

Thiago Freitas de Porfírio Sousa

**Avaliação de Risco, com base no Valor Estatístico da Vida, sob a
óptica de Estudo de Viabilidade, na implementação de obras em
barragens.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil; Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista.

Orientador: Prof. Rafael Pereira Machado

Salvador
2024

Avaliação dos riscos, sob a óptica de Estudo de Viabilidade, na implementação de obras em barragens.

Thiago Freitas de Porfírio Sousa

Resumo

Na elaboração de Estudos de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental de barragens, não é comum que se avalie o impacto de eventual ruptura da estrutura. Todavia, essa análise é necessária, pois pode não ser para relevante para alguns e fornece informações gerenciais sobre realocação da população exposta a manchas de inundação de rompimento. Dessa maneira, este artigo trabalha esse tema sob a ótica de análise de risco baseado no Valor Estatístico da Vida (VEV).

Palavras-chave: Risco, Estudos de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental, Análise Probabilística

Abstract

In the development of Technical, Economic, and Environmental Feasibility Studies of dams, it is not common to assess the impact of a potential structure failure. However, this analysis is relevant and provides managerial insights regarding the relocation of the population exposed to flood zones in case of a breach. Thus, this article explores this topic from the perspective of risk analysis, based on the Statistical Value of Life (SVL).

Keywords: Risk, Technical Economic and Environmental Feasibility Studies, Probabilistic Analysis

1 INTRODUÇÃO

O Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) é parte integrante do programa de necessidades e engloba a análise de viabilidade do empreendimento. Por meio dele, é elaborado o anteprojeto de engenharia para o desenvolvimento da melhor solução técnica da alternativa selecionada, bem como para a definição dos principais componentes da obra.

Ao avaliar a viabilidade de uma obra, o gestor público atua em conformidade com a técnica de engenharia e atende à exigência legal quanto aos estudos preliminares, conforme estipulado tanto na Lei Geral de Licitações - Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021, quanto no Regime Diferenciado de Contratações Públicas (RDC) – Lei nº 12.462, de 4 de agosto de 2011.

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13531/1995 estabelece que o EVTEA tem como objetivo a elaboração de análises e avaliações para seleção e recomendação de alternativas para a concepção da edificação e de seus elementos, instalações e componentes (ABNT, 1995). Assim como em qualquer outra obra de infraestrutura, a elaboração do EVTEA é parte fundamental do processo de elaboração do anteprojeto de engenharia.

Costa (2012) define que, ao final da fase de viabilidade de obras de barragem, é necessário definir a exata posição do eixo barrável, o melhor tipo de barragem, as diferentes soluções de arranjos de obras e, principalmente, a viabilidade técnica, econômica e ambiental do empreendimento. Dessa maneira, verifica-se que há, além da possibilidade de avaliação do impacto da construção da barragem e do enchimento do reservatório, a possibilidade de avaliação dos riscos de eventual ruptura dessa estrutura.

A modelagem de ruptura de barragem baseia-se na solução das equações unidimensionais de Saint Venant, também conhecidas como equações unidimensionais do escoamento não-permanente gradualmente variado, definidas com base nas equações da continuidade e da conservação do movimento (TUCCI, 2001).

Para o cálculo e propagação do hidrograma de cheias ao longo da calha do rio no vale a jusante, duas metodologias estão disponíveis: o método de Muskingum-Cunge e o método simplificado proposto pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Ambiental Básico (ANA).

A área potencialmente alagada em caso de ruptura de barragem, definida com base no estudo hidráulico de rompimento, também delimita a Zona de Auto Salvamento (ZAS), conforme estabelecido pela Lei nº 14.066/2020. A ZAS é o trecho do vale a jusante da barragem onde não há tempo hábil para intervenção da autoridade competente em situação de emergência, conforme indicado pelo mapa de inundação.

Segundo a Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, a ZAS é determinada pela maior das seguintes distâncias: tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km.

A partir do mapeamento da área inundável, é possível realizar a avaliação de risco do empreendimento. Essa avaliação considera a unidade utilizada para mensurar a vulnerabilidade associada ao evento em questão. Portanto, no âmbito do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA), é deve-se incluir a estimativa dos impactos financeiros decorrentes dos riscos de ruptura.

Dessa forma, o EVTEA pode abranger não apenas os custos de implantação do empreendimento, mas também os custos associados aos riscos inerentes à sua operação. Isso possibilita uma avaliação precisa dos custos de desapropriação ou até mesmo a necessidade de ampliação do Fator de Segurança dos taludes.

