RGe ISSN: 2177-3246

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DE UMA BARRAGEM DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA

ANALYSIS OF FAILURE MODES OF A WATER STORAGE DAM

ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLA DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

10.56238/revgeov17n6-041

Daniel de Carvalho Santos
Mestrando em Engenharia Civil
Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
E-mail: carvalho-daniel@hotmail.com

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira
Doutorado em Engenharia Civil
Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
E-mail: sieira@eng.uerj.br

RESUMO
O artigo apresenta os resultados da investigação dos modos potenciais de falha de uma barragem de terra destinada ao armazenamento de água através da ferramenta Potential Failure Mode Analysis (PFMA), com foco na avaliação da segurança e na melhoria da gestão de riscos. O estudo baseia-se na revisão de conceitos de segurança de barragens e mecanismos de ruptura. A abordagem da PFMA permite identificar e avaliar, de forma sistemática, cenários possíveis de falha. O trabalho analisa uma barragem em operação, considerando aspectos estruturais, geotécnicos, hidrológicos, operacionais, além de dados de instrumentação e inspeções. Foram identificados oito modos de falha, incluindo galgamento, instabilidades de taludes, problemas na fundação, erosão interna, degradação de estruturas vertentes e deslizamentos nas ombreiras. Os resultados mostram que, embora a barragem apresente estabilidade em condições usuais, há vulnerabilidades relacionadas a eventos extremos, incertezas geotécnicas e fatores externos. Como medidas de mitigação, destacam-se melhorias nos extravasores, nos sistemas de drenagem e no monitoramento geotécnico, além da necessidade de investigações adicionais e reavaliações hidrológicas. Conclui-se que a PFMA é eficaz na identificação e priorização de riscos, apoiando decisões e reforçando a segurança da barragem.

Palavras-chave: Segurança de Barragens. PFMA. Modos Potenciais de Falha. Barragens de Terra. Análise de Risco.

ABSTRACT
The article presents the results of an investigation into the potential failure modes of an earthfill dam intended for water storage using the Potential Failure Mode Analysis (PFMA) tool, with a focus on safety assessment and improving risk management. The study is based on a review of dam safety concepts and failure mechanisms. The PFMA approach enables the systematic identification and evaluation of possible failure scenarios. The work analyzes an operating dam, considering structural,

ISSN: 2177-3246

geotechnical, hydrological, and operational aspects, as well as instrumentation data and inspection records. Eight failure modes were identified, including overtopping, slope instabilities, foundation issues, internal erosion, deterioration of spillway structures, and abutment landslides. The results indicate that, although the dam presents satisfactory stability under usual conditions, there are vulnerabilities associated with extreme events, geotechnical uncertainties, and external factors. Mitigation measures include improvements to spillways, internal drainage systems, and geotechnical monitoring, as well as the need for additional investigations and periodic hydrological reassessments. It is concluded that PFMA is an effective tool for identifying and prioritizing risks, supporting decision-making and enhancing dam safety.

Keywords: Dam Safety. PFMA. Potential Failure Modes. Earth Dams. Risk Analysis.

RESUMEN
El artículo presenta los resultados de la investigación de los modos potenciales de falla de una presa de tierra destinada al almacenamiento de agua mediante la herramienta Potential Failure Mode Analysis (PFMA), con enfoque en la evaluación de la seguridad y la mejora de la gestión de riesgos. El estudio se basa en la revisión de conceptos de seguridad de presas y mecanismos de rotura. El enfoque de la PFMA permite identificar y evaluar, de manera sistemática, posibles escenarios de falla. El trabajo analiza una presa en operación, considerando aspectos estructurales, geotécnicos, hidrológicos y operacionales, así como datos de instrumentación e información proveniente de inspecciones. Se identificaron ocho modos de falla, incluyendo el sobrevertido, inestabilidades de taludes, problemas en la cimentación, erosión interna, degradación de estructuras de vertido y deslizamientos en los estribos. Los resultados muestran que, aunque la presa presenta estabilidad en condiciones habituales, existen vulnerabilidades asociadas a eventos extremos, incertidumbres geotécnicas y factores externos. Como medidas de mitigación, se destacan mejoras en los vertederos, en los sistemas de drenaje y en el monitoreo geotécnico, además de la necesidad de investigaciones adicionales y reevaluaciones hidrológicas. Se concluye que la PFMA es una herramienta eficaz para la identificación y priorización de riesgos, apoyando la toma de decisiones y reforzando la seguridad de la presa.

Palavras clave: Seguridad de Presas. PFMA. Modos Potenciales de Falla. Presas de Tierra. Análisis de Riesgo.

1 INTRODUÇÃO

As barragens desempenham papel fundamental na gestão de recursos hídricos e na mineração, sendo amplamente utilizadas para abastecimento público, geração de energia, irrigação, controle de cheias e contenção de rejeitos. Segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010, barragens são estruturas destinadas à retenção de líquidos ou misturas de líquidos e sólidos (Brasil, 2010). Apesar de sua importância, essas estruturas apresentam riscos significativos, uma vez que falhas podem causar perdas humanas, impactos ambientais e prejuízos econômicos expressivos.

A engenharia de barragens evoluiu de práticas empíricas para abordagens fundamentadas na mecânica dos solos, hidráulica e geologia de engenharia. Ainda assim, falhas continuam ocorrendo, sendo os principais mecanismos associados ao galgamento, erosão interna e instabilidade estrutural (ICOLD, 2018), especialmente em barragens de terra e enrocamento, que são as mais comuns no mundo.

No Brasil, a relevância do tema aumentou após os rompimentos de Fundão (2015) e Córrego do Feijão (2019), que evidenciaram a magnitude dos impactos associados. Como resposta, a Lei nº 14.066/2020 atualizou a legislação vigente, ampliando as exigências de segurança e gestão de riscos (Brasil, 2020).

