilidade hídrica no rio formoso; determinação das necessidades hídricas; demanda total de água para irrigação; características hidro pedológicas dos solos do projeto rio Formoso; infraestrutura do projeto; planejamento agrícola; estações de bombeamento a serem outorgadas reinstalação da estação fluviométrica; instalação de equipamento medidor de vazão.	

MAGNA ENGENHARIA). Contrato n. 021/2012.		
4) REVITALIZAÇÃO DO PROJETO RIO FORMOSO - RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EXECUTIVO - Volume 2: Peças Gráficas Tomo I – Parte 3: Barragem Calumbi-II .Dezembro/2013.(Relatório contratado pela Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins, elaborado pela empresa MAGNA ENGENHARIA). Contrato n. 021/2012.	Plantas do arranjo geral do Projeto de Recuperação, das obras no entorno da Tomada d'água, do tratamento das Fendas de Retração, do descarregador de Cheias, do dique Fusível, da ensecadeira, do descarregador de Emergência, da instrumentação e do descarregador de cheia.	
5) Relatório de inspeção de segurança de barragens realizado pelo órgão fiscalizador NATURATINS (Instituto Natureza de Tocantins) em novembro de 2018.	Dados técnico da barragem; identificação da estrutura; dados de características técnicas; estado de conservação; confiabilidade das estruturas extravasoras; estruturas de adução, percolação, deformações e recalques, deterioração dos taludes; relatório fotográfico contendo as patologias do barramento.	Foram obtidos por meio de Ofício institucional, encaminhado ao órgão fiscalizador, NATURATINS.
6) Relatório de inspeção de segurança de barragens realizado pelo órgão fiscalizador NATURATINS em novembro de 2019.	Dados técnico da barragem; identificação da estrutura, dados de características técnicas; estado de conservação, confiabilidade das estruturas extravasoras, estruturas de adução, percolação, deformações e recalques, deterioração dos taludes; e relatório fotográfico contendo as patologias do barramento.	
7) PORTARIA/NATURATINS n° 487, de 13 de novembro de 2013.	Contém informações da validade da outorga da Barragem Calumbi II.	

Fonte: Próprio Autor, 2023.

3.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA

3.3.1 Definição dos índices FMEA

A metodologia FMEA selecionada para a presente pesquisa considerou o método descrito na norma SAE J1739:2009, que considera um índice para cada verificador: severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D). A multiplicação destes verificadores resulta no NPR (Number Priority Risk) que ordena a prioridade de preocupação, ou seja, a falha mais potencial de cada cenário. Os valores atribuídos para os índices S, O e D correspondem ao proposto por Espósito e Palmier (2013), conforme Tabela 4.

Os valores atribuídos foram sendo devidamente justificados por este autor, visando explicitar o embasamento técnico nas atribuições de cada índice.

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	Catratrífico			6	Baixo
..	..	..	..	7	Muito Baixo
..	..	..	..	8	Remoto
..	..	..	..	9	Muito remoto
..	..	..	..	10	Quase impossível

Fonte: Adaptado de ESPÓSITO e PALMIER, 2013.

Para determinação da atribuição do índice S tomou-se como base a revisão de literaturas sobre impactos e danos resultantes de 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 a barragem Calumbi II, a saber:

- Relatórios de inspeção de segurança de Barragens (RISB) disponíveis (anos 2018 e 2019);
- Visitas de campo;

- Relatórios fornecidos pelo distrito de irrigação do projeto Rio Formoso da barragem DIRF do ano de 2013.

Para a atribuição do índice O, foi realizada a análise dos relatórios referenciados. Conforme 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.

Carvalho (2022) cita que para determinação do índice D, são analisados os seguintes fatores: quantidade de instrumentação no barramento com leituras ativas, existência de nível de controle para o instrumento em análise (podendo ser verificado 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). Sendo finalizada a procedência da 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).

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

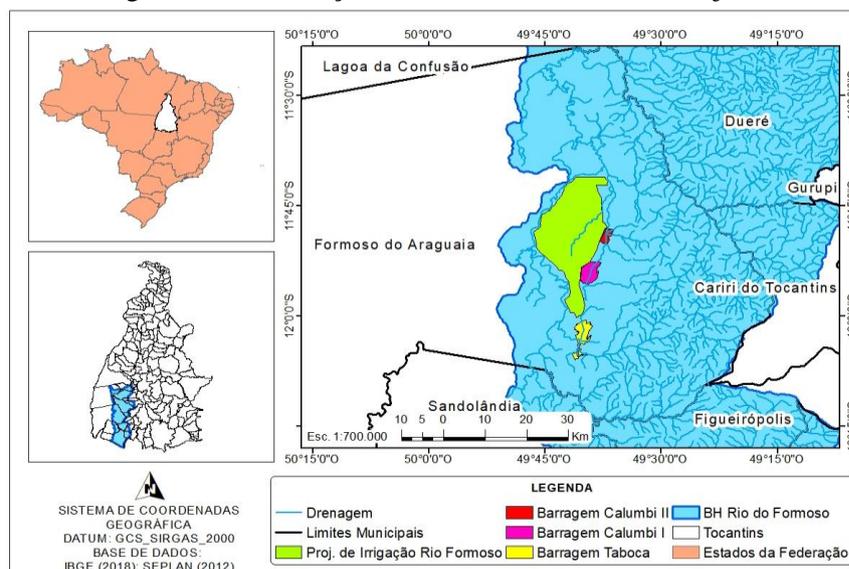
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO

4.1.1 Projeto Rio Formoso

O Projeto Rio Formoso originou-se de iniciativa do então Governo do Estado de Goiás, através dos Decretos de Desapropriação por Utilidade Pública nos 1.691, 1.692 e 1.693, de 10 de maio de 1979. Posteriormente, a área necessária para a construção do reservatório Taboca foi declarada de utilidade pública para desapropriação, através do Decreto n° 1.933, de 13 de agosto de 1981. Foram desapropriados ao todo 73.547 ha e 5.014 ha do reservatório Taboca. Mais tarde, as áreas foram unificadas e transferidas às Cooperativas COOPERFORMOSO, COOPERJAVA e COOPERGRAN (GOVERNO TOCANTINS, 2012).

Conforme TOCANTINS (2013) o Projeto é um aproveitamento hidroagrícola planejado, aproveitando as condições naturais favoráveis do vale do Rio Araguaia, no extremo sudoeste do estado, com ampla disponibilidade de terras aptas à irrigação, sendo limitadas em seu potencial pela inundação na época chuvosa e pelo déficit hídrico durante o período seco. O município Formoso do Araguaia, aonde se encontra o projeto, trata-se do maior município em extensão territorial do estado do Tocantins, contendo uma população estimada conforme dados do IBGE (2021) de 18.358 habitantes. A Figura 9 apresenta o mapa de localização da bacia e sub-bacias do Projeto.

Figura 9 – Localização da bacia e sub-bacias do Projeto.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A área total do Projeto abrange 73.547 ha, sendo que a Superfície Agrícola Útil (S.A.U.) é de 28.437 ha, distribuídos 4.219 ha para a cooperativa COOPERFORMOSO; 10.474 ha para a cooperativa COPERJAVA; 13.094 ha para cooperativa COOPERGRAN e 650 ha na Área Jaburu. Totalizando 384 lotes pertencentes a 141 proprietários, com cultivo, principalmente, de arroz e soja. Secundariamente são desenvolvidos cultivos de melancia e feijão.

A infraestrutura do Projeto conta com canais de adução, coletores de drenagem, barragens, estações de bombeamento de adução e de drenagem, distribuídas nas áreas atualmente implantadas, além de estradas de acesso ao longo de todas as adutoras, coletores gerais de drenagem e canais secundários de irrigação e drenagem. Conforme GOVERNO TOCANTINS (2013) as barragens existentes são:

a) Barragem Taboca: localiza-se no Córrego Taboca. A área do reservatório atinge 3.118 hectares no seu nível máximo operacional, acumulando um volume de água de 141.909.433 m³.

b) Barragem Calumbi II: localiza-se no Córrego Calumbi. A área do reservatório é de 4.384,5 hectares no nível máximo operacional, com um volume de água acumulado que atinge 110.193.465 m³

c) Barragem Calumbi I: localiza-se no Córrego Mói Farinha. Seu volume máximo de acumulação de água é de 93.525.432 m³, alagando uma área de 3.037,6 hectares.

A Figura 10 contém o mapa mostrando as três barragens.

Figura 10 – Mapa com indicação das três barragens.



Fonte: Governo do Estado de Tocantins, 2013

Desde a sua implantação, a infraestrutura de uso comum do Projeto Rio Formoso não foi objeto de serviços continuados e rotineiros de manutenção. As intervenções levadas a efeito tiveram como objetivo corrigir colapsos estruturais pontuais, ocorridos ou na iminência de ocorrer. Como consequência quase todas as estruturas encontram-se deterioradas, muitas delas inoperantes. Esta situação impossibilitou a plena operação do Projeto, reduzindo a área irrigada para menos de 20.000 hectares nos cultivos do período úmido (arroz) e para cerca de 12.000 hectares no período seco (soja, melancia, feijão). Os dados do Relatório Técnico de avaliação da sustentabilidade da obra hídrica (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS 2013).

A partir do ano de 2013, conforme ofício n. 04/2013/DIRF encaminhado à ANA, o projeto passou a ser administrado pelo Distrito de Irrigação Rio Formoso (DIRF), uma associação civil de direito privado, sem fins lucrativos. No ofício, o DIRF informa à Agência, que além de passar a ser o responsável pela infraestrutura do Projeto, se compromete em assumir progressivamente a operação e a manutenção do empreendimento revitalizado. No entanto, a situação das barragens continua precárias, até o presente momento.

4.1.2 Caracterização da Barragem Calumbi II

4.1.2.1 Características Técnicas

A Barragem Calumbi II foi construída no ano de 1979, em maciço em terra, atingindo alturas de até 7 (sete) metros, composta por dois diques (norte/sul e leste oeste) que se juntam na altura da tomada de água para a Adutora Calumbi II. O dique norte/sul possui uma extensão aproximada de 9.260 m e o dique leste/oeste conta com aproximadamente 3.520 metros. Localiza-se no Córrego Mói Farinha, seu volume máximo de acumulação de água é de 95.525.432 m³, alagando uma área de 3.037,6 hectares (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013). As principais características da barragem estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características principais da Barragem Calumbi II.

Nome do corpo hídrico	Altura Máxima (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Tipo de Material da Barragem/Finalidade	Volume Reservatório (m³)
Córrego Mói Farinha	12	13.040	9,50	Barragem de Terra Irrigação	95.525.432,00

Fonte: NATURANTINS, 2019.