Diante desse cenário, este Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Segurança de Barragens apresenta uma proposta de metodologia baseada na mancha de inundação para a utilização da análise de riscos na elaboração do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental.

2 DESENVOLVIMENTO OU CORPO DO ARTIGO

Esse capítulo apresenta uma revisão do estado da arte da análise de risco associada à análise de viabilidades. Essa revisão aborda desde os conceitos de análise de viabilidade econômica, risco, probabilidade de falha e de vulnerabilidades.

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

2.1.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE

A elaboração de um projeto ou programa de infraestrutura exige a elaboração de um sólido "plano de negócios" ou "estudo de viabilidade", delineando a necessidade e os meios de implementação do empreendimento. Essa orientação propõe uma metodologia abrangente para a reflexão, conceitualização, desenvolvimento e aprovação de Propostas de Investimento em infraestrutura. Sua aplicação proporcionará confiança aos responsáveis pela produção dos estudos de viabilidade, aos tomadores de decisão e potenciais investidores, além de fornecer uma salvaguarda aos gestores para garantir a consideração adequada de todos os aspectos relevantes do projeto e mitigar os riscos que possam surgir durante sua execução (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2022).

A análise de viabilidade econômica e financeira é uma etapa essencial, integrada ao escopo das atividades da engenharia econômica, que visa identificar os benefícios esperados de um determinado investimento e compará-los com os custos associados, a fim de determinar sua viabilidade. Como afirmado por Veras (2001), a engenharia econômica consiste no estudo dos métodos e técnicas utilizados para analisar aspectos econômico-financeiros de investimentos.

Casarotto Filho & Kopittke (2008) destacam que a decisão de implementar um projeto deve levar em consideração critérios econômicos, como a rentabilidade do investimento, critérios financeiros, como a disponibilidade de recursos, e critérios intangíveis, incluindo fatores não monetários, como a reputação do fornecedor.

No início, as análises econômicas relacionadas à água se concentraram na avaliação da demanda para o abastecimento doméstico e nos efeitos dos preços e das políticas de tarifação sobre o consumo para esse fim. Diversos estudos desse tipo são encontrados na literatura, principalmente nos Estados Unidos (FOSTER; BEATTIE, 1979; HOWE, 1982; NIESWIADOMY, 1992; HÖGLUND, 1999).

No Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), por exemplo, foi desenvolvido um modelo computadorizado de simulação do consumo, distribuição e produção de água em sistemas públicos – o SIMOP (Simulador de Obras Públicas) – com o propósito de calcular os benefícios econômicos decorrentes da ampliação da capacidade de produção de água (POWERS; VALENCIA, 1978). Esse modelo utiliza três tipos de curvas de demanda, elaboradas com base em informações sobre o preço médio da água, o consumo agregado e a elasticidade-preço da demanda. O benefício líquido associado à expansão do consumo é calculado com base no excedente do consumidor. O SIMOP tem sido empregado na avaliação

de projetos financiados por programas de investimento no Brasil, tanto pelo BID quanto pelo Banco Mundial.

Baseado em uma análise de vinte e uma avaliações econômicas de projetos de abastecimento de água financiados pelo Banco Mundial, Lovei (1992) propõe um método alternativo de análise fundamentado no cálculo do excedente do consumidor. Nesse método, a água fornecida por um novo projeto é dividida em duas partes: uma que substitui a quantidade então fornecida por outras fontes (assumindo que os consumidores não as utilizariam mais) e outra que representa um aumento líquido no consumo. A primeira parte é avaliada com base na redução dos custos de obtenção da água impostos aos consumidores, enquanto a segunda é calculada com base no excedente do consumidor. A curva de demanda utilizada para esse cálculo é derivada da agregação de duas outras: uma associada à água para beber e outra relacionada aos demais usos domésticos (higiene, limpeza, jardinagem, etc.). Esse modelo foi desenvolvido para projetos de pequeno e médio porte, nos quais geralmente há uma maior homogeneidade nas características dos consumidores, especialmente em termos de renda e custos associados às fontes alternativas de água.

2.1.2 RISCO

O conceito de risco varia de acordo com a área científica em que é observado. Na biologia, o risco está relacionado à ameaça que um agente patogênico representa para a vida humana. No contexto financeiro, refere-se ao potencial de um investimento não alcançar o resultado esperado. Na engenharia, o conceito de risco é mais categorizado, sendo definido como a probabilidade de falha de um empreendimento multiplicada pela consequência potencial dessa falha.

Segundo a Sociedade Internacional de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE, 2004), o risco é a probabilidade e a severidade de um efeito adverso para a vida, saúde, propriedade ou meio ambiente. Assim, a gravidade das consequências desempenha um papel determinante no risco de um empreendimento.

