



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE RISCO E DESASTRES NATURAIS  
NA AMAZÔNIA**

**RAIMUNDO ALMIR COSTA DA CONCEIÇÃO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DE ROMPIMENTO EM BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A METODOLOGIA *RISK-BASED PROFILING SYSTEM* (RBPS)**

**BELÉM - PA  
2018**

**RAIMUNDO ALMIR COSTA DA CONCEIÇÃO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DE ROMPIMENTO EM BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A METODOLOGIA *RISK-BASED PROFILING SYSTEM* (RBPS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastres Naturais na Amazônia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Gestão de Risco.

Área de concentração: Minimização de riscos e mitigação de desastres naturais na Amazônia

Orientadora: Profª Drª. Aline Maria Meiguins de Lima

**BELÉM – PA**  
**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Conceição, Raimundo Almir Costa

Análise do potencial de risco de rompimento em barragens de rejeito de mineração do Estado do Pará utilizando a metodologia *Risk-Based Profiling System* (RBPS) / Raimundo Almir Costa da Conceição; Orientadora: Dr<sup>a</sup> Aline Maria Meiguins de Lima - 2018

68f

Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2018.

1. Introdução.

---

**RAIMUNDO ALMIR COSTA DA CONCEIÇÃO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RISCO DE ROMPIMENTO EM BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A METODOLOGIA *RISK-BASED PROFILING SYSTEM* (RBPS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastres Naturais na Amazônia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Gestão de Risco.

Área de concentração: Minimização de riscos e mitigação de desastres naturais na Amazônia

Defesa: Belém, \_\_\_/\_\_\_/2018

Conceito da Defesa: \_\_\_\_\_

**Banca Examinadora**

---

**Profª Drª. Aline Maria Meiguins de Lima**  
Orientadora, UFPA

---

**Milena Marília Nogueira de Andrade**  
Avaliadora, UFPA

---

**Maurício da Silva Borges**  
Avaliador, UFPA

---

**Renato Silva Júnior**  
Avaliador Externo, VALE

## **AGRADECIMENTOS**

À Defesa Civil Estadual do Pará pelo suporte e disponibilização dos Planos de Ação Emergencial. À Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA) pela disponibilização dos dados digitais do Plano de Ação Emergencial. Ao Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) pela utilização dos dados do SIGBM. E ao Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

Do fundo desta noite que persiste  
A me envolver em breu - eterno e espesso,  
A qualquer deus - se algum acaso existe,  
Por mi'alma insubjugável agradeço

William E Henley

## RESUMO

Os desastres socioambientais graves e muito graves relacionados ao rompimento de barragens de rejeito de mineração vêm apresentando mundialmente, uma tendência crescente desde a década de 1960 e isso está diretamente relacionado com as produções de resíduos cada vez maiores. Neste contexto, há necessidade fundamental de análises de risco e segurança dessas barragens, que podem ser feitas por métodos que estimam a probabilidade de ocorrência de eventos de rompimento com a finalidade de tornar o processo de tomada de decisões mais balizado e seguro. Uma dessas análises é a denominada *Risk-Based Profiling System* (RPBS) que permite aferir, a partir de dados qualitativos, a probabilidade de um rompimento e suas prováveis consequências a partir da formulação dos quatro cenários mais frequentes (estático, hidrológico, sísmico e operação e manutenção). Essa análise foi aplicada a seis barragens de mineração do estado do Pará, municípios de Parauapebas, Paragominas e Canaã dos Carajás. Os resultados mostraram que, no universo da análise, a barragem B3 foi a que apresentou o maior Índice de Falha (455,18), seguida da barragem B1 (428,63) e da B2 (375,66). Entretanto, a barragem com maior risco para as áreas a jusante foi a B2 com um Índice de Risco Total de 969,20 pontos devido, principalmente, ao número elevado de pessoas possivelmente atingidas (12.900 pessoas). Esta mesma barragem é a que afetaria o maior número de componentes socioambientais, definida então como possível causadora de danos extremos. Em comparação com a análise de risco estabelecida em lei, a análise RBPS, mostrou semelhanças, porém, mais detalhada em função da geração de quatro cenários de análise, ao invés de apenas um. Foi possível também, a partir deste estudo, a elaboração de um guia de análise de risco para barragens de mineração.