Demais informações e características são apresentadas no documento de revitalização do Projeto Rio Formoso do Governo do Estado do Tocantins (2013), a saber: a barragem recebe outras contribuições hidrográficas, sendo estas, água drenada por gravidade da 1ª Etapa (COOPERFORMOSO), água de drenagem da 2ª Etapa (COPERJAVA) e parte da água de drenagem da 3ª Etapa que pode ter fluxo invertido no Coletor Central e conduzido para o Dreno D12 (COPERJAVA), ou D13 (COOPERGRAN), sendo ambos bombeados pela EBD - 02; o barramento fornece água, principalmente para a 3ª Etapa; para a formação do reservatório conta com dois diques que juntos, somam 11.830 m de extensão (dique leste/oeste com 3.050 m de extensão e dique norte/sul com 8.780 m de extensão).

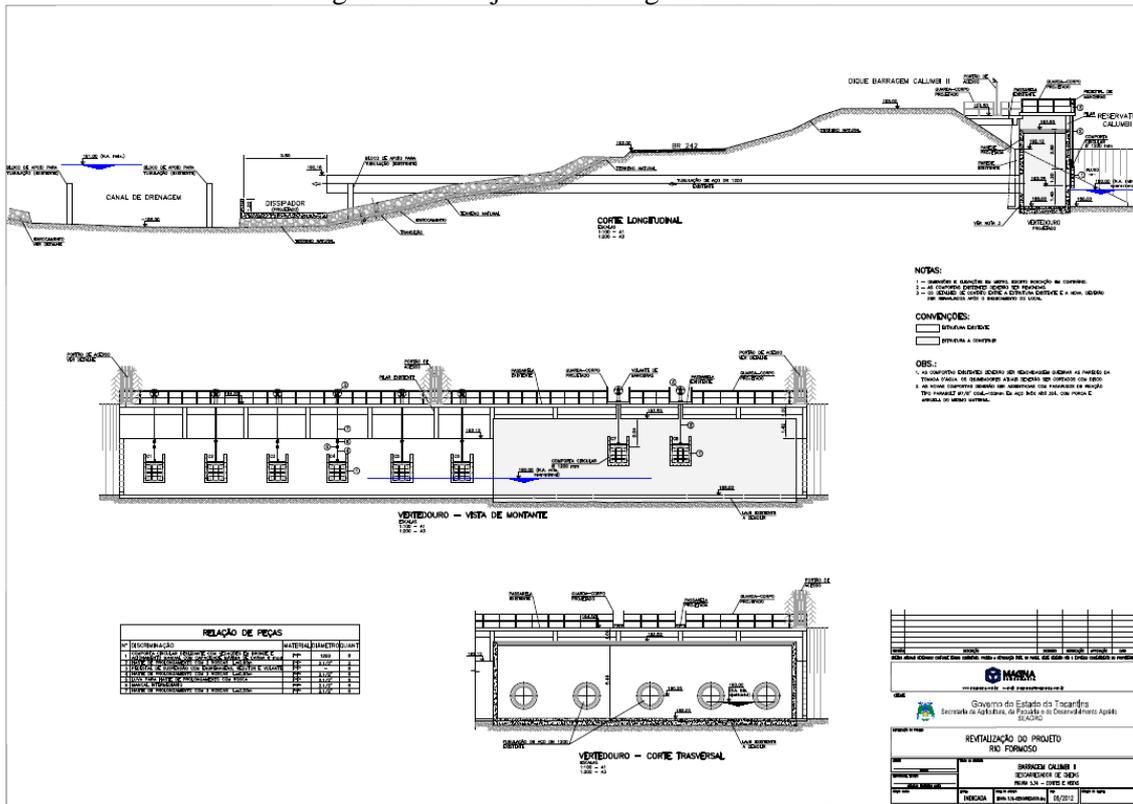
A Figura 11 contém uma vista geral da barragem e o reservatório da Calumbi II e a Figura 12 o projeto deste reservatório.

Figura 11 - Vista geral da barragem e reservatório da Calumbi II.



Fonte: NATURATINS, 2019.

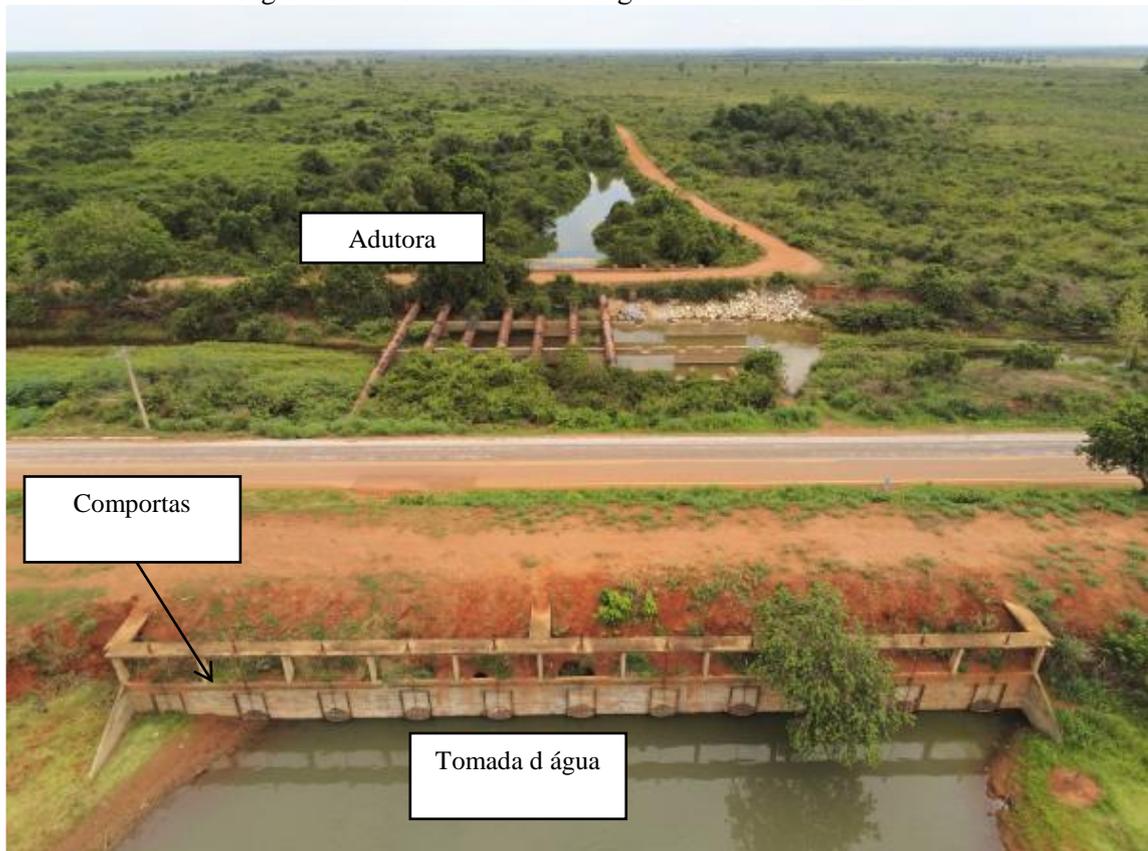
Figura 12 – Projeto da Barragem Calumbi II.



Fonte: Governo do Estado de Tocantins, 2013.

No final do dique Leste Oeste situa-se a estrutura tomada de água do barramento que supre o canal principal de irrigação (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013). A tomada de água da barragem Calumbi II possui 11 comportas de acionamento manual, com DN 1200 mm, que conduzem as águas de irrigação para a Adutora Calumbi II, através de tubos de ferro fundido posicionados sob o leito da BR 242 e sobre o canal externo de drenagem que recebe as águas retiradas da área da COPERJAVA pela estação de bombeamento de drenagem (Figura 13).

Figura 13 – Vista da tomada d'água e adutora Calumbi II.



Fonte: NATURATINS, 2019.

A Barragem Calumbi II foi construída originalmente sem vertedouro. Em época mais recente foi incorporado um descarregador de cheias ao barramento, situação está conseguida pela transformação de quatro tubulações da Tomada de Água em descarregador de cheias. Como a tubulação da Tomada de Água atravessa por sobre a canalização externa de drenagem, foi procedido o corte da tubulação da tomada, direcionando o fluxo para dentro do canal externo de drenagem, dotando assim a barragem de um sistema de descarregador de cheias constituído por quatro tubulações que anteriormente serviam como Tomada de Água para a adutora Calumbi II (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013).

4.1.2.2 Outras informações

Em termos de características hidrológicas, a Tabela 7 contém dados da bacia de drenagem, cotas de soleira do vertedouro e coroamento, assim como o volume acumulado e área do lago da barragem.

Tabela 7- Características Hidrológicas da Barragem Calumbi II.

CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DA BARRAGEM COLUMBI II						
Bacia Drenagem (km²)	Cota Soleira Vertedouro CSV (m)	Cota de Coroamento CC (m)	Volume Acumulado(hm³)		Área do Lago (há)	
			Vol. Acum. CSV	Vol. Acum. CC	Área Lago CSV	Área Lago CC
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
93	093,5	195	93,52	140,86	3.038	3.271

CSV – Cota da Soleira do Vertedouro CC – Cota de Coroamento

Fonte: Governo do Estado do Tocantins, 2013.

No que se refere aos dados de eventos de sismos na região, as informações são do Centro de Sismologia da UNB das estações NTVB de Natividade – To e da estação SMTB de Santa Maria do Tocantins. Não há registros de sismos na região de Formoso do Araguaia – To, porém, conforme Tabela 8, os relatos de sismos mais próximos da barragem Calumbi II, ocorreram na cidade de Gurupi – To. Onde o mesmo indicou sismos de magnitude 3,4 (ano de 2000) (Tabela 8). Segundo Sá e Paiva (2012) terremotos que atingem até à magnitude 2 são considerados micro terremotos e, praticamente, não são sentidos. A partir das magnitudes entre 4 e 5 na escala Richter, um tremor já é suficientemente forte e liberta tanta energia mecânica que pode ser detectado por instrumentos instalados em vários locais do planeta.

ANA (2016) evidencia que apesar do Brasil ser um país de baixa sismicidade, sismos naturais ou induzidos pelo enchimento de grandes reservatórios podem também originar deteriorações nas barragens. Não obstante, a ocorrência de tremores naturais e sismos induzidos por enchimento de reservatório, não há registros de danos nas barragens brasileiras, dada a reduzida magnitude desses sismos.

Tabela 8 – Dados sismológicos de cidades do estado de Tocantins, coletados do centro de sismológico da UnB.