O valor desse risco pode ser quantificado, e Einstein (1996) o define quantitativamente como o desempenho combinado com o potencial valor de perda, podendo ser expresso como:

$$R (\text{Risco}) = P(\text{Desempenho}) \times \text{Potencial de Perdas} \quad (1)$$

Nessa equação, a probabilidade representa a chance de ocorrência do evento adverso, enquanto a consequência refere-se ao impacto ou dano resultante desse evento. A multiplicação desses dois fatores oferece uma medida quantitativa do risco associado a determinado empreendimento.

Essa abordagem permite uma avaliação mais precisa dos riscos envolvidos em projetos de engenharia, possibilitando uma gestão mais eficaz e a implementação de medidas preventivas adequadas para mitigar esses riscos.

Nenhum projeto de engenharia é completamente imune à falha; mesmo com um projeto bem elaborado e controle rigoroso dos materiais e da execução, sempre há uma probabilidade de falha. O termo "falha" pode abranger desde a ruína ou ruptura até o desempenho aquém do esperado para o qual o projeto foi concebido. Conforme observado por Duncan (1999), o termo "falha" não necessariamente implica em uma falha catastrófica. Em certas circunstâncias, seria mais apropriado usar o termo "desempenho insatisfatório", como é adotado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 1995), em vez de "falha".

Em qualquer análise que se pretenda realizar, é essencial identificar o indicador de desempenho, ou seja, o fator crítico que, ao ser atingido ou não, dependendo do parâmetro analisado, caracteriza a falha. Dessa forma, a probabilidade de falha é entendida como a probabilidade de um determinado fator crítico ser superado ou não alcançado.

$$PF = P(y > y_{crítico}) \quad (2)$$

$$F = P(y < y_{crítico}) \quad (3)$$

Isso significa que a probabilidade de falha é determinada pela chance de ocorrência de um evento que leve à não realização do desempenho esperado ou ao alcance do objetivo estabelecido para o projeto. Essa probabilidade pode ser calculada com base em diversos fatores, como condições ambientais, qualidade dos materiais, competência da mão de obra, entre outros.

A compreensão e a avaliação da probabilidade de falha são fundamentais para a gestão de riscos em projetos de engenharia, permitindo que medidas preventivas e corretivas sejam implementadas para reduzir a possibilidade de ocorrência de falhas e seus potenciais impactos.

2.1.3 PROBABILIDADE DE FALHA

Foster et al. (2000) afirmam que as barragens podem romper de quatro formas distintas: galgamento, erosão interna, instabilidade de taludes e instabilidade sísmica. Analisando as estatísticas sobre ruptura de grandes barragens construídas até 1986, excluindo as barragens construídas no Japão antes de 1930 e na China (Figura 1), observa-se que o galgamento e a erosão interna representam juntos a parcela considerável de 94,5% das rupturas.

Modo de ruptura	Nº de casos		% de rupturas (modo de ruptura conhecido)	
	Rupturas (total)	Ruptura em operação	Rupturas (total)	Ruptura em operação
Galgamento e estruturas auxiliares				
Galgamento	46	40	35,9	34,2
Vertedouro-comporta	16	15	12,5	12,8
<u>Subtotal</u>	<u>62</u>	<u>55</u>	<u>48,4</u>	<u>47</u>
Erosão interna				
Através do maciço	39	38	30,5	32,5
Através do maciço	19	18	14,8	15,4
Do maciço para a fundação	2	2	1,6	1,7
<u>Subtotal</u>	<u>59</u>	<u>57</u>	<u>46,1</u>	<u>48,7</u>
Instabilidade de taludes				
Montante	6	4	4,7	3,4
Jusante	1	1	0,8	0,9
<u>Subtotal</u>	<u>7</u>	<u>5</u>	<u>5,5</u>	<u>4,3</u>
Instabilidade sísmica	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1,6</u>	<u>1,7</u>
Modo desconhecido	8	7		
Nº total de rupturas	136	124		
Nº total de rupturas (modo conhecido)	128	117		
Nº de barragens de aterro compactado	11.192	11.192		

Figura 1: Estatísticas de falhas em barragens de aterro compactado (modificado – FOSTER et al., 2000).

Para calcular a probabilidade de falha de um elemento na engenharia, é essencial identificar o indicador de desempenho que caracteriza a falha. Nesse contexto, na análise de estabilidade, é crucial identificar a variável dependente a ser avaliada, ou seja, o indicador de desempenho que garante essa estabilidade e evita a ocorrência de falhas. No caso de taludes, o fator de segurança (FS) é amplamente utilizado como critério de estabilidade. O FS é definido como a relação entre as forças de resistência e as forças atuantes no talude.