Palavras-chave: Análise de risco; Barragens; Mineração; Cenários.

## ABSTRACT

The serious and very serious socioenvironmental disasters related to disruption in mining tailings dams have been exhibiting worldwide, a growing tendency since the 1960s and this is directly related to the increasing production of waste. In this context, there is a fundamental necessity for risk and safety analyzes of these dams, which can be done through methods that estimate the probability occurrence of disruption events, in order to make the decision to have a process more focused and safe. One of these analyzes is the so-called Risk-Based Profiling System (RPBS), which allows us to gauge, from qualitative data, the probability of a disruption and its probable consequences, which comes from the four most frequent scenarios (static, hydrological, seismic and operation and maintenance). This analysis was applied to six mining dams in the State of Pará, municipalities of Parauapebas, Paragominas and Canaã dos Carajás. The results showed, in the universe of analysis, dam B3 was the one with the highest failure rate (455.18), followed by the dam B1 (428.63) and the dam B2 (375,66). However, the dam with the highest risk for downstream areas was B2 with a Total Risk Index of 969.20 points, mainly due to the large number of possible people affected (12,900 people). This same dam is the one that would affect the greatest number of socioenvironmental components, defined then with possible cause of extreme damages. Compared with the risk analysis established in law, the RBPS analysis showed similarities, but more detailed in function of the four scenarios of analysis that will be generated, rather than just one. A risk analysis guide for dams was created as well, which came out from this present study.

Keywords: Risk Analysis; Dams; Mining; Scenarios.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de barragens mais comuns no armazenamento de rejeitos. ....	24
Figura 2 – Número de falhas em barragens de rejeito por década. ....	26
Figura 3 – Etapas da gestão de risco com destaque para a análise de risco. ....	30
Figura 4 – Localização das barragens em estudo. ....	33
Figura 5 – Fluxograma resumindo os passos da metodologia RBPS. ....	40
Figura 6 – Vetores de ponto, em verde, sobre imagem CNES/Airbus (Google Earth Pro) dentro dos limites da mancha de atingimento (em vermelho) modelada para a barragem B2. ....	47
Figura 7 – Gráfico comparativo entre os fatores de resposta para os cenários de solicitação das barragens. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação quanto à categoria de risco. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos as respectivas características durante a análise de risco. ....	18
Tabela 2 – Classificação quanto ao estado de conservação da barragem. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos as respectivas características durante a análise de risco.....	19
Tabela 3 – Classificação quanto ao Plano de Segurança de Barragens - PSB. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos as respectivas características durante a análise de risco.....	20
Tabela 4 – Faixa de classificação das Categorias de Risco - CR. ....	20
Tabela 5 – Classificação quanto ao Dano Potencial Associado – DPA. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos as respectivas características durante a análise de risco.....	21
Tabela 6 – Faixa de classificação do Dano Potencial Associado – DPA.....	21
Tabela 7 – Acidentes com barragens no Brasil. ....	27
Tabela 8 – Acidentes com barragens em outros países. ....	28
Tabela 9 – Principais características técnicas das barragens analisadas. ....	34
Tabela 10 – Fontes de informação utilizadas neste estudo, órgão que disponibilizou e formato do arquivo. ....	35
Tabela 11 – Cenários de rompimento hipotético de barragem ( <i>Dam Break</i> ), selecionados para a análise de risco.....	37
Tabela 12 – Valores de pontuação atribuídos a cada cenário de solicitação na metodologia RBPS. ....	39
Tabela 13 – Probabilidades adotadas, através da técnica de transformação verbal. ....	41
Tabela 14 – Fatores de carga utilizados para todas as barragens. ....	41
Tabela 15 – Pontuação para os fatores de resposta do cenário estático. ....	42
Tabela 16 – Pontuação para os fatores de resposta do cenário hidrológico. As categorias destacadas em negrito foram adicionadas para este estudo. ....	43
Tabela 17 – Pontuação para os fatores de resposta do cenário sísmico. As categorias destacadas em negrito foram adicionadas para este estudo. ....	44
Tabela 18 – Pontuação para os fatores de resposta do cenário de operação e manutenção. As categorias destacadas em negrito foram adicionadas para este estudo.....	45
Tabela 19 – Índice de fatalidade derivada de estudos de caso. ....	48
Tabela 20 – Pontuação para classificação do dano socioambiental ....	49
Tabela 21 – Resultado da análise de risco apresentando os fatores de resposta para cada cenário, o Índice de Falha, o Índice de Risco e o Índice Socioeconômico.....	51
Tabela 22 – Ranking dos IRT's das barragens avaliadas.....	52
Tabela 23 – Resultado da análise de risco socioambiental caracterizando a área potencialmente atingida a jusante.....	55