YEAR	MO	DD	HH	MI	SS	LATITUDE	LONG.	MAG	ST	Locality
1988	8	30	15	40	20	-6,09	-47,96	3,5	TO	ARAGUATINS
1989	1	7	3	1	13	-11,62	-48,11	3,8	TO	Natividade
1990	8	21	5	12	41	-11,79	-48,27	3,5	TO	Natividade
1990	8	21	5	41	52	-11,91	-48,25	3,6	TO	Natividade
1995	3	20	12	12	58	-12,27	-49,32	2,6	TO	Figueiropol.
1995	6	21	2	57	43	-10,79	-48,34	2,9	TO	Porto Nacional
1996	5	1	12	43	53	-12,57	-48,05	2,7	TO	S.STocantins
1996	10	19	10	56	9	-12,36	-49,31	2,5	TO	Alvorada
1996	11	13	23	39	8	-12,26	-50,11	3,4	TO	Gurupi
1997	8	24	5	59	4	-11,1	-50,61	3,1	TO	S.F.Araguaia
1998	4	11	17	24	53	-11,02	-48,48	3,9	TO	Pto.Nacional
1999	12	16	5	8	21	-11,65	-47,8	3,4	TO	Natividade
2000	4	12	7	26	34	-12,27	-48,84	3,1	TO	S.V.Nativid.
2000	9	13	7	39	51	-12,02	-49,85	3,4	TO	Gurupi
2002	5	18	12	22	12	-9,92	-49	3,1	TO	Prox. Pium
2002	5	19	5	57	18	-10,03	-49,63	3	TO	Prox. Pium
2003	7	14	9	8	38	-12,64	-47,68	3,6	TO	Parana
2003	7	14	9	15	37	-12,64	-47,62	3	TO	Parana
2006	2	28	8	18	40	-13,04	-48,43	2,7	TO	Palmeiropoli
2009	4	3	3	39	51	-11,65	-48,61	3,2	TO	Peixe
2011	3	2	19	17	16	-11,45	-48,71	3,2	TO	Alianca do Tocantins
2011	4	30	8	16	22	-11,17	-48,7	3,6	TO	Brejinho de Nazare

Fonte: UNB, 2023.

4.1.2.3. Informações sobre PSB.

A barragem Calumbi II, assim como as demais barragens do Projeto, segundo RSB NATURATINS (2019) e Relatório de Segurança de Barragem da ANA (2021) não possuem PSB, sendo este Plano obrigatório para barragens que se enquadram na Política Nacional de Segurança Barragem, conforme a Lei Federal n. 12.334/2010 (alterada pela Lei federal n. 14.066/2020). O PSB trata-se de um documento essencial para o órgão fiscalizador, uma vez que reúne várias informações relacionadas a informações gerais, documentação técnica, Planos e procedimentos (regra operacional dos dispositivos de descarga; Planejamento das manutenções; Plano de monitoramento e instrumentação; planejamento das inspeções de segurança da barragem e etc); Registros e controles (registros de operação, registros da manutenção; registros de monitoramento e instrumentação; relatórios de Inspeções de

Segurança etc); revisão periódica e Plano de Ação de Emergência - PAE (quando a barragem for de classe B, CRI alta e DPA médio).

Conforme o RSB NATURATINS (2019) a barragem apresentou classificação A na matriz de classificação (CRI alta e DPA alto), sendo obrigatório, neste caso, conforme ANA nº 236-2017, também a elaboração do PAE. Em 2021 a presente autora realizou uma visita *in loco*, e ao solicitar informações sobre o PSB e PAE ao empreendedor, o mesmo informou que tais documentos estavam sendo elaborados por uma empresa de consultoria.

Em termos de instrumentação da barragem, haviam apenas alguns piezômetros instalados na crista da barragem, porém os mesmos não estavam em funcionamento, segundo relatos do técnico do DIRF que acompanhava a visita.

4.2 LEVANTAMENTO DAS ANOMALIAS E PATOLOGIAS VERIFICADAS NA BARRAGEM

Devido ao grau de deterioração das estruturas de acumulação e distribuição de água do Projeto Rio Formoso, o governo do Tocantins tem buscado a realização de obras de recuperação, desde o ano 2004, quando foi contratado pela Secretaria de Recursos Hídricos o “Projeto de Recuperação da Infraestrutura do Projeto Rio Formoso - 1ª, 2ª e 3ª Etapas”, cujo objetivo era a avaliação da situação operacional, os custos da recuperação das obras (barragens, adutoras, canais de drenagem, estruturas de derivação de água, sistema viário) e análise da viabilidade econômica e financeira, com vistas a possibilitar a plena operacionalidade de toda a área beneficiada (cerca de 27.800 hectares).

Porém, conforme Relatório técnico RT 08, (Análise e avaliação dos estudos, projetos e programas referentes à revitalização do projeto rio Formoso), Governo do Estado do Tocantins (2012), na época de realização dos estudos de viabilidade, não foram considerados a disponibilidade hídrica existente, partindo do pressuposto de que toda a área poderia ser plenamente irrigada, tanto no período úmido, quanto no período seco. Fator este que, levou a uma superestimação dos custos de recuperação da infraestrutura, o que dificultou a comprovação da sustentabilidade financeira e a sua execução.

Em 2013 foi contratado pelo governo do estado, mais um projeto de revitalização das barragens, denominado “Revitalização do Projeto Rio Formoso”. Em 2013 o DIRF assume a operação dos barramentos. Porém, até o momento, as obras de revitalização das barragens (Calumbi I, Calumbi II e Taboca) não sofreram intervenções.

Em 2019, o Ministério Público do Tocantins (MPTO) instaurou um procedimento extrajudicial para monitorar as barragens Calumbi I, Calumbi II e Taboca, que integram o Projeto de irrigação Rio Formoso, com enfoque na segurança, dentro dessas ações incluíram reuniões na Procuradoria da República do Tocantins e visitas técnicas nas barragens. Em 2018 e 2019 o NATURATINS realizou duas inspeções na barragem, constatando diversos problemas nas estruturas do complexo.

A seguir serão apresentadas as anomalias e patologias identificadas nos seguintes documentos:

- a) Relatório Técnico do Projeto executivo de Revitalização (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013);
- b) Relatório Técnico de apoio à solicitação do certificado de avaliação da sustentabilidade da obra hídrica (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013);
- c) Relatórios elaborados pelo órgão fiscalizador, RSB NATURATINS (2018) e (2019);
- d) Registros fotográficos realizados pela própria autora

4.2.1 Fendas de retração no maciço

Conforme GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS (2013) no maciço da barragem foram verificadas fendas de retração, que se estendem no sentido longitudinal ao eixo do barramento, em dois locais no trecho norte sul da barragem (Figura 1). Dentre as fendas identificadas, uma delas apresentou abertura com cerca de 2cm, com uma profundidade que permitiu a introdução de uma vara com mais de 1,5 metros de comprimento.

As fendas são decorrentes das características do material empregado para alteamento da barragem, o qual apresenta características de argilas expansivas, que ao serem drenadas tem seu volume reduzido, provocando a formação e abertura das fissuras. Com o rebaixamento do nível de água do lago o talude verticalizado pelas erosões a montante, fica exposto do ressecamento decorrente da ação do sol e do vento, agravado ainda em função da reduzida umidade relativa do ar que se faz sentir, durante o período de estiagem. As fendas colocam em risco a estabilidade do barramento e devem ser objeto de intervenção específica, conforme relatório de solicitação do Certificado de Avaliação da Sustentabilidade da Obra Hídrica (GOVERNO DO ESTADO DE TOCANTINS, 2013).

Conforme o RSB NATURATINS (2019), no período da inspeção foi observada a presença de uma fenda na crista da barragem, provavelmente oriunda de uma trinca no aterro. (Figura 14).

Figura 14 - Presença de fenda na crista da barragem, provavelmente oriunda de uma trinca no aterro.



Fonte: NATURATINS, 2019.

4.2.2 Erosões e escorregamentos no maciço

Conforme GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS (2013) ao longo do talude interno do maciço há trechos com ocorrência generalizada de erosões, com redução da seção e tendência de comprometimento da estabilidade (Figura 15a e Figura 15b). Este fato se deve às deficiências de execução dos aterros e falta de proteção adequada dos taludes em relação aos efeitos erosivos das ondas do lago.

Figura 15 – a) Erosão no talude- Estaca 235 (à esquerda); b) estaca 295 (à direita).



Fonte: Governo do Estado do Tocantins, 2013.

No RSB NATURATINS (2019), houve registro de depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão com potencial de comprometimento da segurança. Pontos de erosão severa no talude de montante, algumas áreas podendo existir problemas de erosões mais expressivos, não podendo ter sido observado devido a vegetação generalizada. (Figura 16).

Figura 16- Escorregamento expressivo (desbarrancamento) no talude de montante.



Fonte: NATURATINS, 2019.

Em 2021, durante a visita à barragem, por parte desta pesquisadora, constatou-se a continuidade da presença de escorregamento no talude de montante e erosão no talude de jusante. (Figura 17).

Figura 17 – a) Escorregamento ao lado da estrutura de vertedouro (à esquerda) e Erosão no talude de jusante (à direita).



Fonte: Autoria própria, 2021.

4.2.3 Irregularidade nos diques

De acordo com o GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS (2013) a pista de rolamento do caminho de serviço situada no coroamento da barragem, apresenta irregularidades e deficiências de revestimento. O trecho final do dique norte/sul encontra-se com coroamento em cota inferior ao restante da barragem, necessitando ser alteado em cerca de 1 metro.

4.2.4 Presença de vegetação arbustiva

Segundo o relatório GOVERNO DO ESTADO DE TOCANTINS (2013) junto à borda superior do talude de montante, e em praticamente toda extensão do talude de jusante, há ocorrência de vegetação arbustiva e mesmo árvores de porte, que necessitam ser removidas por razões de segurança do maciço.

RSB NATURATINS (2018) e (2019) relataram a existência de vegetação generalizada (árvores de grande porte) em ambos os taludes em toda a extensão do e a presença de árvore de grande porte entre a estrutura de concreto da tomada d'água e o aterro da barragem (Figura 18a, Figura 18b).

Figura 18 – a) Presença de vegetação generalizada em toda extensão da Barragem (à esquerda); b) árvore de grande porte entre a estrutura de concreto da tomada d'água (à direita).



Fonte: NATURATINS, 2019.

Em 2021, foi verificado na visita, *in loco* a permanência da presença de vegetação, conforme registros da Figura 19.

Figura 19 – a) Presença de árvores no talude à jusante (à esquerda); b) presença de vegetação na crista da barragem (à direita).



Fonte: Autoria própria, 2021.

4.2.5 Surgências de água no talude de jusante

Conforme GOVERNO DO ESTADO DE TOCANTINS (2013) embora a barragem venha operando em níveis mais baixos, há a ocorrência de diversos pontos próximos ao pé do talude de jusante em que são observadas surgências de água, não tendo sido evidenciada nas inspeções e investigações realizadas, a existência de “filtros” no maciço. Esta constatação também foi corroborada por informações de técnicos que participaram da execução das obras.

Segundo RSB NATURATINS (2018) e (2019) foram encontradas surgências nas áreas a jusante, devido ao estado de má conservação do barramento, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente. Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança.