A probabilidade de falha é derivada da distribuição de probabilidade do indicador de desempenho analisado, que é obtida usando métodos probabilísticos que consideram as probabilidades das variáveis que o compõem (no caso de serem variáveis aleatórias independentes). Em outras palavras, as variáveis que compõem a formulação de engenharia do indicador de desempenho possuem uma distribuição estatística específica, tornando o próprio indicador uma distribuição probabilística.

Sousa e Silva (2017) demonstram, conforme a Figura 2, que há boa Análise de Probabilidade de Falha para barragens de argila com a utilização de truncamento de dois desvios padrões.

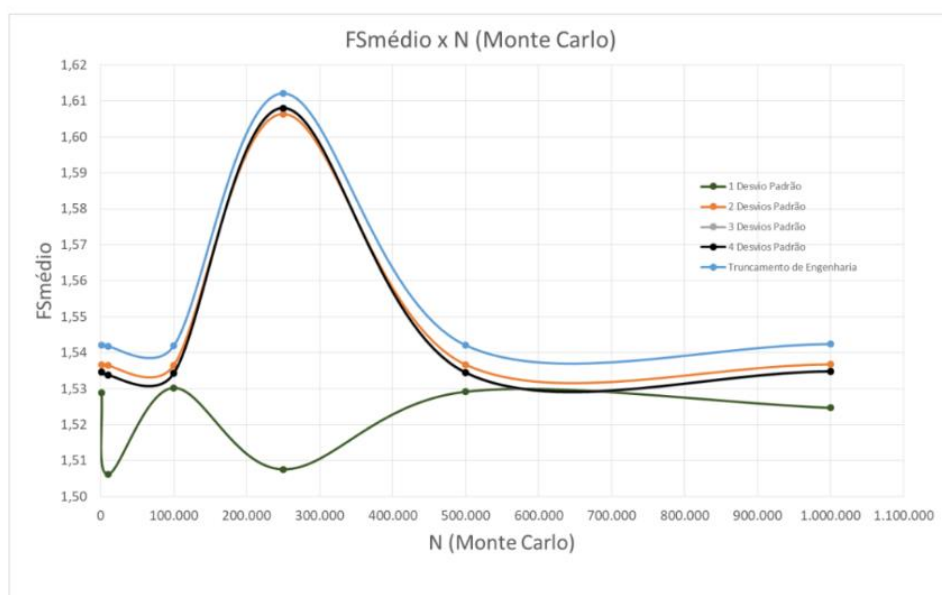


Figura 2: Análise de Probabilidade de Falha para barragens de argila com a utilização de truncamento de dois desvios padrões

2.1.4 VULNERABILIDADE (POTENCIAL DE PERDAS)

As vidas perdidas prematuramente por acidentes ocupacionais, violência ou poluição representam importantes custos financeiros para a sociedade. Em termos gerais, o custo indireto é calculado a partir de uma medida monetária, considerando o que um indivíduo poderia contribuir durante seu ciclo de vida, seja por meio do consumo, pagamento de impostos, produtividade no trabalho, entre outros. As técnicas que incorporam esse elemento de análise são conhecidas como Valor Estatístico da Vida (VEV).

A maior dificuldade na obtenção de estimativas do VEV reside na determinação da DAP (Disposição a Pagar) ou DAR (Disposição a Receber) associada a uma determinada variação

no risco de sobrevivência. Em certas situações, como a compra de um mesmo carro com ou sem equipamentos de segurança, ou a escolha entre ocupações semelhantes, mas com diferentes riscos de fatalidade, é possível determinar a DAR pelas preferências reveladas pelas pessoas.

Stivali (2022) define que, na maioria dos casos, no entanto, não há situações reais em que escolhas relevantes sejam efetivamente feitas ou observáveis para identificar essas preferências. Nessas circunstâncias, essas quantidades podem ser definidas apenas por meio de técnicas de valoração contingente. Essas técnicas envolvem a tentativa de identificar as preferências das pessoas por meio de questionários que apresentam uma ou mais situações hipotéticas, contextualizadas, nas quais os participantes avaliam a variação nos riscos de fatalidade associados a um valor monetário. Essa abordagem é denominada valoração contingente porque os valores identificados dependem da existência dos mercados hipotéticos considerados. As preferências identificadas por esse tipo de avaliação são chamadas de preferências declaradas (PD). Restrições de tempo, recursos ou dados podem inviabilizar a obtenção de estimativas do VEV tanto por técnicas de PR (Preferências Reveladas) quanto de PD (Preferências Declaradas). No entanto, há uma terceira opção para obtenção de estimativas, chamada de transferência de benefícios. Nessa técnica, os valores estimados em diferentes contextos e/ou países são adaptados para o contexto em que a Análise Custo-Benefício (ACB) será realizada. Por exemplo, o VEV estimado por PR ou PD em outro país é ajustado para o país ou região de interesse. Essa técnica não se limita apenas ao VEV, mas também é utilizada para diferentes quantidades em ACB, como o valor da disposição a pagar pelo uso recreativo de um parque, o valor da disposição a pagar pela qualidade da água em um rio, entre outros.