Diante desses problemas, a engenharia moderna tem incorporado análises baseadas em risco, definidas como função da probabilidade de ocorrência e das consequências (ICOLD, 1998). Nesse contexto, destaca-se a Potential Failure Mode Analysis (PFMA), Análise de Modos de Falha Potenciais em português, metodologia estruturada que permite identificar e avaliar cenários de falha considerando aspectos geotécnicos, estruturais e operacionais (FERC, 2017). A PFMA tem se consolidado como uma ferramenta essencial para apoiar a tomada de decisão e aprimorar a segurança de barragens.

Os objetivos do trabalho são a identificação dos modos potenciais de falha associados à estrutura analisada, a avaliação dos cenários de falha identificados, considerando sua probabilidade de ocorrência e sua severidade, e apresentação de propostas de ações para a mitigação dos modos potenciais de falha.

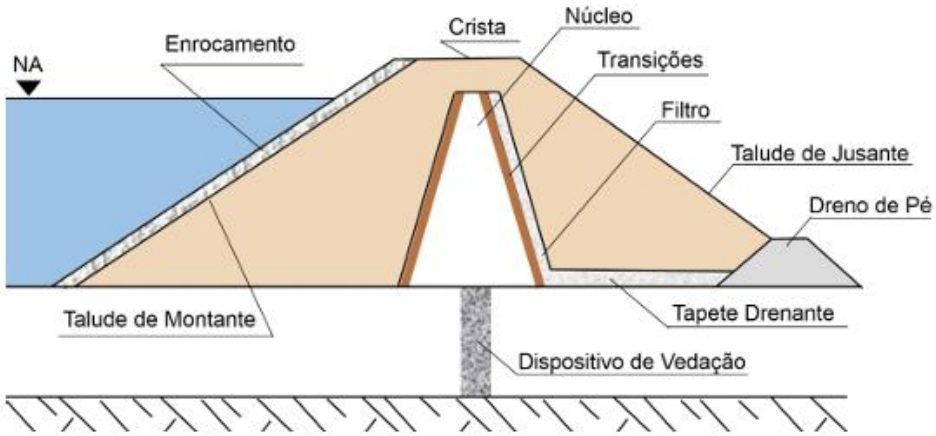
2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Lei nº 12.334/2010 define barragens como estruturas destinadas à contenção ou acumulação de líquidos ou misturas, enquanto o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) as caracteriza como obstáculos artificiais voltados ao armazenamento, controle e regulação. Essas estruturas são fundamentais em obras hidráulicas e geotécnicas e são utilizadas há milênios, com registros desde o Egito Antigo (Jesus, 2011).

As barragens podem ser classificadas conforme finalidade, material, método construtivo, forma estrutural e tipo de fundação, além de fatores como topografia e condições geológico-geotécnicas. Entre os principais tipos estão as barragens de concreto, enrocamento e terra. As barragens de terra são as mais comuns no mundo, representando cerca de 63% das estruturas, devido ao uso de materiais naturais locais, menor custo e boa adaptação ao terreno (Conceição, 2025). No Brasil, sua predominância está relacionada à disponibilidade de solos e condições favoráveis de relevo.

Quanto à constituição, podem ser homogêneas, com um único material impermeável, ou zonadas, com diferentes materiais que otimizam o comportamento hidráulico e mecânico (Massad, 2010). Seus principais elementos incluem taludes de montante e jusante, crista, núcleo impermeável, filtros, zonas de transição e sistemas de drenagem, responsáveis pelo controle da percolação (Figura 1).

Figura 1. Elementos básicos de uma barragem de terra zonada



Fonte: Fonte: Souza (2017)

2.1 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANA DE BARRAGENS

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010, estabelece diretrizes para garantir a segurança dessas estruturas, prevenir acidentes e reduzir seus impactos, definindo responsabilidades, instrumentos e competências (Brasil, 2010). Após os rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), a legislação foi atualizada pela Lei nº 14.066/2020, tornando mais rigorosos os mecanismos de controle e fiscalização.

A PNSB se aplica às barragens que atendem a pelo menos um dos seguintes critérios: altura do maciço igual ou superior a 15 metros; capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³; armazenamento de resíduos perigosos; classificação com dano potencial associado médio ou alto (considerando possíveis perdas humanas, impactos ambientais e prejuízos socioeconômicos a jusante); ou enquadramento em categoria de risco alta, definida com base em aspectos como estado de conservação, características técnicas e atendimento aos requisitos de segurança (ANA, 2025).

Seus objetivos incluem reduzir a probabilidade de acidentes e mitigar consequências, com base em monitoramento contínuo, fiscalização e padronização técnica. Entre os principais instrumentos estão a classificação de risco, o Plano de Segurança de Barragem (PSB), o SNISB e o Relatório de Segurança de Barragens (Brasil, 2010). O PSB se destaca como principal documento de gestão, reunindo diretrizes operacionais, inspeções e ações emergenciais para garantir a integridade da estrutura ao longo de sua vida útil.

2.2 GESTÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS BASEADA EM ANÁLISE DE RISCOS

A avaliação tradicional da segurança de barragens, baseada em normas e boas práticas, apresenta limitações na análise de aspectos como erosão interna e fatores operacionais, motivando a adoção da abordagem baseada em risco (SOUZA *et al.*, 2017). Essa abordagem envolve identificar falhas, estimar suas probabilidades e consequências, sendo o risco definido como a combinação desses fatores. No caso de barragens, o principal evento é a ruptura, caracterizada pela liberação descontrolada do reservatório (ICOLD, 2018).

No Brasil, a análise de risco foi incorporada à legislação, com exigência no Plano de Segurança de Barragem (PSB), incluindo cenários de acidente e inspeções específicas (Czap, 2022). Diversos métodos podem ser utilizados, como PFMA, HAZOP, FMEA, Bow-Tie e análises probabilísticas (IBRAM, 2019), sendo a escolha dependente das características da barragem (Souza *et al.,* 2017).