4.2.6 Sistema de adução

De acordo com GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS (2013) o vertedouro desta barragem que também é um sistema de adução é constituído por onze tubos de aço, implantados na parte inferior do maciço dotados, cada um deles, de comportas de montante em ferro fundido. As comportas possuem dispositivo de acionamento manual, constituído por pedestal de manobras com redutor acionado por manivela. O conjunto de mecanismos de acionamento das comportas está apoiado à montante em estrutura de concreto, constituída por parede tipo ala de bueiro, com passarela apoiada em pilares.

As estruturas de concreto da Tomada de Água, tanto de montante como de jusante, encontram-se bastante deterioradas, necessitando de reparos estruturais, especialmente em diversos locais onde são visíveis defeitos de concretagem. O sistema de comportas opera precariamente, com a maior parte das comportas e/ou seu sistema de acionamento deteriorado, emperrado e com presença de oxidação (Figura 20). Atualmente, apenas quatro comportas ainda estão em condições operacionais.

Figura 20 - a) Comporta inoperante e soterrada (à esquerda) e comporta com presença de oxidação (à direita).



Fonte: Governo do Estado do Tocantins, 2013.

RSB NATURATINS (2019) constata ainda que as comportas se encontram em estado de deterioração avançada, com peças quebradas, enferrujadas e com a estrutura de concreto com ferragens expostas. Duas das onze comportas apresentam condições para operação e as demais exibem seus registros manuais danificados, havendo também comportas soterradas. As estruturas civis estavam comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas, com redução de capacidade de vazão e sem nenhum tipo de medidas corretivas. Canais ou vertedouro (tipo soleira livre) estavam obstruídos ou com estruturas danificadas. (Figura 21).

Figura 21 – a) Vista do Vertedouro com comportas soterradas e com patologias no concreto (à esquerda) e Registros manuais das comportas danificadas (à direita).



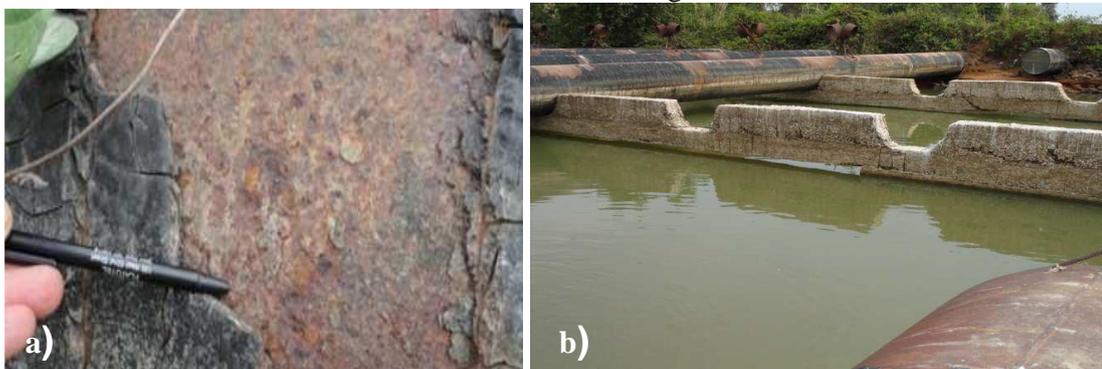
Fonte: NATURATINS, 2019.

4.2.7 Tubulação de descarga de tomada de água

As tubulações da Tomada de Água que transpõem o maciço da barragem se desenvolvem sob o eixo da rodovia BR 242 e transpõem o canal externo de drenagem em trecho aéreo, desenvolvendo-se até a extremidade de jusante onde descarregam no canal denominado Adutora Calumbi II. As tubulações no trecho aéreo estão com o revestimento de proteção deteriorado, totalmente “gretado”, expondo a estrutura metálica da tubulação aos processos de oxidação (Figura 22a).

Além dos problemas de falta de revestimento de proteção dos tubos, destaca-se a instabilidade das estruturas de apoio das tubulações, que apresentam grandes defeitos de concretagem, bem como acentuado grau de fendilhamento (Figura 22b) (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013).

Figura 22 – a) Tubo com revestimento deteriorado (à esquerda) e b) Tubulações da Tomada de Água com defeito de concretagem.



Fonte: Governo do Estado do Tocantins, 2013.

4.2.8 Falhas na instrumentação

Durante a visita *in loco* foi verificada a instalação de piezômetros no corpo da barragem, no entanto, os mesmos estavam inoperantes, conforme informações do técnico do DIRF que acompanhou a visita (Figura 23).

Figura 23 - Piezômetros instalados em 2021.



Fonte: Autoria própria, 2021.

4.3 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E SUAS POSSÍVEIS CAUSAS E FORMAS DE MITIGAÇÃO

A Tabela 9 apresenta os resultados dos modos de falhas, suas causas e o NPR, indicando a prioridade de risco da falha. Estes resultados se pautaram na realidade do empreendimento, tendo em vista que cada índice (S, O e D), que determinam o NPR, foi justificado tendo como base relatórios de inspeção e todos os relatórios referentes ao projeto de revitalização do empreendimento. A severidade (S) está ligada à magnitude do impacto do possível modo de falha; a ocorrência (O) está relacionada às incidências do problema, conforme histórico de anomalias, enquanto que a detecção (D) corresponde qual a probabilidade de ser detectada determinada falha.

Tabela 9 – Tabela síntese obtida da aplicação do FMEA.

MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	CAUSAS	NPR EM ORDEM DECRESCENTE
Instabilidade do talude de montante	Escorregamentos (deslizamentos) e deslocamentos no talude de montante	Efeitos erosivos das ondas do lago e ação das intempéries, ausência de cobertura vegetal	336
Erosão Interna	Piping	Falha no sistema de drenagem interna (filtros)	320
Galgamento da barragem	Formação de processos erosivos com progressão de abertura de brecha	Falhas no sistema extravasor	144

Fonte: Próprio Autor, 2023.

4.3.1.1 Instabilidade de Talude de montante

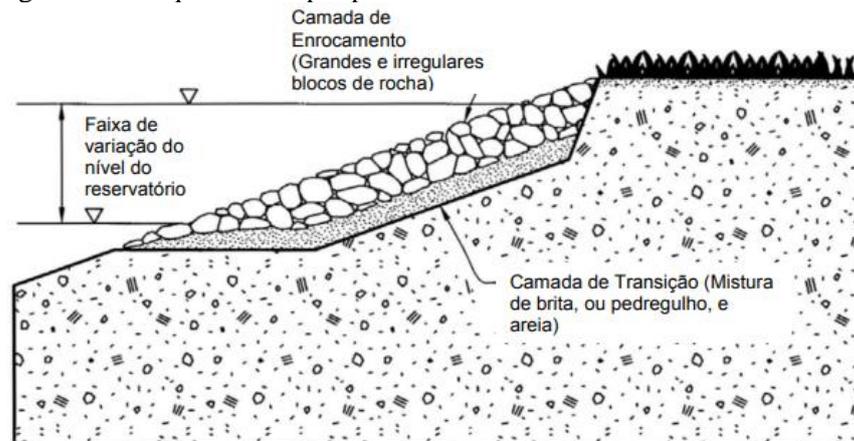
A partir da Tabela 9, verificou-se que o cenário de maior prioridade de risco foi “falha por instabilidade de talude de montante” (NPR = 336), haja vista as diversas evidências verificadas nos relatórios técnicos que apontaram incidências de deslizamentos e erosões, estando o talude “descampado”, sem nenhuma proteção na superfície. Como possível causa deste modo de falha, atribuiu-se o efeito erosivo das ondas do lago e ação das intempéries no talude.

Conforme Miranda (2016) a proteção dos taludes é projetada para prevenir a erosão, vento, ondas e água de chuva. Existem dois tipos mais comuns de proteção usados em barragens de terra: Rip rap e cobertura vegetal (grama). Barbosa et. al (2012) complementam que as raízes da vegetação atuam como fibras que aumentam a resistência ao cisalhamento do solo.

Além destes, pode-se utilizar, o solo cimento, concreto, asfalto, concreto compactado a rolo (CCR) e etc. A escolha depende do custo e das condições no sítio da barragem. Um riprap é formado por uma camada de blocos de rocha (ou matacões e pedregulhos) colocada nos taludes de montante e jusante, geralmente sobre uma camada de transição de blocos menores, brita (ou pedregulho) e areia grossa.

A Figura 24 apresenta o esquema de um rip rap apropriadamente projetado e executado sobre o talude de montante.

Figura 24 – Esquema de rip rap executado em talude de montante.



Fonte: Miranda, 2016.

No aspecto de possibilidade de intervenção para sanar as causas deste cenário de modo de falha, considerou-se os procedimentos indicados pelo Relatório Técnico do projeto de recuperação da barragem (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013), listados a seguir:

- a) remoção da vegetação;
- b) conformação do talude para a inclinação mínima de 1:2,5 (V:H)
- c) proteção do talude com enrocamento tipo “rip-rap”, com camada de transição de espessura 20 cm (brita graduada) e camada de enrocamento com espessura de 60 cm, sendo esta espessura estendida até a cota correspondente a 1 metro abaixo do coroamento. Neste último metro, até a crista, a proteção será feita somente com revestimento com pedra marroada na espessura de 60 cm.

No relatório apresenta-se a ressalva de que, o reaterro do talude de montante para conformação na inclinação de projeto deve ser executado no período com níveis mínimos de água na barragem, ou seja, com parte dos taludes a seco.

4.3.1.2 Erosão interna (*piping*)

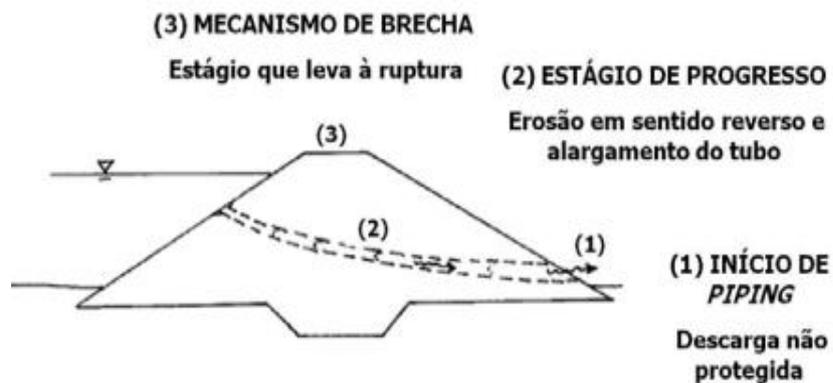
O segundo cenário de modo de falha apontando pela aplicação do FMEA foi a “Erosão interna ou *piping*” (NPR = 320). De acordo com análise do Relatório Técnico do projeto de recuperação da barragem (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013) foi verificada a ocorrência de surgências de água em alguns pontos próximos ao pé do talude de jusante, sendo que barragem Calumbi II não apresenta sistema de drenagem (filtros). No entanto há de se ponderar a questão de o reservatório estar, atualmente, operando no nível mínimo, o que

minimiza o potencial de ruptura por *piping* até que seja retomada a operação normal do reservatório.