Os estudos que lidam com a comparação de estimativas do VEV em diferentes moedas e momentos do tempo apresentam diversas soluções para a padronização dos valores. De Blaeij et al. (2003) realizam primeiro a correção pela inflação e, em seguida, a conversão de moedas, considerando a taxa de câmbio corrigida pela paridade do poder de compra (PPP). Bellavance et al. (2009) convertem as moedas considerando a PPP e depois corrigem a inflação para a data de referência. Hultkrantz & Svensson (2012) convertem todos os valores para coroas suecas usando uma taxa de câmbio fixa e consideram preços de 2010, embora não seja clara a ordem entre a conversão de moedas e a correção da inflação.

Stivali (2022) realizou um levantamento da literatura relacionada à estimação do Valor Estatístico da Vida (VEV) para o Brasil. Comparativamente a outros países, há poucas estimativas desse valor para o Brasil, mas essas estimativas apresentam grande variabilidade.

O trabalho produziu uma estimativa sumária das estimativas do VEV encontradas na literatura em trabalhos com dados suficientes para tal cálculo, chegando ao valor de R\$ 5,67 milhões (em valores de janeiro de 2022).

2.1.5 ESTIMATIVA DE PERDAS

De acordo com o Manual de Priorização de Riscos (FEMA, 2008), pode-se assumir três pessoas para cada habitação dentro da área de inundação. Presume-se que pontes e estradas tenham 2 ocupantes e parques de trailers, escolas, instalações recreativas incluindo áreas de pesca, e as propriedades comerciais são caracterizadas com base em seu tamanho e uso temporal (sazonal). Se o Utilizador tiver informações específicas, outras taxas de ocupação poderão ser usadas.

A abordagem apresentada em Graham (2004) não leva em conta a atenuação da onda de inundação do rompimento da barragem ou o efeito da grande contribuição de drenagem áreas abaixo da barragem. Como tal, as estimativas das taxas de mortalidade baseadas na distância a jusante da barragem e a relação entre o pico de descarga do rompimento da barragem e o pico de 10 anos a descarga podem ser distorcidas. De qualquer forma, na falta de qualquer análise detalhada de rompimento de barragens e inundação, a abordagem e as estimativas da taxa de mortalidade são razoáveis e baseadas em dados reais de rompimento de barragens eventos.

2.2 METODOLOGIA

Inicialmente, analisou-se o impacto de uma mancha de inundação hipotética da Zona de Autossalvamento (ZAS) da barragens destacadas na Tabela 1, para verificar o eventual impacto de uma ruptura de barragem. A escolha se limitou à ZAS, pois, na fase de Estudo de Viabilidade, ainda é uma análise prévia para avaliação do impacto econômico da obra.

Um exemplo de mancha de inundação da ZAS pode ser verificado na Figura 3, que é análise realizada para a barragem de Bico da Pedra, em Janaúba-MG.

Como já elencado, a mancha de inundação da ZAS poderia ter sido elaborada já na fase de viabilidade.