Tabela 24 – Comparativo entre a metodologia aplicada neste estudo e a metodologia de análise de risco utilizada no Brasil .....	58
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

ANM/DNPM – Agência Nacional de Mineração (anteriormente denominada como Departamento Nacional de Produção Mineral)

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens

CMP – Cheia Máxima Provável

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CR – Categoria de Risco

DPA – Dano Potencial Associado

DSG – Diretoria de Serviço Geográfico do Exército

FMEA – Análise dos Modos e Falhas e seus Efeitos

HAZOP – Estudos de Perigo e Operabilidade

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD – *International Commission on Large Dams*

IFT – Índice de Falha Total

IR – Índice de Risco

IRT – Índice de Risco Total

LCI – Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas

MDE – Modelos Digitais de Terreno (MDE)

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

O&M – Operação e Manutenção

PAE – Plano de Ação Emergencial

PAEBM – Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PSB – Plano de Segurança de Barragens

RBPS – Risk-Based Profiling System

SEMAS/PA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade

SGB/CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIGBM – Sistema de Informação Geográfica de Barragens de Mineração

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

TR – Tempo de Retorno

USACE – *US Army Corps of Engineers*

USBR - *United States Bureau of Reclamation*

UTM – *Universal Transverse Mercator*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1	POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (LEI Nº 12.334/2010) .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Sistema de classificação de barragens.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Plano de Segurança de Barragens e Plano de Ação Emergencial para Barragens de Mineração – PAEBM .....</b>	<b>22</b>
2.2	BARRAGENS DE REJEITO E ANÁLISE DE RISCO .....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	33
3.2	DADOS UTILIZADOS .....	34
3.3	METODOLOGIA E APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE RISCO ADOTADA .....	38
<b>3.3.1</b>	<b>Caracterização dos fatores de carga (<i>P (carga)</i>) .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Caracterização dos fatores de resposta para os cenários de solicitação (<i>P (resposta)</i>) .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Caracterização do Potencial de Perdas de Vidas Humanas .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Caracterização do dano socioambiental .....</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>50</b>
4.1	ANÁLISE DO ÍNDICE DE FALHA TOTAL (IFT), ÍNDICE DE RISCO TOTAL (IRT) E POTENCIAL DE PERDAS DE VIDAS .....	50
4.2	ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE SOLICITAÇÃO .....	52
4.3	ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL .....	
4.4	ANÁLISE E ENQUADRAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DA RESOLUÇÃO Nº 143/2012 DO CNRH .....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE A - GUIA DE ANÁLISE DE RISCO EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade fundamental para o país e para o mundo em vários aspectos da vida humana. O Brasil no contexto mundial da mineração é um exportador global de nióbio, minério de ferro, manganês, titanita, bauxita, entre outros. Mundialmente, entre 1920 e 2010, a produção de minério de ferro passou de 100 milhões para 3 bilhões de toneladas. Neste mesmo período, a produção de bauxita aumentou de pouco mais de 1 milhão para 250 milhões de toneladas (Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2014).

A extração dos recursos minerais resulta na produção simultânea de um volume significativo de material residual (rejeito<sup>1</sup> e estéril), incluindo rejeitos (KOSSOFF *et al.*, 2014). Sua quantidade global de aproximadamente 18 bilhões de m<sup>3</sup> por ano é equivalente a descarga real de sedimentos para os oceanos. Uma estimativa simplificada sugere que, devido à futura extração de minérios de baixo teor, a produção de resíduos de minas será duplicada dentro de um período de 20 a 30 anos (FÖRSTNER, 1999).