Destaca-se a PFMA, foco do estudo que constitui um processo sistemático voltado à identificação, descrição e avaliação das possíveis formas de falha de uma barragem sob diferentes condições de carregamento (The world bank*,* 2021). Desde 2002, essa metodologia foi incorporada às exigências da *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) para barragens nos Estados Unidos, sendo amplamente estruturada pelo *United State Bureau Of Reclamation*. (USBR) e pelo *United States Army Corps Of Engineers* (USACE).

A aplicação da PFMA envolve revisão de dados existentes, inspeções de campo e oficinas técnicas colaborativas, nas quais especialistas identificam modos potenciais de falha, analisam suas consequências e propõem medidas de mitigação. Trata-se de uma avaliação qualitativa de risco que contribui para o aprimoramento da segurança, permitindo direcionar inspeções e sistemas de instrumentação para pontos críticos (Flores, 2024). Destaca-se que a PFMA possui caráter informativo e deve ser utilizada como complemento às análises tradicionais baseadas em normas.

A Tabela 1 sintetiza estudos sobre a aplicação da PFMA em barragens, destacando seu uso como ferramenta qualitativa para identificação e priorização de modos de falha, frequentemente associada a análises de risco e monitoramento. Predominam contribuições internacionais, incluindo estudos de caso e temas como envelhecimento de estruturas e mudanças climáticas, enquanto no Brasil a produção ainda é limitada, evidenciando a necessidade de maior aprofundamento do tema.

Tabela 1. Resumo de estudos sobre a aplicação da PFMA

Referência	Tipo	Objetivo do estudo	Aplicação	Principais contribuições
Brito *et al.* (2025)	Artigo de congresso	Identificar e analisar modos de falha da barragem Umari (CE)	Aplicação direta do PFMA em estudo de caso real	Caso brasileiro relevante com aplicação prática da metodologia
Taveira *et al.* (2023)	Artigo de congresso	Identificar e analisar modos de falha da barragem Sítios Novos (CE)	Aplicação direta do PFMA em estudo de caso real	Caso brasileiro relevante com aplicação prática da metodologia
Rinaldi *et al.* (2023)	Artigo de congresso	Avaliar a necessidade de aplicação do PFMA na segurança de barragens	Aplicação do PFMA em estudos de caso e priorização de riscos	Destaca o PFMA como ferramenta essencial para melhoria da segurança de barragens
Choudhary *et al.* (2018)	Artigo de congresso	Integrar PFMA ao monitoramento estrutural de barragens	PFMA utilizado para definir parâmetros críticos de instrumentação	Demonstra a relação entre modos de falha e sistemas de monitoramento
Ferguson (2006)	Artigo de congresso	Desenvolver abordagem de análise de risco em barragens	PFMA aplicado na identificação de cenários de falha	Consolida o PFMA como ferramenta central na análise de risco
Feng *et al*. (2021)	Artigo científico	Avaliar segurança de barragens de enrocamento com face de concreto	Aplicação do PFMA na identificação de modos de falha estruturais e hidráulicos	Evidencia a aplicabilidade do PFMA em diferentes tipologias de barragens
Méan & Bryant (2022)	Capítulo de livro	Avaliar impactos do envelhecimento e mudanças climáticas em barragens	PFMA aplicado a cenários não estacionários	Amplia o uso do PFMA para condições futuras e variáveis ambientais
Saouma & Hariri-Ardebili (2021)	Capítulo de livro	Aplicar análise de risco em barragens	PFMA como base para estruturação de cenários de falha	Integra PFMA com abordagens modernas de análise de risco

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.3 MODOS DE FALHA EM BARRAGENS

De modo geral, os processos de ruptura estão associados a fenômenos hidráulicos, geotécnicos e estruturais, destacando-se como principais mecanismos o galgamento (*overtopping*), a erosão interna (*piping*) e a instabilidade estrutural, responsáveis por grande parte dos registros históricos de falhas, especialmente em barragens de terra e enrocamento.

O galgamento é um dos modos mais críticos de ruptura, ocorrendo quando o nível da água ultrapassa a crista da barragem, provocando escoamento superficial não controlado. Esse fenômeno pode ser causado por eventos hidrológicos extremos, falhas de dimensionamento ou obstruções em vertedouros e estruturas de descarga (Souza, 2023). Mesmo pequenas lâminas d'água podem iniciar processos erosivos no talude de jusante, expondo camadas internas e acelerando a degradação da estrutura, podendo evoluir para instabilidade ou formação de caminhos preferenciais de fluxo. A prevenção desse tipo de falha está associada ao correto dimensionamento hidráulico, especialmente do vertedouro, e à definição adequada da borda livre (Klimkievicz, 2016).

A erosão interna, ou *piping,* é outro mecanismo crítico, caracterizado pelo arraste de partículas do solo devido ao fluxo de percolação. Esse processo ocorre quando as forças hidráulicas superam as forças resistentes do material, levando à formação de canais internos que podem evoluir até o colapso da estrutura (Conceição, 2025). O fenômeno está frequentemente associado a gradientes hidráulicos

elevados e à ausência ou deficiência de sistemas de drenagem e filtros adequados. A evolução do *piping* ocorre em quatro fases: início, continuação, progressão e colapso, sendo as fases iniciais geralmente silenciosas e de difícil detecção (Foster; Fell, 1999).

A instabilidade estrutural está relacionada ao desequilíbrio das forças atuantes na barragem ou em sua fundação, podendo resultar de falhas de projeto, execução, uso de materiais inadequados ou carregamentos não previstos. Esse mecanismo pode levar a deslizamentos, deformações excessivas ou colapsos localizados, especialmente em função do comportamento não linear dos solos e da variabilidade de suas propriedades (Martins, 2025). A análise da estabilidade baseia-se, em geral, no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, considerando parâmetros como coesão, ângulo de atrito e tensões atuantes, sendo aplicados métodos de equilíbrio limite para avaliação do fator de segurança.