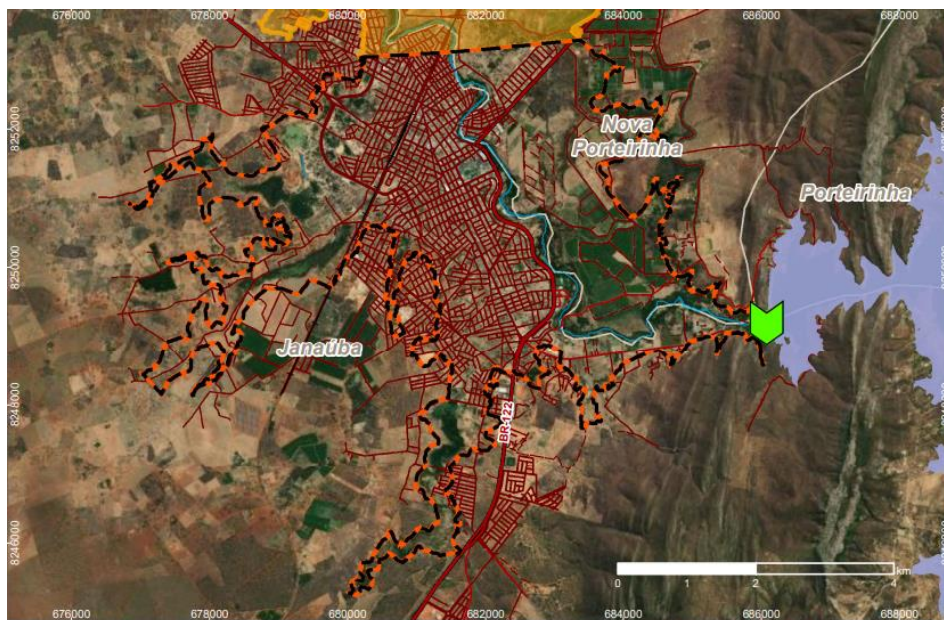


Figura 3: Mancha de Inundação de Bico da Pedra (Plano de Segurança da Barragens de Bico da Pedra – Codevasf (2019))

Para realização de análise de risco em barragens reais, como o caso de Bico da Pedra, , para verificação da população vulnerável a essa mancha. poderiam ser utilizados dados do IBGE – Censo 2022. Na ausência desses, poderiam ser utilizadas as aproximações do Manual de Priorização de Riscos (FEMA, 2008).

Como a abordagem deste estudo é hipotética e se interessa com o trabalho em faixas de valores de população, foram idealizadas 5 manchas hipotéticas que corresponderiam a 50% de um município. Um resumo do que foi aplicado está exposto na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo da População Impactada pelas Manchas de Inundação Hipotéticas

População	Cidade	Porcentagem do Município Inserido na Mancha da ZAS	População na Mancha da ZAS
10.000	Cidade da Mancha A	50%	5.000
20.000	Cidade da Mancha B	50%	10.000
30.000	Cidade da Mancha C	50%	15.000
40.000	Cidade da Mancha D	50%	20.000

O Índice de Fatalidade foi calculado com a média dos dois índices de fatalidades com as distâncias existente na mancha de inundação da ZAS. Ou seja: 0,625.

Dessa maneira, multiplicando-se a população total da mancha de inundação da ZAS de cada cidade com o índice de fatalidade de 0,625, verificou-se que o total de fatalidades, em caso de ruptura da barragem, seria de 3.125 pessoas para a Cidade da Mancha A, 6.250 pessoas para a Cidade da Mancha B, 9.375 pessoas para a Cidade da Mancha C e 12.500 pessoas para a Cidade da Mancha D.

Com base no estudo de Stivali (2022), cada morte no país tem impacto financeiro médio de R\$ 5,67 milhões. Ou seja, o rompimento da barragem hipotética dependeria do número de fatalidades de cada mancha. Assim, em caso de ruptura, a Cidade A teria como impacto financeiro R\$ 17.718.750.000,00; a Cidade B teria como impacto financeiro R\$ 35.437.500.000,00; a Cidade C teria como impacto financeiro R\$ 53.156.250.000,00 e a Cidade D teria como impacto financeiro R\$ 70.875.000.000,00.

Após a definição da vulnerabilidade, definiu-se os valores de Probabilidade de Falha que seriam associados a essas vulnerabilidades financeiras.

De acordo com os estudos de (FOSTER et al., 2000), verificou-se que, para a barragem em questão, os principais mecanismos de falha são: galgamento, erosão interna e ruptura de taludes.

- Probabilidade de Falha de Galgamento deve-se calcular de acordo com o Tempo de Retorno utilizado para cada dimensão de barragem: Bico da Pedra possui Tempo de Retorno de 10.000 anos.

Pela equação abaixo, pode-se determinar sua probabilidade de falha para galgamento:

$$PFG = \frac{1}{TR} \quad (4)$$

Onde:

PFG = Probabilidade de Falha por Galgamento;

TR = Tempo de Retorno.

Todavia, erosão interna e ruptura de taludes não são mecanismos que são possíveis de avaliação de cálculo já na fase de viabilidade. Assim, essas probabilidades de falha podem ser apenas estimadas.