Dentro de uma perspectiva de análise de risco, a extração de recursos minerais é enquadrada como uma atividade que envolve risco tecnológico, pois esses riscos resultam do desrespeito pelas normas de segurança e pelos princípios que regem a produção, o transporte e o armazenamento de certos produtos, ou que envolvem o seu manuseamento ou o uso de determinada tecnologia, dentro do necessário respeito e equilíbrio que deverá existir entre a comunidade e o ambiente (LOURENÇO, 2007).

Quando examinados os dados entre 1910 a 2010 de falhas em barragens de armazenamentos de rejeito no mundo, verifica-se uma tendência emergente e pronunciada desde 1960 em direção a uma maior incidência de falhas “Graves” e “Muito Graves”. Ou seja, a consequência da perda está se tornando cada vez maior. Esta consequência exponencialmente crescente é impulsionada por graus continuamente mais baixos em recursos identificados e queda contínua dos preços reais da maioria dos metais, fazendo com que maiores quantidades de rejeitos sejam produzidas, representando um desafio cada vez maior para o gerenciamento de resíduos de mina (BOWKER; CHAMBERS, 2015).

A maior frequência de falhas “Graves” e “Muito Graves” em barragens de rejeito tem significativas consequências sociais e econômicas, às vezes não remediáveis; 49% de todas as

---

<sup>1</sup> Entende-se como rejeito os resíduos sólidos provenientes do beneficiamento do minério (IBRAM, 2016)

falhas “Graves” e “Muito Graves” registadas de 1940 a 2010 ocorreram a partir de 1990; dos 52 incidentes registados, 1990-2010, 33% foram falhas “Graves”, ou seja, grandes o suficiente para causar impactos significativos ou envolver perda de vidas. Outros 31%, foram falhas “Muito Graves”, onde, falhas catastróficas liberaram mais de 1 milhão de metros cúbicos de rejeitos e, em alguns casos, resultaram em múltiplas perdas de vida (BOWKER; CHAMBERS, 2015).

De acordo com Davies (2001), a taxa de falhas em barragens de rejeito foi estimada como sendo da ordem de 2 a 5 por ano. Dado o número atual de barragens de rejeito no mundo, cerca de 3.500, a taxa de falha é de 1 em 700 ou 1 em 1750. Essa é uma taxa considerada muito alta, principalmente se comparada à taxa de falhas em barragens de água, que é aproximadamente 1 em 10.000.

Em termos socioambientais, a grande magnitude e muitas vezes a natureza tóxica do material dentro das barragens de rejeitos significa que sua falha e a consequente descarga nos sistemas fluviais afetarão invariavelmente a qualidade da água, dos sedimentos e a vida aquática e humana (KOSSOFF *et al.*, 2014).

São inquestionáveis os danos causados pela falha na barragem do Fundão, no município de Mariana, Minas Gerais, onde 43 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro causaram problemas ambientais, poluindo 668 km de cursos d'água do rio Doce até o oceano Atlântico e a morte de 19 pessoas (CARMO *et al.*, 2017).

E ainda os danos causados pelo rompimento da barragem de rejeitos Aznalcóllar, a 45 km a oeste de Sevilha, Espanha, que inundou aproximadamente 4600 hectares de terra ao longo dos rios Agrio e Guadiamar, com aproximadamente 5,5 milhões de m<sup>3</sup> de água ácida e 137,8 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de metal pesado (HUDSON-EDWARDS *et al.*, 2003).

No estado do Pará, há registros de poluição do meio aquático, causada por vazamentos em barragens de mineração. Em junho de 2007, a empresa mineradora Imerys, foi responsável por um derramamento de Caulim que atingiu o Igarapé Dendê e o Rio Pará, no município de Barcarena, causando grandes transtornos à população que vive ao longo desses corpos d'água (G1, 2007).

Em fevereiro de 2018, ainda em Barcarena, a Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA) constatou o vazamento de rejeitos e diversos metais pesados que afetaram diretamente diversas comunidades ribeirinhas (G1 PARÁ, 2018).