3 METODOLOGIA

A metodologia PFMA tem como objetivo compreender os mecanismos de falha de barragens, podendo ser aplicada tanto na fase de projeto quanto na operação (The world bank, 2021). Nessa abordagem, a falha é entendida como a liberação descontrolada do reservatório ou o mau desempenho de componentes, enquanto os modos de falha potenciais (MFPs) correspondem à sequência de eventos que levam a essa condição (FERC, 2017).

A PFMA é conduzida por uma equipe multidisciplinar, envolvendo especialistas em áreas como geotecnia, hidrologia e engenharia, sob coordenação de um líder e um facilitador, responsáveis pela condução dos trabalhos (FERC, 2017 *apud* Flores, 2024). O processo inclui análise de dados – projetos, dados de instrumentação, registros operacionais - inspeções de campo e workshops técnicos, onde ocorrem discussões entre os especialistas para identificar falhas, causas, consequências e medidas de mitigação.

Os modos de falha potenciais (MFP) identificados são descritos, avaliados quanto à sua plausibilidade e classificados com base em probabilidade e consequências, por meio de matrizes de risco. Isso permite priorizar ações e apoiar a tomada de decisão, considerando impactos sociais, ambientais e econômicos (USACE, 2014 *apud* Flores, 2024).

O detalhamento dos parâmetros referentes à Consequência ou Severidade está descrito na Tabela 2, proposta por USACE (2014).

Tabela 2. Consequência / Severidade

Categoria		Pessoas	Meio Ambiente
1	Insignificante	Não há perdas de vidas	Pequenas consequências ambientais.
2	Pequena	Não há perdas de vidas	Graves consequências ambientais.
3	Moderada	Pode haver perda direta de vidas devido a inundações, embora em uma extensão limitada, por pedestres ou habitações isoladas.	A avaria com grandes descargas a jusante resulta em danos incrementais limitados à propriedade e/ou ao ambiente
4	Grave	A perda de vidas seria esperada de dificuldades em alertar populações menores próximas (2 horas da chegada) (perda de vidas na faixa de 10 a 100).	As descargas a jusante resultam em danos significativos para a propriedade e/ou para o ambiente.
5	Severa	Grande perda de vidas seria esperada devido a dificuldades em alertar e evacuar para grandes centros populacionais a uma distância média (perda de vidas na faixa de 100 a 1.000)	As descargas a jusante resultam em danos consideráveis para a propriedade e/ou para o ambiente.
6	Catastrófica	Uma perda muito alta de vidas diretas seria esperada devido à existência de grandes populações muito próximas ao pé da barragem (>10.000 habitantes e < 30 minutos da chegada) (perda estimada de vidas superior a 1.000).	As descargas a jusante resultam em danos materiais e/ou ambientais extremamente elevados.

Fonte: USACE, 2014 apud FLORES, 2024.

O detalhamento dos parâmetros referentes ao índice de ocorrência está descrito na Tabela 3, proposta por USACE (2014).

Tabela 3. Ocorrência / Probabilidade

Categoria		Ocorrência / Probabilidade
1	Remota	A probabilidade anual de falha é mais remota que 10^{-6} (1/1.000.000). Vários eventos devem ocorrer simultaneamente ou em série para causar a falha, e a maioria, tem probabilidade desprezível.
2	Baixa	A probabilidade de falha anual é entre 10^{-5} (1/100.000) e 10^{-6} (1/1.000.000). A possibilidade não pode ser descartada, mas não há evidências convincentes que sugerem que tenha ocorrido ou que existe uma condição/falha que pode levar à iniciação.
3	Moderada	A probabilidade de falha anual está entre 10^{-4} (1/10.000) e 10^{-5} (1/100.000). A condição fundamental é que evidências indiretas sugerem que é plausível; e as principais evidências tendem mais para o "menos provável" do que "mais provável".
4	Alta	A probabilidade de falha anual é entre 10^{-3} (1/1.000) e 10^{-4} (1/10.000). A condição fundamental é que evidências indiretas sugerem que é plausível; e as principais evidências são mais ponderadas para "mais provável" do que "menos provável".
5	Muito alta	A probabilidade de falha anual é mais frequente (maior) do que 10^{-3} (1/1.000). Há evidências diretas ou substanciais indiretas que sugerem que a falha começou ou provavelmente ocorrerá em um futuro próximo.

Fonte: USACE, 2014 apud FLORES, 2024.

4 ESTUDO DE CASO

O caso em estudo refere-se a uma barragem de terra destinada ao armazenamento de água e geração hidrelétrica, denominada Barragem X por questões de sigilo. Construída entre 1906 e 1909 pelo método de aterro hidráulico, a estrutura possui aproximadamente 1.500 m de comprimento e altura

máxima de 16 m, sendo a única barragem do reservatório. Conta com dispositivos de descarga compostos por comportas de superfície e de fundo, além de vertedouros livres e fechados. A barragem passou por intervenções importantes, incluindo reforço estrutural com berma de equilíbrio e instalação de filtro inclinado.

A barragem apresenta classificação de Categoria de Risco baixo e Dano Potencial Associado alto, enquadrando-se como Classe B. O reservatório possui bacia hidrográfica de aproximadamente 30 km² e volume significativo. Do ponto de vista sísmico, a região apresenta baixa atividade.

Do ponto de vista geotécnico, a barragem encontra-se assentada sobre depósitos aluvionares com presença de camadas de argila orgânica e areia saturada de baixa compacidade. As análises de estabilidade indicam fatores de segurança satisfatórios em condições drenadas. Em condições não drenadas, verificou-se a necessidade de resistência mínima do solo para garantir a estabilidade. De modo geral, os estudos concluem que a barragem apresenta comportamento adequado a longo prazo, especialmente considerando o reforço estrutural executado e o histórico de operação.