De acordo com ANA (2016) surgências são ocorrências de água, por percolação que podem aflorar na face do paramento de jusante, nas ombreiras, no pé de jusante e na faixa logo a jusante do pé da barragem. Essa percolação de água pode ter as seguintes consequências: originar um processo *piping*, o qual é influenciado pelos tipos de solo (areia fina e silte de origem eólica, por exemplo, são altamente suscetíveis à erosão); proporcionar um gradiente hidráulico (quanto maior o gradiente, maior a possibilidade de erosão interna), tensões confinantes (quanto maior o valor da tensão confinante, menor a possibilidade da ocorrência da erosão) e etc.

Gomes (2019) explica que quando a água penetra no solo a partir de áreas mais elevadas, ela satura o maciço procura por trajetos de menor pressão, conhecidos como caminhos de percolação. Em alguns trechos, a força do fluxo pode ser tão intensa que o solo da barragem se torna saturado, e as partículas finas são carregadas juntamente com a água.

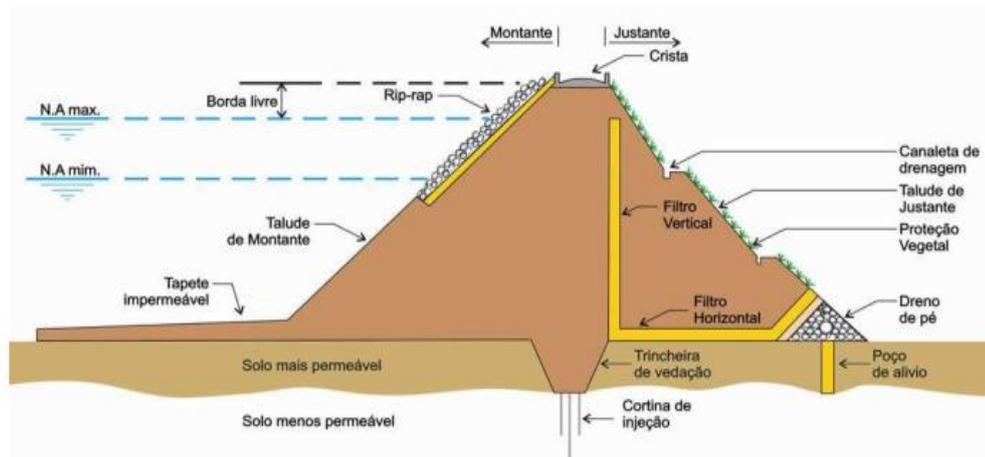
Figura 25 - Mecanismo de ruptura por *piping*.



Fonte: Foster *et al.*, 2000.

A Figura 26 apresenta um esquema de uma barragem de terra, onde podem ser verificados os filtros e os drenos, além de outros elementos.

Figura 26 – Esquema de uma barragem de terra com filtros e drenos.



Fonte: Carvalho, 2011.

De acordo com o Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem (2016), a percolação no corpo da barragem e na sua fundação pode ser controlada através de filtros e drenos internos (verticais ou inclinados), que interceptam e descarregam o fluxo de água com segurança; tapete horizontal; e dreno de pé. A ser detectada a surgência, durante a inspeção devem ser realizados os seguintes procedimentos:

- Localização os pontos de surgência;
- Medição as vazões e a turbidez da água;
- Registro da ocorrência de precipitação recente, que possa afetar a medição e a turbidez da água;
- Anotação do nível de água do reservatório no momento da medição da vazão;
- Observância se o reservatório é a fonte da percolação, pois o aumento da vazão com o nível do reservatório estabilizado é preocupante.

Caso haja a fuga de material, é indicado que:

- Verifique a granulometria do material carregado;
- A vazão seja medida;

O tratamento de surgências com carreamentos deve ser urgente sendo necessária a implementação de dreno invertido como medida corretiva (ICOLD, 2013). As etapas da execução de um filtro invertido envolvem lançamento de geotêxtil na área da surgência com folga lateral de 2m, aproximadamente; lançamento de uma camada de brita de pelo menos 1 m; lançamento de pedra de mão sobre a camada de brita. As possíveis jazidas destas matérias

devem ser mantidas na área do empreendimento para utilização destas situações de emergência (SAMARCO, 2014).

Como alternativa de intervenção para evitar a ocorrência de falha por *piping* na estrutura, o procedimento descrito no Relatório Técnico do projeto de recuperação da barragem (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013) recomendou a seguinte intervenção, visando o melhor funcionamento da barragem:

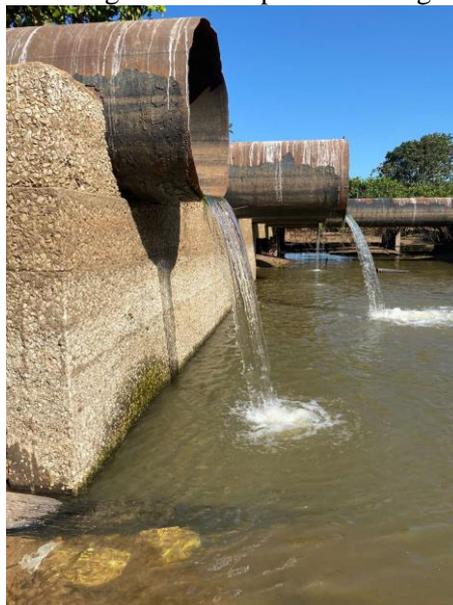
- a) restauração dos taludes de jusante com implantação de sistema de filtro, junto ao pé do talude para controle de percolações.

4.3.1.3 Galgamento

O galgamento da barragem foi selecionado como o terceiro possível modo de falha, (NPR =144), havendo duas possíveis causas: falhas no sistema extravasor ou por níveis de água excepcionais. Esta falha foi considerada pensando nos períodos futuros quando do retorno da operação do reservatório em níveis normais.

A barragem foi construída originalmente sem vertedouro, posteriormente quatro tubulações da Tomada de Água foram cortadas na altura do canal externo de drenagem, de maneira a funcionar como elementos extravasores (Figura 27). Assim, estas quatro tubulações não descarregam mais na Adutora e sim foram preparadas para funcionarem como descarregador de cheias.

Figura 27 – Tubulações da tomada d água cortadas para descarregamento de cheias (extravasores).



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Para sanar o problema com as estruturas extravasoras, pode-se considerar a solução indicada no Relatório Técnico do projeto de recuperação da barragem (GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS, 2013), que considerou a construção de uma estrutura vertente, de soleira fixa, tipo caixa retangular de concreto dimensionada em condições de permitir o trânsito das enchentes com utilização das tubulações ali existentes e que fazem a transposição do maciço da barragem, descarregando no canal externo de drenagem. Ou seja, o sistema vertente contaria com as tubulações e mais o vertedouro.

A capacidade de descarga da estrutura do vertedouro foi definida no relatório, conforme a seguir:

- a) Cota de coroamento da Barragem = 195,00
- b) Vazão da cheia deca milenar = 27,8 m³s (conforme Estudos Hidrológicos RT 04);
- c) Comprimento da estrutura vertente = 27 metros, a ser incorporada na Tomada d'água.

Como segundo procedimento, o relatório recomendou a melhoria na região da tomada d'água, a saber:

- a) Remoção de 11 (onze) comportas DN 1.200 mm, com haste de acionamento e pedestal de manobras;
- b) Recuperação da estrutura de concreto armado, associada ao sistema de comportas de montante;
- c) Instalação de 6 (seis) novas comportas, DN 1.200 mm, em substituição às existentes, bem como de seus sistemas de acionamento (hastes, pedestal, redutores e volantes).

4.4 ANÁLISE CRÍTICA DA GESTÃO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO

A partir de 2010 no Brasil, com a criação da Lei da Política Nacional de Segurança de Barragem, os empreendedores tiveram que se adequar às exigências da Lei federal, quanto a adoção dos instrumentos legais previstos, os que se destacam: Plano de Segurança da Barragem, incluído o PAE (redação dada pela Lei nº 14.066, de 2020); Relatório de Segurança de Barragens e monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência (incluído pela Lei nº 14.066, de 2020). Com este novo cenário a implementação de uma gestão de segurança de barragem dentro da organização passou a ser mandatória.

A lei atualizada (Lei nº 14.066, de 2020) explicita ainda dentre os seus fundamentos (Art. 4º), que o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, pelos danos

decorrentes de seu rompimento, vazamento ou mau funcionamento e, independentemente da existência de culpa, pela reparação desses danos.

Ocorre que o caso da barragem Calumbi II e das demais barragens que compõem o Projeto Rio Formoso não estão adequadas a Lei federal que já completa 13 anos de existência; consequentemente estas estruturas ficam vulneráveis à deterioração que podem levar ao aumento potencial de falhas estruturais e operacionais. A barragem em estudo apresenta um cenário preocupante em relação aos aspectos da gestão da segurança, com base nas seguintes informações averiguadas por meio da pesquisa:

a) A barragem não possui PSB e nem PAE, conforme verificado no SINISB (2023). A nova Resolução ANA no. 121/2022 exige ainda que no Capítulo VI do PAE destas barragens, deve estar contida a identificação e a avaliação de riscos. Como a barragem Calumbi II não tem nem PSB, consequentemente, não estão disponíveis estes estudos.

b) O órgão fiscalizador que deveria realizar inspeções regulares anuais, conforme exigido pela Resolução ANA no. 236/2017 (atualizada pela Resolução ANA no. 121/2022) somente elaborou dois destes documentos, sendo o primeiro no ano de 2018 (NATURATNS, 2018) e o segundo em 2019 (NATURATINS, 2019). Nos relatórios consta apenas a classificação da categoria de risco e do dano potencial da barragem, que são obtidos conforme os critérios da Portaria estadual NATURATINS no. 483/2017 (a qual acompanha os critérios definidos na Resolução do CNH no 143/2012).

c) Nos relatórios supracitados do órgão fiscalizador, consta que o empreendedor não aplica nenhum procedimento de monitoramento e inspeção nas estruturas, e que não existe equipamento de monitoramento em operação, além de não existir responsável técnico pela segurança do empreendimento.

d) O governo do estado, no ano de 2012, através da Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário, chegou a contratar e receber os Projetos de Revitalização visando sanar as anomalias e surgências identificadas nos Relatório Técnicos (ver quadro 4), no entanto, tais obras de revitalização não foram realizadas até o momento.

e) Em 2013, o DIRF (Distrito de Irrigação Rio Formoso), associação civil de direito privado sem fins lucrativos, informou à ANA (por meio do Ofício 04/2013 DIRF) que assumiria progressivamente a operação e a manutenção das estruturas do Projeto Rio Formoso. No entanto, conforme MPF-TO (2019), as barragens ainda são de domínio do governo do Estado do Tocantins e por isso o DIRF tem atuado apenas como parceiro nas ações relacionadas à gestão da segurança.