Avaliando o convívio da sociedade com diversos acidentes envolvendo o rompimento de barragens, deu-se início na gestão de riscos aplicada a essas estruturas (VIANNA, 2015). Colle (2008) afirma que estas ferramentas atualmente são utilizadas por diversos países como Estados Unidos, Canadá, Noruega, França, Países Baixos, Suécia, Austrália, Portugal, Brasil, entre outros.

De acordo com Escuder *et al.* (2007) apesar de em alguns casos a análise de risco utilizar probabilidade e buscar um número final exato, o seu objetivo principal é obter um panorama geral da condição exposta a partir dos dados disponíveis, com a finalidade de garantir um sistema de gestão mais seguro.

No Brasil, a análise de risco oficial para barragens de mineração foi estabelecida pelo Conselho Nacional de Recurso Hídricos (CNRH) através da Portaria nº 143/2012, que estabelece os critérios gerais de classificação de barragens quanto ao risco e dano potencial. É utilizada atualmente pela Agência Nacional de Mineração (ANM/DNPM) em barragens que estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Art. 7º da Lei nº 12.334/2010).

Esta portaria classifica a barragem quanto a Categoria de Risco (CR), que está relacionada com aspectos da própria barragem (características técnicas, estado de conservação, plano de segurança, etc.) e que possam influenciar na possibilidade da ocorrência de acidente. Classifica também quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), isto é, o dano que poderá ser causado à jusante pelo mau funcionamento da barragem (existência de população a jusante, impacto ambiental e socioeconômico)

Os critérios estabelecidos pelo CNRH tem cumprido um papel fundamental na caracterização das barragens de mineração, porém não conseguem distinguir e detalhar algumas informações importantes para o gerenciamento de risco, como a caracterização da área a jusante e a classificação de barragens com níveis de risco altamente dispares, dentro de uma mesma classe, assim observado por Valerius (2014), que ao fazer a análise de risco das barragens do estado de Goiás, mostrou que uma das barragens possui um índice de risco quarenta vezes maior que o das outras barragens analisadas devido ao número de pessoas em risco.

Durante sua análise, Valerius (2014) utilizou uma análise qualitativa denominada *Risk-Based Profiling System* (RBPS), criada pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR), Agência Federal Americana responsável pela gestão do abastecimento de água em

17 estados americanos. Essa metodologia foi adaptada às condições das barragens de rejeito e aplicada de forma qualitativa na identificação e classificação do risco.

Na análise RBPS, o risco é estimado combinando a probabilidade de ocorrência de 4 cenários de solicitação (cenários estático, hidrológico, sísmico e de operação e manutenção – O&M) e, com a ocorrência do cenário, a probabilidade de incidir alguma falha na barragem. Após determinar a possibilidade de ocorrer algum desses eventos, é possível mensurar a magnitude das consequências (VALERIUS, 2014).

Para cada cenário é obtido o Índice de Falhas (IF), que é uma estimativa da probabilidade de falha da barragem. A soma dos IF's representará o Índice de Falha Total (IFT) da barragem. Posteriormente, cada IF é multiplicado pelas consequências, que por sua vez, caracterizam-se como o Índice de Perdas de Vidas. O produto desta multiplicação resultará no Índice de Risco (IR) de cada cenários e conseqüentemente, sua soma resultará no Índice de Risco Total (IRT). Além disso, neste trabalho foram ainda obtidos os Danos Socioambientais que, potencialmente, cada barragem analisada, pode causar.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do presente estudo é aplicar a metodologia de análise *Risk-Based Profiling System* (RBPS) a seis barragens de mineração do estado do Pará, que estão enquadradas nas condições estabelecidas na Política Nacional de Segurança de Barragens e realizar o enquadramento segundo os critérios de classificação de barragens por Categoria de Risco (CR) e Dano Potencial Associado (DPA), estabelecido pela Resolução 143/2012 do CNRH. A partir deste estudo também será elaborado um guia de análise de risco de barragem com a finalidade de estabelecer os principais aspectos metodológicos a serem seguidos nos trabalhos de análise risco, utilizando a metodologia apresentada.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (LEI Nº 12.334/2010)

A Política Nacional de Segurança de Barragens é destinada estruturas de acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e de acumulação de resíduos industriais, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (BRASIL, 2010).