As estruturas de concreto associadas também apresentam condições satisfatórias de estabilidade, com fatores de segurança superiores aos valores exigidos para diferentes cenários de carregamento, incluindo condições normais, excepcionais e limites.

Atualmente, a estrutura conta com dezenas de instrumentos ativos, com destaque para piezômetros, medidores de nível d'água, inclinômetros e dispositivos de medição de recalque.

Destaca-se como ponto de atenção a ocupação parcial da área da barragem por um parque na ombreira direita, o que representa um desafio, devido à ausência de monitoramento adequado e à exposição da população a potenciais riscos

Com relação a Zona de Autossalvamento (ZAS), o estudo desenvolvido indicou que a população fixa é de aproximadamente 195 mil pessoas e a população flutuante no horário de maior concentração de população é mais de 180 mil pessoas.

5 APLICAÇÃO DA PFMA

Para facilitar o trabalho da PFMA, a barragem foi decomposta em sistemas e subsistemas funcionais, permitindo uma análise mais estruturada dos modos de falha e melhor compreensão das interações entre componentes estruturais, hidráulicos e operacionais. Os principais sistemas definidos foram: infraestrutura operacional, barragem, drenagem, sistema extravasor e reservatório, cada um subdividido conforme suas funções específicas (

Tabela 4).

O sistema de infraestrutura operacional abrange aspectos administrativos e de gestão, incluindo controle de documentação técnica e atividades de operação, manutenção e segurança. Já o sistema da barragem engloba os elementos estruturais responsáveis pela estabilidade e retenção do reservatório,

como taludes, coroamento, fundação, ombreiras e instrumentação, essenciais para o monitoramento e integridade da estrutura. O sistema de drenagem tem como função controlar o fluxo de água interno e superficial, sendo composto por drenagem superficial e interna. O sistema extravasor é responsável pela descarga segura das vazões, e inclui vertedouros, canais, comportas e estruturas dissipadoras de energia. Por fim, o sistema reservatório compreende o corpo hídrico e os processos associados ao seu funcionamento. Os sistemas e subsistemas foram identificados com letras e números para facilitar a organização da análise e identificar as anomalias e problemas pontuados.

Tabela 4. Sistemas, subsistema e identificadores.

SISTEMA	SUBSISTEMA	IDENTIFICADOR
INFRAESTRUTURA OPERACIONAL	CONTROLE DA DOCUMENTAÇÃO	A.1
	GESTÃO, SEGURANÇA E MANUTENÇÃO	A.2
BARRAGEM	TALUDE DE MONTANTE	B.1
	COROAMENTO	B.2
	RIP-RAP	B.3
	TALUDE DE JUSANTE	B.4
	REGIÃO A JUSANTE DA BARRAGEM	B.5
	INSTRUMENTAÇÃO	B.6
	OMBREIRA DIREITA	B.7
	OMBREIRA ESQUERDA	B.8
	FUNDAÇÃO	B.9
SISTEMA DE DRENAGEM	DRENAGEM SUPERFICIAL	C.1
	DRENAGEM INTERNA	C.2
VERTEDOURO - SISTEMA EXTRAVASOR	VERTEDOURO DE SUPERFÍCIE CONTROLADO	D.1
	VERTEDOURO DE SUPERFÍCIE LIVRE	D.2
	CANAL DE APROXIMAÇÃO	D.3
	CANAL DE RESTITUIÇÃO	D.4
	BACIA AMORTECEDORA	D.5
	COMPORTAS DO VERTEDOURO	D.6
	DESCARGAS DE FUNDO / COMPORTAS	D.7
RESERVATÓRIO	RESERVATÓRIO	E.1

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

5.1 MODOS DE FALHAS POTENCIAIS

Com base na análise documental, inspeção na barragem e discussão no workshop, foram levantados 37 pontos referentes aos sistemas funcionais, incluindo problemas operacionais e de manutenção, anomalias nos elementos da barragem e ausência de estudos e análises. Foram avaliadas as falhas que esses pontos poderiam provocar, definindo-se assim 8 modos de falha potenciais (MFP):

- MFP1: Galgamento do corpo da barragem.
- MFP2: Instabilidade do talude de montante.
- MFP3: Instabilidade do talude de jusante.
- MFP4: Instabilidade global pela fundação.
- MFP5: Erosão interna pela fundação.
- MFP6: Erosão interna pelo corpo da barragem.
- MFP7: Degradação da estrutura do vertedouro.

- MFP8: Deslizamento de terra nas ombreiras.

Esses modos serão apresentados juntamente com os fatores (os pontos levantados) que os tornam mais prováveis e menos prováveis, justificando a probablidade de suas ocorrências.

5.1.1 MPF1: Galgamento do corpo da barragem

A probabilidade de galgamento da barragem está associada principalmente a fatores operacionais e hidráulicos, como a ausência de manual de operação e manutenção, a borda livre insuficiente e a possível subestimação da Cheia Máxima Provável, que podem comprometer a eficiência do sistema extravasor. A presença de vegetação no canal de aproximação pode reduzir a capacidade de escoamento, e ocupação urbana na ombreira esquerda pode ocasionar deslizamentos que promovam o risco de obstruções, visto que o sistema se localiza junto a ombreira esquerda.

Por outro lado, alguns fatores contribuem para reduzir esse risco, como a resposta hidrológica lenta da bacia, que permite maior tempo de ação operacional, e a realização de inspeções e manutenções periódicas. A baixa probabilidade de ocorrência simultânea de múltiplas falhas, aliada à grande capacidade de amortecimento do reservatório, também atua de forma favorável. Por fim, a confiabilidade dos equipamentos eletromecânicos reforça a capacidade de controle das vazões, contribuindo para a prevenção do galgamento.