Diante do exposto, vale destacar a atuação do MPF-TO que em 2019 instaurou um procedimento extrajudicial para monitorar as barragens do Complexo, pois existe grande preocupação com o estado de conservação das estruturas. Principalmente, na época das chuvas.

De acordo com o DIRF (MPF-TO, 2022) desde 2017, foram definidas cotas máximas de acúmulo de água para irrigação, sendo que todas as cotas operam dentro dos limites de segurança estabelecidos. As medidas são de três 3 m para Taboca, 1,75 m para a de Calumbi I e 2,36 m em Calumbi II.

Por todo o exposto, é possível afirmar que existe uma ineficácia na gestão da segurança da barragem Calumbi II, assim como das demais estruturas que compõem o Projeto Rio Formoso, sendo este um dos maiores empreendimentos de irrigação do Brasil.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento da pesquisa foi possível verificar que a barragem Calumbi II apresenta várias patologias e anomalias que colocam a segurança da estrutura em risco, mesmo que a estrutura esteja funcionando nos níveis mínimos de operação. Os problemas verificados correspondem desde ausência de manutenção dos taludes e da crista, onde foram observadas a presença de árvores de grande porte e vegetação arbustiva, até problemas mais críticos tais como, fendas de retração, erosões com redução da seção dos taludes e surgências.

Partindo para a avaliação dos modos de falhas simulados para a barragem foi verificado que o cenário de maior risco seria a “falha por instabilidade de talude de montante” (NPR=336), devido ao efeito erosivo das ondas do lago e ação das intempéries no talude. A forma de intervenção indicada, conforme projetos de revitalização seria a remoção da vegetação; conformação do talude para a inclinação mínima de 1:2,5 (V:H) e a proteção do talude com enrocamento tipo “rip-rap”.

O segundo cenário de modo de falha identificado foi o “*piping*” (NPR=320), sendo listado como uma preocupação devido a inexistência de filtros no maciço. Vale ressaltar que esta falha foi considerada, caso o reservatório volte a funcionar com os níveis operacionais normais, haja vista que o *piping* é condicionado a existência de surgências, por percolação que podem aflorar na face do paramento de jusante, nas ombreiras, no pé de jusante e na faixa logo a jusante do pé da barragem. A intervenção indicada nos projetos de revitalização seria a restauração dos taludes de jusante com implantação de sistema de filtro, junto ao pé do talude para controle de percolações.

Como terceiro modo de falha, porém mais remoto está o galgamento da barragem (NPR=144) que poderia ser causado principalmente por falhas no sistema extravasor. Ressalta-se que este cenário só poderia ser possível, caso a barragem retornasse ao seu funcionamento nos níveis normais. O projeto de revitalização considerou como intervenção a construção de uma estrutura vertente, de soleira fixa, tipo caixa retangular de concreto dimensionada em condições de permitir o trânsito das enchentes com utilização das tubulações existentes fazendo a transposição da barragem, descarregando no canal externo de drenagem. Outra opção apontada foi a remoção de 11 comportas, recuperação da estrutura de concreto, associada ao sistema de comportas de montante e instalação de 6 novas comportas em substituição às existentes.

Outra conclusão importante refere-se aos índices de detecção determinados na tabela FMEA, os quais foram classificados como baixo ou remoto, haja vista a inexistência de monitoramento da barragem pela falta da instrumentação. Ou seja, a detecção de falhas é precária, dependendo de inspeções visuais apenas. Por todo o exposto ficou evidente a vulnerabilidade da barragem, havendo ausência de gestão de segurança, uma vez que a barragem não possui PSB, PAE, não apresenta instrumentação, não conta com um responsável técnico formal pela segurança da barragem, não dispõe de estudos de avaliações de riscos. Além de que a barragem não recebe inspeções regulares por parte do órgão fiscalizador, sendo as últimas campanhas realizadas em 2018 e 2019

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a importância do tema para estudos na área de gestão de segurança de barragens, indicam-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- ✓ 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 de severidade, ocorrência e detecção nas barragens que fazem parte do Projeto de Irrigação Rio Formosos Calumbi I e Taboca, como forma de visualizar os modos de falhas e patologias existentes nessas barragens.

REFERÊNCIAS

ADAMO, Nasrat et al. Risk Management Concepts in Dam Safety Evaluation: Mosul Dam as a Case Study. **Journal of Civil Engineering and Architecture**. Vol. 11 (2017), p. 635-652.

AGÊNCIA SENADO. Brasil tem nova lei de segurança de barragens. 1 out. 2020. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/10/01/brasil-tem-nova-lei-de-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 10 out. 2020.

AGUIAR, Daniel Prenda de Oliveira. **Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB**. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais. Campinas, 2014. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258108/1/Aguiar_DanielPrendadeOliveira_M.pdf. Acesso em: 16 jul. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Relatório de Segurança de Barragens (RSB), Brasília, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Região hidrográfica Tocantins-Araguaia**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/tocantins-araguaia>. Acesso em: 25 jul. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Saiba Mais - Tocantins**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/tocantins/saiba-mais-tocantins>. Acesso em: 25 jul. 2020.

(AIAG), A. I. A. G. Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): Reference Manual. 4a. ed. [s.l: s.n.].

AGARWALA, A. S. Shortcomings in MIL-STD-1629A Guidelines for Criticality Analysis. PROCEEDINGS Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium, p. 494–496, 1990

DUARTE JUNIOR, N. de S. F. **A Gestão de Riscos do Ponto de Vista da Complexidade**. Banas Qualidade, n. 233, Ano XXI, out. 2011. Mensal.

ARRUDA, T. J., VALDEVINO, A. F. O polo agropecuário de Formoso do Araguaia/TO e sua relação espacial com os estados vizinhos. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional G&DR** 2014; v. 10, n. 4, p. 362-386.

BAIMA, Sandra Keyla de Olivera; SANTOS, José Nilson Bezerra. Classificação de risco de barragens por índices de risco – um estudo de caso. **Geotecnia**. N.º 132 – novembro/noviembre 2014 – pp. 151-174. Disponível em: <https://spgeotecnia.pt/uploads/jgeot201413209.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2020.

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

BASSO, Ana Paula; REZENDE, Elcio Nacur; PADILHA, Norma Sueli. **Direito e sustentabilidade I** [Recurso eletrônico on-line] organização CONPEDI. Florianópolis: CONPEDI, 2017. Disponível em: <http://conpedi.danilolr.info/publicacoes/roj0xn13/5n13472j/ZPJ95gUA9VB375u7.pdf>. Acesso em: 11 out. 2020.

BRASIL. ANA - Agência Nacional do Águas. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens** – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastr/barragens/inspecao/ManualdeSegurancaeInspecaoBarragens.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2020.

BRASIL. ANA - Agência Nacional do Águas. **Curso Segurança de Barragens**. Módulo II: Inspeção e auscultação de barragens. Unidade 2: Instrumentação de barragens. 2012. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/conhecercerh/bitstream/ana/110/24/Unidade_2-modulo2.pdf. Acesso em: 9 ago. 2020.

BRASIL. ANA - Agência Nacional do Águas. **Instruções para Apresentação do Plano de Segurança da Barragem**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/instrucoes-para-apresentacao-plano-seguranca-barragens>. Acesso em: 9 ago. 2020.

BRASIL. ANA - Agência Nacional do Águas. **Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens** -- Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/volume-vii-diretrizes-para-a-elaboracao-do-plano-de-operacao-manutencao-e-instrumentacao-de-barragens>. Acesso em: 10 ago. 2020.

BRASIL. ANA - Agência Nacional do Águas. **Relatório de Segurança de Barragens** – Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017 84 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017/rsb-2017-versao-enviada-ao-cnrh.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2020.

BRASIL. ANA - Agência Nacional do Águas. **Relatório de Segurança de Barragens** – Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2020, 125 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Guia de orientação e formulários para inspeções de segurança de barragem**. Brasília: ANA, 2016. 218 p., il. (Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, 2).

BRASIL. **Lei Nº 12.334 de 20 de setembro de 2020**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm. Acesso em: 15 jul. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de

setembro de 2010. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231. Acesso em: 14 jul. 2020.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015**. 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. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015696.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2020.

BRASIL. **Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017**. Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/236-2017.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2020.

BRASIL. Conselho Ministerial de Supervisão de Respostas a desastres. **Resolução nº 1, de 28 de janeiro de 2019**. Recomenda ações e medidas de resposta à ruptura da barragem do Córrego do Feijão, no Município de Brumadinho, Estado de Minas Gerais. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/60916868. Acesso em: 16 jul. 2020.

BRASIL. Conselho Ministerial de Supervisão de Respostas a desastres. **Resolução nº 2, de 28 de janeiro de 2019**. Institui o Subcomitê de Elaboração e Atualização Legislativa, com o objetivo de elaborar anteprojeto de atualização e revisão da Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/60916871. Acesso em: 16 jul. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Moção nº 72 de 29 de janeiro de 2019**. Recomenda ações e medidas para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/61137606. Acesso em: 16 jul. 2020.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Secretaria de Infraestrutura Hídrica, 2002. 148p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/inspecao/ManualdeSegurancaeInspecaoodeBarragens.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2020.

BRASIL. **Lei nº 14.066 de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#:~:text=%C2%A7%201%C2%BA%20O%20SNISB%20comprende,sobre%20acidentes%20e%20sobre%20desastres. Acesso em: 10 out. 2020.

BRIZ, E. M. S. **Perspectiva histórica das políticas hidráulicas no Brasil e na Espanha.** Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

CALDEIRA, Laura; ESPÓSITO, Terezinha. Gestão de segurança de barragens: cenários e perspectivas das legislações portuguesa e brasileira. **COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade.** © 2010 ABMS. Disponível em: <http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/bitstream/123456789/1000747/1/cobramseg%202010%203.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2020.

CARVALHO, David de; FILHO PASCHOALIN, João Alexandre: **Estudo da estabilidade de pequenas barragens de terra compactadas em três teores de umidade.** *Exacta*, núm. 2, novembro, 2004, pp. 55-68. Disponível em: <http://geoconceitoengenharia.com.br/images/PDF/ESTABILIDADE/Estudo-da-estabilidade-de-pequenas-barragens-de-terra-compactadas-em-tres-teores-de-umidade.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2020.

Carvalho, D. **BARRAGENS: UMA INTRODUÇÃO PARA GRADUANDOS.** Campinas. 473 p., 2011.

CARVALHO, R.B. **Aplicação de ferramenta de gestão de riscos em Plano de ação de emergência de usina hidrelétrica.** Programa de pós-graduação em engenharia de barragem e gestão ambiental - PEBGA, Universidade Federal do Pará, 2022.

Chen, S.C., Lin, T.W., Chen, C.Y., 2015. **Modeling of natural dam failure modes and downstream riverbed morphological changes with different dam materials in a flume test.** *Eng. Geol.* 188, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.016>.