- Probabilidade de Falha de erosão interna foi admitida como o número de ocorrências desse mecanismo em (FOSTER et al., 2000) dividido pelo número de barragens analisadas nesse estudo. Ou seja:

$$PFEI = \frac{TBEI}{TBG} \times PFG \quad (5)$$

Onde:

PFEI = Probabilidade de Falha por Erosão Interna;

TBEI = Total de barragens avaliadas com erosão interna em FOSTER et al., 2000.

TBG = Total de barragens avaliadas com galgamento em FOSTER et al., 2000.

- Probabilidade de Falha de ruptura de taludes foi retirada de estudo de probabilidade de falha por truncamento de com 2 desvios padrões de (SOUSA & SILVA, 2017). Assim, para o caso de Bico da Pedra: 1×10^{-5} .

Após o cálculo das 3 probabilidades de falhas mais significativas, utilizou-se a formulação de Einstein (1996) para definição de cada risco:

$$R (\text{Risco}) = P(\text{Desempenho}) \times \text{Potencial de Perdas} \quad (6)$$

Com isso, somou-se o risco total de construção e operação da barragem.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no impacto financeiro da ruptura hipotética da barragem da Mancha A, na Tabela 2, expõe-se o cálculo do risco total envolvido nos três principais modos de falha.

Tabela 2: Resultados dos Riscos de cada Modo de Falha e o Valor Total – Barragem com Mancha de Inundação A

Modo Falha	Probabilidade de Falha	Impacto Financeiro	Risco
Galgamento	0,0001	R\$ 17.718.750.000,00	R\$ 1.771.875,00
Erosão Interna	0,0001	R\$ 17.718.750.000,00	R\$ 1.771.875,00
Ruptura Taludes	0,00001	R\$ 17.718.750.000,00	R\$ 177.187,50
			R\$ 3.720.937,50

Com base no impacto financeiro da ruptura hipotética da barragem da Mancha B, na Tabela 3, expõe-se o cálculo do risco total envolvido nos três principais modos de falha.

Tabela 3: Resultados dos Riscos de cada Modo de Falha e o Valor Total – Barragem com Mancha de Inundação B

Modo Falha	Probabilidade de Falha	Impacto Financeiro	Risco
Galgamento	0,0001	R\$ 35.437.500.000,00	R\$ 3.543.750,00
Erosão Interna	0,0001	R\$ 35.437.500.000,00	R\$ 3.543.750,00
Ruptura Taludes	0,00001	R\$ 35.437.500.000,00	R\$ 354.375,00
			R\$ 7.441.875,00

Com base no impacto financeiro da ruptura hipotética da barragem da Mancha C, na Tabela 4, expõe-se o cálculo do risco total envolvido nos três principais modos de falha.

Tabela 4: Resultados dos Riscos de cada Modo de Falha e o Valor Total – Barragem com Mancha de Inundação C

Modo Falha	Probabilidade de Falha	Impacto Financeiro	Risco
Galgamento	0,0001	R\$ 53.156.250.000,00	R\$ 5.315.625,00
Erosão Interna	0,0001	R\$ 53.156.250.000,00	R\$ 5.315.625,00
Ruptura Taludes	0,00001	R\$ 53.156.250.000,00	R\$ 531.562,50
			R\$ 11.162.812,50

Com base no impacto financeiro da ruptura hipotética da barragem da Mancha D, na Tabela 5, expõe-se o cálculo do risco total envolvido nos três principais modos de falha.

Tabela 5: Resultados dos Riscos de cada Modo de Falha e o Valor Total – Barragem com Mancha de Inundação D

Modo Falha	Probabilidade de Falha	Impacto Financeiro	Risco
Galgamento	0,0001	R\$ 70.875.000.000,00	R\$ 7.087.500,00
Erosão Interna	0,0001	R\$ 70.875.000.000,00	R\$ 7.087.500,00
Ruptura Taludes	0,00001	R\$ 70.875.000.000,00	R\$ 708.750,00
			R\$ 14.883.750,00

Ou seja, além dos custos de implantação previstos em um eventual Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental, deveria ser avaliado o risco envolvido na susceptibilidade a falha da estrutura.

Para os casos analisados, verificou-se que os riscos associados foram bem elevados.

3. CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo deste artigo utilizou uma análise de risco baseada somente no impacto sobre eventuais mortes decorrentes rupturas hipotéticas. Em desastres reais, além das vidas impactadas de maneira direta, ainda há custo com reconstrução de infraestruturas públicas, casas, redes de energia, abastecimento de água e saúde. Todavia, mesmo com essa simplificação, houve como resultado um risco financeiro relevante.

Desse modo, já no EVTEA, o empreendedor deve considerar o impacto sobre eventuais mortes decorrentes de uma possível ruptura da barragem. E, assim, avaliar se o remanejamento de pessoas para áreas fora da mancha de inundação é condição mais vantajosa economicamente.