5.1.2 MPF2: Instabilidade do talude de montante

A maior probabilidade de instabilidade do talude de montante está relacionada principalmente a incertezas nas análises e nas características do maciço. As análises de estabilidade foram limitadas à seção de maior altura e a um cenário restrito de rebaixamento rápido, o que pode não representar condições mais críticas e levar à subestimação dos fatores de segurança. A ausência de análises sísmicas também introduz incertezas, ainda que a região apresente baixa sismicidade. Além disso, o uso de aterros hidráulicos, com elevada heterogeneidade, pode gerar zonas de baixa resistência ao cisalhamento, favorecendo superfícies potenciais de ruptura. Soma-se a isso a ausência de critérios para definição de níveis de controle da instrumentação, o que pode dificultar a identificação de alterações como aumento de poropressões.

Por outro lado, a geometria do talude, com seção larga, contribui para maior estabilidade. Inspeções regulares permitem identificar precocemente anomalias, enquanto a instrumentação instalada possibilita o monitoramento contínuo do comportamento do maciço. A ausência de patologias relevantes indica boas condições estruturais, e as análises realizadas apontam fatores de segurança satisfatórios. Por fim, a baixa sismicidade da região reduz o risco associado a carregamentos dinâmicos.

5.1.3 MPF3: Instabilidade do talude de jusante

A maior probabilidade de instabilidade do talude de jusante está associada à presença de depósitos aluvionares com camadas de argila orgânica de baixa resistência e alta compressibilidade, podendo favorecer deformações e reduzir a estabilidade. Apesar de análises indicarem fatores de segurança elevados, esses resultados dependem da representatividade dos parâmetros adotados, sendo impactados pela variabilidade dos materiais. A heterogeneidade dos aterros hidráulicos também pode gerar zonas localizadas de menor resistência. Além disso, a ocorrência de formigueiros e cupinzeiros, bem como falhas no sistema de drenagem superficial, podem favorecer infiltrações, erosões e redução da resistência do solo.

De modo oposto, a geometria robusta do talude aumenta a estabilidade global, enquanto inspeções periódicas permitem identificar e corrigir anomalias precocemente. A instrumentação instalada possibilita o monitoramento contínuo do comportamento do maciço. A ausência de movimentações ou patologias relevantes indica condições estruturais adequadas, corroboradas por fatores de segurança satisfatórios nas análises. Por fim, o longo histórico de operação da barragem, sem registros de instabilidade significativa, reforça a confiabilidade do seu comportamento geotécnico ao longo do tempo.

5.1.4 MPF4: Instabilidade global pela fundaçao

A maior probabilidade de instabilidade global pela fundação está associada às características geotécnicas desfavoráveis e às incertezas de monitoramento. A fundação, composta por depósitos aluvionares com argilas orgânicas de baixa resistência e alta compressibilidade, pode favorecer deformações e reduzir a estabilidade, especialmente em condições não drenadas. A ausência de critérios claros para interpretação da instrumentação dificulta a identificação de variações críticas de poropressão. Além disso, há incertezas quanto ao desempenho do sistema de drenagem interna, devido à falta de controle do ponto de saída e de medições de vazão, o que pode mascarar problemas como entupimentos ou erosão interna. Embora as análises indiquem fatores de segurança elevados, esses resultados dependem de parâmetros possivelmente não representativos, podendo levar à superestimação da resistência da fundação.

Em contrapartida, a ausência de patologias e de movimentações relevantes sugere condições estáveis, enquanto a geometria robusta da seção contribui para maior segurança global. Inspeções regulares e a presença de instrumentação permitem o acompanhamento contínuo do comportamento da barragem. As análises de estabilidade apontam fatores de segurança satisfatórios, e os dados de poropressão indicam funcionamento adequado da drenagem. Por fim, o histórico de cerca de 120 anos de operação sem instabilidades relevantes reforça o bom desempenho geotécnico da fundação ao longo do tempo.

5.1.5 MPF5: Erosão interna pela fundação e MPF6: Erosão interna pela corpo da barragem

A maior probabilidade de erosão interna seja pela fundação ou pelo maciço está associada principalmente a limitações no monitoramento e na avaliação do comportamento hidráulico. A ausência de estudos específicos de *piping* impede a verificação completa dos critérios de erosão interna, mesmo com a calibração da linha freática no estudo de percolação. Além disso, o desconhecimento do ponto de saída do dreno inclinado compromete a avaliação do sistema de drenagem, dificultando a detecção de alterações no fluxo ou carreamento de partículas. A falta de medições nos dispositivos de vazão inviabiliza o acompanhamento quantitativo da percolação, enquanto o acúmulo de material nos medidores impede inspeções visuais e a identificação precoce de finos em suspensão, reduzindo a capacidade de diagnóstico preventivo.

Em oposição, inspeções regulares contribuem para a identificação antecipada de anomalias, permitindo intervenções oportunas. O bom estado de conservação do maciço, sem sinais de trincas ou zonas saturadas, sugere ausência de processos ativos de erosão interna. Além disso, os dados de instrumentação indicam níveis de poropressão compatíveis com condições normais de operação, refletindo gradientes hidráulicos controlados e menor potencial de transporte de partículas.

5.1.6 MPF7: Degradação daestrutura do vertedouro

A maior probabilidade desse modo de falha está associada à degradação das estruturas vertentes. A presença de armaduras expostas nos pilares do vertedouro, combinada com vazamentos nas juntas de construção, indica deterioração do concreto, favorecendo processos de corrosão e redução da capacidade resistente.

Em contrapartida, a realização de inspeções regulares, aliada a ações contínuas de manutenção e reparo, contribui para a identificação precoce e correção de anomalias, como fissuras e infiltrações, garantindo a preservação do desempenho e a durabilidade das estruturas

5.1.7 MPF8: Deslizamentos nas ombreiras

A maior probabilidade desse modo de falha está associada a interferências antrópicas nas ombreiras. Na ombreira direita, a presença de um parque e a ausência de inspeções regulares dificultam a detecção precoce de anomalias e aumentam a suscetibilidade a movimentos de massa. Já na ombreira esquerda, a ocupação urbana pode gerar sobrecargas e alterar as condições de equilíbrio do talude.