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. **A legislação de segurança de barragens: Um breve histórico e desafios.** Disponível em: <http://cbdb.org.br/a-legislacao-de-seguranca-de-barragens-um-breve-historico-e-desafios>. Acesso em: 26 set. 2020.

CIP-BRASIL. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.

COLLE, Gisele de Andrade. **Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança.** Universidade Federal do Paraná. Dissertação de mestrado de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/19150/Metodologias%20de%20analise%20de%20risco%20para%20classificacao%20de%20barra.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jul. 2020.

DENEALE, Scott T et al. **Current State-of-Practice in Dam Safety Risk Assessment.** Dez. 2019. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1592163>. Acesso em: 29 jul. 2020.

DIAS, Marcus Vinícius Lima. **Avaliação da Segurança de Barragens por meio da Análise de Instrumentação Geotécnica.** Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em:

[https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/397/1/MONOGRAFIA_Avalia%
7%c3%a3oSeguran%c3%a7aBarragens.pdf](https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/397/1/MONOGRAFIA_Avalia%c3%a7%c3%a3oSeguran%c3%a7aBarragens.pdf). Acesso em: 9 ago. 2020.

DONELLY, C. Richards. Assessing the safety and security of dams. **International Conference on Safety & Security of Energy Infrastructures in a Comparative View (SEIF-CV)** 14-16 November 2005.

DUARTE, A.P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento Agroecológico do Estado do Tocantins**. Disponível em: <http://www.zaeto.cnpm.embrapa.br/baci.html> Acesso em: 14 jul. 2020.

ESPÓSITO, T.; PALMIER L. R. **Application of risk analysis methods on tailings dams**. *Soils and Rocks*, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 97-117, jan-abr. 2013.

FAO. **Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para a localização, projeto e construção**. Roma: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. 2011, 120p. (Publicação da FAO sobre Rega e Drenagem, nº 64).

FERRARA, Marina. **Vade Mecum de Barragens**. 2. Ed. Belo Horizonte: Insight Educação Executiva, 2021.

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.

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. Disponível em: https://pei.ufba.br/sites/pei.ufba.br/files/dissertacao_marcus_nicholas_rev_21-02-2018_correcao_pos_rev_banca_01.pdf. Acesso em: 28 jul. 2020.

FONSECA, Bruno. **Faltam dados básicos no sistema nacional que orienta as políticas de segurança contra acidentes como o de Brumadinho**. 3 jan. 2019. Disponível em: <https://apublica.org/2019/01/brasil-registra-mais-de-tres-acidentes-em-barragens-por-ano/> . Acesso em: 29 set. 2020.

FONTENELLE, Mariana Campos et al. Avaliações de risco em barragens: estudo de caso da barragem malcozinhado no Nordeste brasileiro. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Vol 14 - nº 1 (2017-2018), p. 25-42.

FRAGOSO, D.B, EVANGELISTA, B. A., CAETANO, G. F., ALVES CARDOSO, E. **Análise do regime pluviométrico da região do projeto rio formoso em formoso do Araguaia-To**. *Agri-environmental sciences*, 2021;7(2), 14. Disponível em:

<https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/article/view/5442>. Acesso em: 10 dez. 2021.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins. **Relatório RT 08: Análise e Avaliação dos Estudos, Projetos e Programas Referentes à Revitalização do Projeto Rio Formoso**. Palmas: Julho/2012.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins. **Relatório Técnico RT-12 Projeto Executivo de Recuperação das Barragens - Volume 3: Barragem Calumbi II - Tomo I: Memorial Descritivo**. Palmas: Agosto/2013.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins. **Relatório Técnico RT-12 Projeto Executivo de Recuperação das Barragens - Volume 3: Barragem Calumbi II - Tomo II: Peças gráficas**. Palmas: Agosto/2013.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins. **Relatório Técnico RT-05 Solicitação de outorga do direito do uso da água Volume I Grupo Obras Civas não Lineares: Barragens Taboca Calumbi I e Calumbi II**. Palmas: Agosto/2013.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins. **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EXECUTIVO - Volume 2: Peças Gráficas Tomo I – Parte 3: Barragem Calumbi-II**. Palmas: Agosto/2013.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Secretaria de Agricultura, Pecuária e desenvolvimento Agrário do estado de Tocantins. **RELATÓRIO TÉCNICO RT 08 – Análise e Avaliação dos Estudos, Projetos e Programas referentes a Revitalização do Projeto Rio Formoso**. Palmas: Julho/2012.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Instituto Natureza de Tocantins. **Relatório de inspeção de segurança de barragens**. Palmas: Nov/2018.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Instituto Natureza de Tocantins. **Relatório de inspeção de segurança de barragens**. Palmas: Nov/2019.

GUARDA, Patrícia Martins. **Avaliação do impacto ambiental de um projeto agrícola na região de Formoso do Araguaia, na qualidade e biodiversidade do rio formoso**. Tese (Doutor em Biodiversidade e Conservação ou Biotecnologia)-Universidade Federal do Tocantins, 2020. Disponível em: <http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/2185>. Acesso em: 10 dez. 2021.

GRANEMANN, Daniel Carvalho. Identificação e análise de riscos em levantamentos topográficos de barragens de usinas hidrelétricas: estudo de caso na UHE Salto Caxias. **Bol. Ciênc. Geod.** Curitiba, 2010; vol. 16, n. 4, p. 609-622. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198221702010000400008&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 ago. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. Tocantins. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/formoso-do-araguaia>. Acesso em: 11 maio. 2023.

ICOLD EUROPEAN GROUP. **Dam legislation**. Working Group on Dam Legislation. Final Report. 2018. Disponível em: <https://britishdams.org/assets/documents/News%20Item%20Docs/2018/ICOLD%20EurClub%20-Dam%20Legislation%20Report%20-%20Dec%202017.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2020.

<https://www.icold-cigb.org/> 2023

ABNT. Gestão de Riscos – Princípios e diretrizes. NBR ISO 31000. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2018.

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. **Avaliação de segurança em barragens de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE – São Simão**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FRPC-78HHUG/1/josias_eduardo_rossi_ladeira.pdf. Acesso em: 30 jul. 2020.

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

MARIA DA COSTA, T.; SOARES, Q. **Análise da eficácia da aplicação da Metodologia FMEA do Processo- Caso de estudo numa empresa certificada**. p. 104, 2014.

MELO, Alexandre Vaz de. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9RWH45/1/geotecniatransportes_alexandrevazmelo_dissertacao.pdf. Acesso em: 21 jul. 2020.

MELO, Alexandre Vaz de; FUSARO, Teresa Cristina. **Avaliação de métodos de análise de riscos aplicados a barragens**. Comitê Brasileiro de Barragens. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu – PR. 12 a 14 de maio de 2015.

MENEZES, Daisy Shaianne Araújo Borges de. **Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água: Estudo de caso Barragem Santa Helena BA**. Dissertação de Mestrado. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2016.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J1739: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Modes and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), and Potential Failure Modes and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)**. SAE International: Warrendale, 2009.

TOCATINS (Estado). Ministério Público Federal. **Ministério Público monitora segurança de barragens na bacia do Rio Formoso**. Tocantins: MPFTO, c2022. Disponível em: <https://mpto.mp.br/caop-do-meio-ambiente/2022/01/31/ministerio-publico-monitora-seguranca-de-barragens-na-bacia-do-rio-formoso>. Acesso em: 04 agost. 2023.

TOCATINS (Estado). Ministério Público Federal. **Relatório do MPTO aponta falhas na estrutura do projeto Rio Formoso e omissão do Estado em implementar Política de Segurança de Barragens**. Tocantins: MPFTO, c2019. Disponível em: <https://www.mpto.mp.br/portal/2019/07/16/relatorio-do-mpto-aponta-falhas-na-estrutura-do-projeto-rio-formoso-e-omissao-do-estado-em-implementar-politica-de-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 04 agost. 2023.

MIRANDA, Antônio Nunes: AGENCIA NACIONAL DE AGUAS - ANA. **Curso de Inspeção e Segurança de Barragens**. FUNDAÇÃO PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU, 2016.

MOECKE, Geórgia Cleto. **Análise da classificação quanto ao dano potencial associado de 15 barragens com base nos resultados de 90 cenários de ruptura**. Universidade Federal do Ceará. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade. Área de concentração: Geotecnia. Fortaleza, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/49955/3/2019_dis_gcmoecke.pdf. Acesso em: 18 jul. 2020.

MUSSATO, Mateus. **Levantamento de dados para avaliação da segurança das barragens de abastecimento de água de Caxias do Sul/RS: barragens do faxinal e da Maestra**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

NETTO, Arthur Sausen. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra: abordagem determinística e probabilística**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019. Disponível em: https://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15712/1/GP_COECI_2019_2_03.pdf. Acesso em: 8 ago. 2020.

NEVES, Luiz Paniago. **Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves>. Acesso em: 15 jul. 2020.

OLIVEIRA, Flávio Santos et al. **Análise de falhas na avaliação de risco de água de abastecimento de Campina Grande/PB**. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Vol. 3: Congestas 2015. Disponível em: <http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2015/trabalhos/pdf/congestas2015-et-08-018.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2020.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. **Contribuição para a verificação e controle de segurança de pequenas barragens de terra**. Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto, 2008.

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 – FaEnge – 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.

PERSECHINI, Maria Inês Muanis et al. Banco Mundial. **Segurança de barragens: engenharia a serviço da sociedade.** Brasília, 2015. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/outros/serie-agua-brasil-do-banco-mundial-11-seguranca-de-barragens. Acesso em: 15 jul. 2020.

PIMENTA, L.; CALDEIRA, L.; NEVES, E.M. A new qualitative method for the condition assessment of earth and rockfill dams. **Structure and Infrastructure Engineering**, 2013; 9:11, 1103-1117 Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15732479.2012.667418>. Acesso em: 10 dez. 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORMOSO DO ARAGUAIA. **Geografia.** Disponível em: <https://www.formosodoaraguaia.to.gov.br/>. Acesso em: 14 nov. 2021.

Safety of Dams: A Pathological Approach of Qualitative and Quantitative Risks
Flavio Augusto Settimi Sohler^{1, 2} and Laura Maria Mello Saraiva Caldeira³

SAMPAIO, Marcos Vinicius Nunes. **Segurança de barragens de terra: um relato da experiência do Piauí.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2014. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11447/1/2014_dis_mvnsampaio.pdf. Acesso em: 3 ago. 2020.

SAMPAIO, José Adércio Leite. As deficiências do plano de ação emergencial das barragens no Brasil. **Revista Brasileira de Direito.** 2016, vol. 12, n. 2, p. 7-17.

SANTOS, Ricardo Correa. **Enquadramento das análises de riscos em Geotecnia.** Universidade Nova de Lisboa. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL) para obtenção do grau de Mestre em Geotecnia para Engenharia Civil. Lisboa, 2006.