Além de avaliar o remanejamento, há a possibilidade de se aumentar o Fator de Segurança de projeto, ou ainda, atuar com redução de outras vulnerabilidades. Ou seja, promovendo um Plano de Ação Emergencial mais eficiente. Assim, fazendo cálculos dos índices de fatalidades.

Tendo em vista o valor relevante do impacto financeiro de eventual ruptura de barragens como manchas de inundação da Zona de Autossalvamento parecidas com Bico da Pedra, que estejam com municípios inscritos dentro da mancha, sugere-se que essa metodologia seja aplicada com o decorrer do tempo. A fim de fazer comparações com o valor encontrado com o acréscimo de população residindo dentro da área da mancha.

Recomenda-se ainda que seja avaliada a probabilidade de falha para erosão interna com base em estudo de gradientes críticos. Assim, o valor calculado para esse tipo de falha será mais bem definido para a realidade analisada.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13531: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1995.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO AMBIENTAL (ANA). Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017. Estabelece diretrizes para a gestão de segurança de barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BELLAVANCE, F.; DIONNE, G.; LEBEAU, M. The value of a statistical life: A meta-analysis with a mixed effects regression model. *Journal of Health Economics*, v. 28, n. 2, p. 444–464, 2009.

BRASIL. Lei nº 14.066, de [data de publicação]. Dispõe sobre a segurança de barragens e altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria Especial de Produtividade e Competitividade. Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura. Estruturação de propostas de investimento em infraestrutura: modelo de cinco dimensões - Brasília: SDI/SEPEC/Ministério da Economia, 2022. 285

CASAROTTO FILHO, Nelson C.; KOPITKE, Bruno H. *Análise de Investimentos*. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

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

DE BLAEIJ, A. et al. The value of statistical life in road safety: a meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, v. 35, n. 6, p. 973–986, 2003.

DUNCAN, J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 4, p. 307-316, 2000.

EINSTEIN, H. H. Risk and risk analysis in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 11, n. 2, p. 141–155, 1996.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). *Risk Prioritization Tool for Dams - Users Manual*. 2008.

FOSTER, H.S.; BEATTIE, B.R. Urban Residential Demand for Water in the United States. *Land Economics*, v. 55, n. 1, p. 43-58, 1979.

FOSTER, M. et al. *The statistics of embankment dam failures and accidents*. NRC, Canadá, 2000.

GRAHAM, Wayne. *Risk-Based Dam Safety Prioritization: A Method for Easily Estimating the*

Loss of Life from Dam Failure. Draft, 2004.

HÖGLUND, L. Household demand for water in Sweden with implications of a potential tax on water use. *Water Resources Research*, v. 35, n. 12, p. 3853-3863, 1999.

HOWE, C.W. The Impact of Price on Residential Water Demand: Some New Insights. *Water Resources Research*, v. 18, n. 4, p. 713-716, 1982.

HULTKRANTZ, L.; SVENSSON, M. The value of a statistical life in Sweden: A review of the empirical literature. *Health Policy*, v. 108, n. 2, p. 302–310, 2012.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING. Glossary of Risk Assessment Terms. Disponível em: http://engmath.dal.ca/tc32/2004Glossary_Draft1.pdf. Acesso em: março de 2024.

LOVEI, L. An Approach to the Economic Analysis of Water Supply Projects. The World Bank, Washington D.C., E.U.A., 1992.

NIESWIADOMY, M.L. Estimating Urban Residential Water Demand: Effects of Price Structure, Conservation, and Education. *Water Resources Research*, v. 28, n. 3, p. 609-615, 1992.

POWERS, T.A.; VALENCIA, C.A. Modelo de Simulación de Obras Publicas (SIMOP) - Manual do Usuário.

SILVA, B.W.G.; SOUSA, T.F.P. Estudo do Efeito do Truncamento dos Parâmetros de Entrada na Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

STIVALI, MATHEUS. Valor de uma vida estatística: uma revisão da literatura empírica para o Brasil. Junho de 2022. Publicação do IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Programa de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional - PNPd.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicações. Editora ND-ABRH, 2001.

VERAS, Luiz L. Matemática financeira: uso de calculadoras financeiras, aplicações ao mercado financeiro, introdução à engenharia econômica, 300 exercícios resolvidos e propostos com respostas. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

U.S. Army Corps of Engineers. Introduction to Probability and Reliability Methods For Use in Geotechnical Engineering. Engineering Technical Letter, No 1110-2-547, 1997.