De outra forma, a estabilidade é favorecida pela presença de substrato rochoso (biotita gnaisse) em ambas as ombreiras, proporcionando melhores condições de resistência e menor propensão a deslizamentos. Além disso, na ombreira esquerda, a realização de inspeções regulares contribui para a identificação antecipada de sinais de instabilidade, permitindo intervenções preventivas.

5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA POTENCIAIS

A Figura 2 apresenta a classificação dos 8 modos de falha, de acordo com as ponderações dos especialistas durante o workshop, segundo a ocorrência e a severidade.

Figura 2. Matriz de risco dos MFPs identificados

Ocorrência	Insignificante	Pequena	Moderada	Grave	Severa	Catastrófica
Muito Alta						
Alta					MFP5 MFP6	
Moderada		MFP7				MFP4
Baixa			MFP2 MFP8			MFP1 MFP3
Remota						

Severidade

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A ocorrência de galgamento nas barragens de terra é inaceitável sob quaisquer condições, pois a severidade/consequência é catastrófica. A revisão de cheias apresentada indica que, para as condições atuais, a borda livre disponível já é pouco inferior à desejável. No cenário futuro, o atendimento à borda livre exige que o vertedouro controlado e os descarregadores de fundo estejam em pleno funcionamento. Diante do exposto, foi considerado um índice de ocorrência baixo, resultando em um risco MÉDIO para o MFP1.

Com relação aos MFP 2, que considera a possibilidade de ruptura do talude de montante, foi considerada uma probabilidade de ocorrência baixa, tendo em vista a integridade do corpo da barragem, e os resultados das análises de estabilidade que indicaram valores de fatores de segurança satisfatórios. A ruptura do talude de montante foi considerada com severidade MODERADA, resultando em um risco BAIXO.

Para o talude de jusante, MFP3, a possibilidade de ruptura do talude foi considerada com probabilidade de ocorrência baixa, tendo em vista a integridade do corpo da barragem, e os resultados das análises de estabilidade que indicaram valores de fatores de segurança satisfatórios. No entanto, uma ruptura global a jusante impacta em danos catastróficos ao meio ambiente e à população a jusante, representando um grau de severidade 6, e resultando em um risco MÉDIO.

O MFP4 está relacionado à possibilidade de ruptura global da barragem pela fundação. Neste caso, a severidade adotada foi a mesma do modo 3 (catastrófica). Em função das incertezas com relação ao material de fundação, e da ausência de metodologias e critérios para a definição dos níveis de controle dos instrumentos instalados na barragem, foi considerada uma possibilidade de ocorrência moderada, resultando em um risco ALTO. Ressalta-se que o maciço não apresenta sinais de movimentação, reduzindo a probabilidade de ocorrência.

Os modos de falha MFP5 e MFP6 estão relacionados à erosão interna pela fundação e pelo corpo da barragem, respectivamente. Neste caso, considerou-se que a perda de vidas seria menor do

que no caso de ruptura global, em função da possibilidade de avisar a população a jusante. Sendo assim, foi considerado um nível de severidade 5 (Severa). A ocorrência foi considerada alta em ambos os casos, tendo em vista a ausência de medidas de vazão e o desconhecimento do desague do sistema de drenagem, não sendo possível observar surgências a jusante, nem carreamento de finos. Este é, sem dúvida, o ponto mais sensível da barragem. Para os modos MFP5 e MFP6 foi atribuído um risco ALTO.

O MFP7 está relacionado à estrutura do vertedouro. Ressalta-se que foram verificadas ferragens expostas em 2 pilares do vertedouro, vazamento pelas juntas de construção no perfil vertente, e presença de concreto degradado no vertedouro de superfície livre. De acordo com o especialista estrutural, não são observadas evoluções significativas destas manifestações patológicas. Para este caso, foi considerada uma probabilidade de ocorrência moderada e severidade baixa, pois se considerou que existe a possibilidade de reparo antes de uma ruptura, resultando em um risco BAIXO.

Finalmente, o MFP 8 agrupou os deslizamentos de terra nas ombreiras direita e esquerda, tendo em vista que foram identificadas as mesmas anomalias, com a mesma severidade e com a mesma probabilidade de ocorrência baixa. Neste caso, a equipe do PFMA entendeu que a severidade seria moderada, por se tratar de deslizamentos pontuais, mas que pode ter consequências mais sérias, em função da existência de ocupação. A ocorrência foi considerada baixa, tendo em vista que o substrato é rochoso. Diante do exposto, o MFP 8 foi enquadrado em uma categoria de risco BAIXO.

5.3 AÇÕES RECOMENDADAS

As ações propostas atuam de forma integrada sobre os diferentes modos de falha potenciais com foco na redução de incertezas, no fortalecimento do monitoramento e na melhoria das condições operacionais e estruturais da barragem.

Para o MFP1 (galgamento do corpo da barragem), as medidas concentram-se no aumento da capacidade e confiabilidade do sistema extravasor, por meio da atualização dos estudos hidrológicos, limpeza e desobstrução do vertedouro, ampliação da capacidade de descarga e monitoramento da estabilidade da ombreira esquerda próxima às estruturas hidráulicas.

Os MFP2 (instabilidade do talude de montante), MFP3 (instabilidade do talude de jusante) e MFP4 (instabilidade global pela fundação) compartilham ações voltadas à redução de incertezas geotécnicas, incluindo investigações complementares (CPTu e amostragem), análises de estabilidade mais abrangentes, incluindo análises sísmicas, controle de compactação e melhoria dos critérios de interpretação da instrumentação com emprego dos níveis de controle. Essas medidas aumentam a confiabilidade dos parâmetros e permitem melhor avaliação das condições de estabilidade.