SILVA, João Pedro Gaio Fonseca Alves da. **Gestão de riscos aplicada a uma infraestrutura de armazenamento de resíduos mineiros.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia). Lisboa, 2015. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/18302/1/Silva_2015.pdf. Acesso em: 30 jul. 2020.

SILVA, R. A., RIES, E. S., MACIEL, G. F. Tendências da temperatura anual No Estado do Tocantins. **Nativa**, 2020; 8(4), 544-551. Disponível em:

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/8523>. Acesso em: 10 dez. 2021

SILVEIRA, João Francisco Alves. **A análise de risco aplicada a segurança de barragens de terra**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2002.

SILVIANITA et al. Hazard and Operability Analysis (HAZOP) of Mobile Mooring System. **Procedia Earth and Planetary Science**. Vol. 14 (2015) 208 – 212.

SOUZA, Thiago Coutinho de et al. Métodos de análise de risco: aplicabilidade e limitações no gerenciamento de riscos associados a barragens. **II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos – SGBR**. Maio, 2017.

STEPHENS, Tim. **Manual sobre pequenas barragens de terra**. Guia para a localização, projeto e construção. 2011. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/administracao/construcoes/livros/MANUAL%20SOBRE%20PEQUENAS%20BARRAGENS%20DE%20TERRA%20PEIXES.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Su H, Wen Z, Qian C. **Cellular automata-based analysis for seepage failure process of earth-rock dam**. *Struct Control Hlth* 2020; 27: e2553.

TANUS, Henrique Moraes. **Importância da inspeção na prevenção de falhas em barragens: estudo de caso**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023356.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2021.

TIMBÓ, Rafael Delmiro Rodrigues. **Aplicação da lei de segurança de barragem – estudo de caso da barragem Cigana 01 – Amajari – Roraima**. Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2018.

TOCANTINS. Instituto Natureza do Tocantins – Naturatins. **Portaria NATURATINS nº 483 de 18 de dezembro de 2017**. Regulamenta as ações pertinentes à segurança de barragens outorgadas pelo NATURATINS e dá outras providências. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=354351>. Acesso em: 16 jul. 2021.

TOCANTINS. Relatório De Inspeção De Segurança De Barragens Nº: 43-2019, 2019.

VIANNA, Luiz Felipe Venturi. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://posgrad.etg.ufmg.br/wp-content/uploads/2016/12/diss-059.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

VITO, Marco de; SILVEIRA, Rafael Ribeiro; BEEKMAN, Gertjan. Adaptação da metodologia legal da classificação por categoria de risco – CRI e dano potencial associado – DPA para fins gerenciais. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**. 2029, ano V, n. 7.

ZUFFO, Monica Soares Resio. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens / Monica Soares Resio Zuffo**. Campinas, SP: [s.n.], 2005. Disponível em:

http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257858/1/Zuffo_MonicaSoaresResio_M.pdf.
Acesso em: 10 ago. 2021.

ZUFFO, Monica Soares Resio; GENOVEZ, Ana Inez Borri. **A segurança de barragens sob a ótica de algumas legislações internacionais.** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2005. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/110/83febc80fd96eb2a085eb446a6d67f_91d7cf52cc8ab4c51a6ad4f500abe9cc.pdf. Acesso em: 28 set. 2021.

APENDICE A – Tabela FMEA preenchida para o estudo de caso.

MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	SEVERIDADE (S)	JUSTIFICATIVA (S)	CAUSAS	OCORRÊNCIA (O)	JUSTIFICATIVA (O)	CONTROLE	TIPO CONTROLE	PROBABILIDADE DE DETECÇÃO (D)	JUSTIFICATIVA (D)	NPR
Galgamento da barragem	Formação de processos erosivos com progressão de abertura de brecha	9 (Muito grave)	A severidade do galgamento foi considerada muito grave, uma vez que, segundo Fao (2011) este fenômeno ocorre quando caudais de cheia excessivos passam sobre o aterro por causa da insuficiente capacidade do descarregador/vertedor, ocorrendo então, segundo Lara (2016) um processo de erosão do talude, que inicia na face de jusante do corpo da barragem, e essa passagem da água faz com que o talude eroda progressivamente em direção ao centro do corpo da barragem, alargando a brecha de ruptura. Complementa-se que a barragem Calumbi II possui volume total acumulado de aproximadamente 93 milhões de m ³ , em cota normal de operação, sendo portanto, classificada como um reservatório de grande volume (75 milhões a 200 milhões m ³) (3), segundo critérios da portaria	Falhas nos sistema extravasor	2- Remoto (0,1% a 1%)	Considerou-se remoto o galgamento por falha no sistema de vazão, haja vista que o reservatório opera a níveis mínimos. No entanto, os relatórios de inspeção da NATURATINS (2018) e (2019) identificaram que o vertedouro da barragem possui comportas metálicas para controle das tubulações deterioradas em estado avançado com peças quebradas, enferrujadas e com a estrutura de concreto com ferragens expostas. Ainda, duas comportas apresentavam condições para operação e as demais exibiam seus registros manuais danificados, e a existência de comportas soterradas. Em 2021, após vistoria desta autora no local, foi verificada a permanência dos problemas citados no relatório.	Inspeção visual e Monitoramento da vazão	Detecção	8 - Remoto	A detecção de uma falha por galgamento devido a falhas no sistema extravasor foi considerada remota, tendo em vista que, segundo relatórios de inspeção do NATURATINS (2018) e (2019), o empreendedor não aplicava nenhum procedimento para monitoramento e inspeção das estruturas, não havendo nenhum equipamento de monitoramento da barragem, instalado no local no referido período. Ainda, conforme os mesmos relatórios, em termos de recursos humanos, a barragem não possui estrutura organizacional e nem responsável técnico pela segurança do empreendimento. A ocorrência de galgamento é considerada remota conforme afirma ANA (2016) quando o crescimento de árvores e arbustos em taludes de montante e jusante e em áreas a jusante da barragem, deve ser evitado pois o mesmo dificulta o levantamento e inspeção das estruturas e áreas adjacentes, visualização de fissuras,	144

			Naturatins n.º483/2017 e resolução 143/2012 CNRH						afundamentos, deflexões, mau funcionamento do sistema de drenagem e outros sinais de perigo.		
Escorregamentos (deslizamentos), e deslocamento de Taludes	Instabilidade de talude	8 (Grave)	Segundo (ANA) 2016, a ocorrência de deslizamentos e deslocamentos está relacionada a instabilidade dos taludes, sendo esta agrupada em duas categorias a de ruptura superficial e ruptura profunda. A ruptura superficial pode ocorrer no talude de montante ou de jusante ocasionando rebaixamento rápido com deslizamentos superficiais, que não causa ameaça a integridade da barragem, mas pode gerar obstrução da tomada de água e deslizamentos progressivos provocando perda de resistência do maciço. E a ruptura profunda	Ausência de drenagem superficial	7 Provável (10% a 20%)	A ocorrência foi considerada frequente, uma vez que, Conforme os Relatórios técnicos do GOVERNO DO TOCANTINS (2013) e do NATURATINS (2018) e (2019) foram identificados escorregamentos expressivos (desbarramentos) no talude de montante. Foram verificados Abatimentos em locais, provavelmente provenientes da ação de intempéries com infiltração da água do reservatório. Pontos de escorregamentos nos taludes de montante.	Inspeção visual	Deteção	6 - Baixo	Considerou-se a detecção tendo em vista ausência de ano de monitoramento ou de inspeção para a em. Além de que, de com os relatórios de do NATURATINS e (2019) não existe uma ra organizacional ou um sável técnico pela nça da barragem. O endedor possui apenas um nário que reside na cidade alização da barragem mas técnico em segurança de ens.além disso, não realiza imentos de roteiros de es de de monitoramento. fator que impede a ão conforme afirma ANA é o crescimento de arvores stos em taludes de montante e em áreas a jusante da em, deve ser evitado pois o b dificulta o levantamento e ão das estruturas e áreas tes, visualização de s, afundamentos, deflexões,	336

			que pode causar a integridade da barragem, por meio de talude de deslizamento ingreme, movimento rotacional e horizontal bem definido e fissuras. Já Fao (2011) define Abatimento e deslizamento ocasionalmente poderão ocorrer normalmente se o resultado de materiais for de má qualidade, vertentes demasiado inclinadas, drenagem inadequada e/ou infiltração excessiva. Se grave, a estabilidade da barragem pode ser afetada e é então muito importante baixar o nível da água no reservatório logo que possível.						ncionamento do sistema de em e outros sinais de		
Erosão Interna	Piping	10 (Catastrófico)	.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 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	Falaha no sistema de drenagem interna (filtros)	4 - Ocasional (1% a 10%)	De acordo com o Projeto Executivo de Recuperação da Barragem Calumbi II (GOVERNO DE TOCANTINS, 2013) foi observada a ocorrência de diversos pontos próximos ao pé do talude de jusante em que são observadas surgências de água, não tendo sido evidenciada nas inspeções e investigações realizadas, a existência de “filtros” no maciço. Conforme Lauriano (2009), os problemas de infiltração e entupimento do sistema de drenagem interno de uma barragem de terra, geram brechas que se iniciam como pontos de vazamento e crescem a partir do ponto	Análise da instrumentação (Medidor de vazão e Piezômetro) e inspeções visuais	Detecção	8 - Remoto	Considerou-se a detecção muito remota, já que de acordo com os relatórios de inspeção do NATURATINS (2018) e (2019), o empreendedor não aplica nenhum procedimento para monitoramento e inspeção das estruturas, não havendo equipamentos de monitoramento instalados no local, no referido período. Vale ressaltar que em maio de 2021, após verificação in loco da própria autora desta pesquisa, foi identificada a instalação de piezômetros no corpo da barragem, porém instrumenots sem	320

			estabilidade, o sistema de drenagem interna (se houver) e a segurança como um todo da obra e da região de jusante.			de surgimento (piping).Em 2019, na etapa de inspeção do NATURATINS, os fiscais identificaram novamente a ocorrência de surgências no talude de jusante.			funcionamento, conforme informado pelo técnico da DIRF que acompanhava a vistoria. Ainda, em termos de recursos humanos, a barragem não possui estrutura organizacional e nem responsável técnico pela segurança do empreendimento; o empreendedor possui apenas um funcionário que reside na cidade, mas não é técnico em segurança de barragens. A ocorrência foi considerada remota, pois segundo afirma ANA (2016) o crescimento de árvores e arbustos em taludes de montante e jusante e em áreas a jusante da barragem, deve ser evitado pois o mesmo dificulta o levantamento e inspeção das estruturas e áreas adjacentes, visualização de fissuras, afundamentos, deflexões, mau funcionamento do sistema de drenagem e outros sinais de perigo.	
--	--	--	--	--	--	---	--	--	---	--