Os MFP5 (erosão interna pela fundação) e MFP6 (erosão interna pelo corpo da barragem) são tratados com ações focadas no controle hidráulico e na detecção precoce do *piping,* como definição de mapas de gradiente hidráulico, monitoramento de poropressões, retomada e aprimoramento das

medições de vazão, instalação de medidores de turbidez e investigação dos caminhos de drenagem. Essas ações permitem identificar alterações no regime de fluxo e prevenir o carreamento de partículas

De forma transversal aos MFP2 a MFP6, destaca-se o papel das inspeções regulares e do monitoramento contínuo por instrumentação, associados à definição de níveis de controle e análise integrada dos dados, permitindo a identificação precoce de anomalias e suporte à tomada de decisão.

Para o MFP7 (degradação do vertedouro), as ações incluem inspeções frequentes, recuperação estrutural do concreto e monitoramento de deslocamentos, garantindo a integridade estrutural e a capacidade hidráulica do sistema extravasor.

Por fim, o MFP8 (deslizamentos nas ombreiras) **é** tratado com a ampliação e adequação do monitoramento, incluindo instrumentação na ombreira direita e controle de deslocamentos na ombreira esquerda, além de inspeções regulares e verificação das estruturas de contenção, assegurando a estabilidade dos maciços laterais.

6 CONCLUSÃO

A dissertação teve como objetivo identificar e analisar os modos potenciais de falha de uma barragem de terra por meio da metodologia PFMA, integrando revisão bibliográfica, análise documental e estudo de caso. Na etapa inicial, foram levantados 37 pontos críticos relacionados a diferentes mecanismos de falha, que, após discussão em workshop técnico, foram consolidados em oito modos potenciais de falha: (MFP1) galgamento do corpo da barragem; (MFP2) instabilidade do talude de montante; (MFP3) instabilidade do talude de jusante; (MFP4) instabilidade global pela fundação; (MFP5) erosão interna pela fundação; (MFP6) erosão interna pelo corpo da barragem; (MFP7) degradação da estrutura do vertedouro; e (MFP8) deslizamentos nas ombreiras .

Os resultados indicam que a barragem não apresenta evidências de risco iminente de ruptura, porém existem vulnerabilidades relevantes, principalmente associadas às incertezas geotécnicas da fundação e às condições do sistema de drenagem interna. Nesse contexto, o mecanismo de erosão interna (*piping*) se destaca como o mais crítico, devido ao seu caráter progressivo, dificuldade de detecção em estágios iniciais e elevado potencial de evolução para uma falha catastrófica. O desconhecimento do ponto de deságue da drenagem interna e a ausência de medições sistemáticas de vazão limitam significativamente a capacidade de monitoramento desse processo. As estruturas de concreto, embora apresentem anomalias, mantêm-se estruturalmente íntegras, enquanto a presença de ocupação na ombreira direita compromete o monitoramento e o controle operacional.

As ações recomendadas concentram-se na melhoria da capacidade dos dispositivos de descarga, no aprimoramento dos sistemas de drenagem e controle de percolação, no reforço do monitoramento geotécnico e na realização de investigações complementares para redução das incertezas da fundação, além da reavaliação periódica dos estudos hidrológicos. De forma geral, a aplicação da PFMA

demonstrou ser eficaz na identificação e organização dos modos de falha e no direcionamento de ações preventivas. Entretanto, a metodologia apresenta limitações importantes como seu caráter qualitativo e a dificuldade de representar a interação entre diferentes mecanismos de falha, não substituindo análises quantitativas e modelagens mais detalhadas, que devem ser utilizadas de forma complementar.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PGECIV.
À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Relatório de Segurança de Barragens. Brasília 2025

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília: Presidência da República, [2010]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 23 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília: Presidência da República, [2020]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 23 out. 2025.

CONCEIÇÃO, Geovana.Ferreira da. Piping em Barragem de Rejeitos: Um Estudo Comparativo entre Modelagens Numéricas em 2D e 3D. 2025. 86f. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

CZAP, Marcela Maia Faria. Proposta de Metodologia para Segurança de Barragens Existentes: Estudo de Caso em Barragens do Paraná. 2022. 182f. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

FEDERAL ENERGY REGULATORY COMISSION (FERC). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects: Chapter 14 – Dam Safety Performance Monitoring Program. Portland, 2017.

FLORES, Isabela Farias. Gerenciamento de Risco em Barragens de Terra a partir das Metodologias PFMA e FMEA. 2024. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

FOSTER, Mark; FELL, Robin. A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods. UNICIV Report No. R-377. The University of New South Wales, Sydney, 1999. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/464157765/Time-for-development-of-internal-erosion-and-piping-in-embankment-dams-pdf. Acesso em: 23 set 2025.

INTERNATIONAL COMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Bulletin 154 – Dam Safety Management: Operational Phase of Dams. Paris, 2018.

JESUS, Rafael. Diegues. Otimização da forma estrutural de uma barragem. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011

KLIMKIEVICZ, Bernardo Eloi. Gestão De Risco Aplicado A Obras De Barragem**.** 2016. 101f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MARTINS, Tainá Amorin. Análise De Estabilidade De Barragens De Terra Sob Estrada**.** 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2025.

MASSAD, Faiçal. Obras de terra: Curso Básico de Geotecnia. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

SANTOS, Andreia Arruda. 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. 2023. Dissertação de Mestrado (Programa de PósGraduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2023

SOUZA, Thiago Coutinho de; CAMPELLO, Isabela; LIMA, Luciana Moraes. Kelly; FUSARO, Teresa Cristina. Métodos de Análise de Risco: Aplicabilidade e Limitações no Gerenciamento de Riscos Associados a Barragens. In: Seminário Sobre Gestão De Riscos E Segurança De Barragens De Rejeitos, 2017, Belo Horizonte. Artigos. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2017, p. 13

THE WORLD BANK. Technical Note 5: Potential Failure Modes Analysis. Washington, DC, 2021.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Safety of Dams-Policy and Procedures. Washington, D.C., 2014.