Esta lei aplica-se a barramentos com pelo menos uma das seguintes características:

1. altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
2. capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
3. reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
4. categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Tem como objetivos fundamentais:

1. garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;
2. regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;
3. promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;
4. criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
5. coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;

6. estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;
7. fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

Em termos de fiscalização da segurança das barragens, estabelece a Agência Nacional de Mineração (ANM/DNPM), como órgão fiscalizador das barragens voltadas para contenção dos rejeitos de mineração. Estabelece ainda o Sistema de Classificação de Barragens por Categoria de Risco e Dano Potencial Associado e o Plano de Segurança de Barragens como alguns dos instrumentos da gestão de segurança das barragens. Ambos serão vistos com mais detalhes a seguir.

### 2.1.1 Sistema de Classificação de Barragens

O Sistema de Classificação de Barragens está estabelecido no Art. 6º da Lei nº 12.334/2010, porém é normatizado pela Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos e tem como principal objetivo, estabelecer critérios para classifica de barragens, através da caracterização da Categoria de Risco (CR), Dano Potencial Associado (DPA) e pelo volume do reservatório.

A classificação quanto à Categoria de Risco (CR) está relacionada com aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente. Nesse sentido são avaliadas as características técnicas constantes na **Tabela 1**, o estado de conservação da barragem (**Tabela 2**) e o Plano de Segurança da Barragem (**Tabela 3**). Posteriormente é realizada a somatório das pontuações dos três quadros e realizada a comparação com os valores da **Tabela 4**. Para a classificação do Dano Potencial Associado, são utilizados os critérios da **Tabela 5**. Os valores obtidos em cada classe são somados e comparados com os valores da faixa de classificação da **Tabela 6**.

**Tabela 1** – Classificação quanto à categoria de risco. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos as respectivas características durante a análise de risco.

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de projeto (c)
Altura $\leq$ 15 m (0)	Comprimento $\leq$ 50 m (0)	CMP (cheia máxima provável) ou Decamilenar (0)
15 m $\leq$ altura < 30 m (1)	50 m < Comprimento < 200 m (1)	Milenar (2)
30 m $\leq$ Altura $\leq$ 60 m (4)	200 $\leq$ Comprimento $\leq$ 600 m (2)	Tempo de Retorno (TR) = 500 anos (2)
Altura > 60 m (7)	Comprimento > 600 m (3)	Tempo de Retorno (TR) inferior a 500 anos ou desconhecida/ Estudo não confiável (10)

Fonte: CNRH (2012).

**Tabela 2** – Classificação quanto ao estado de conservação da barragem. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos às respectivas características durante a análise de risco.

<b>Confiabilidade das estruturas extravasoras (d)</b>	<b>Percolação (e)</b>	<b>Deformações e recalques (f)</b>	<b>Deformação dos taludes / paramentos (g)</b>
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação as medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)

Fonte: CNRH (2012).

**Tabela 3** – Classificação quanto ao Plano de Segurança de Barragens - PSB. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos às respectivas características durante a análise de risco.

<b>Documentação de projeto (h)</b>	<b>Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais na equipe de segurança da barragem (i)</b>	<b>Manuais de procedimentos para inspeções de segurança e monitoramento (j)</b>	<b>Plano de Ação Emergencial – PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)</b>	<b>Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de análise de segurança (l)</b>
Projeto executivo e “como construído” (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de análise de segurança (0)
Projeto executivo ou “como construído” (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)

Fonte: CNRH (2012).

**Tabela 4** – Faixa de classificação das Categorias de Risco - CR.

<b>Categoria de risco</b>	<b>Pontuação</b>
Alto	$\geq 60$ ou a obtenção de pontuação 10 em qualquer coluna da tabela referente ao estado de conservação
Médio	entre 35 e 60
Baixo	$\leq 35$

Fonte: CNRH (2012).

**Tabela 5** – Classificação quanto ao Dano Potencial Associado – DPA. Os valores em parênteses representam os pesos atribuídos as respectivas características durante a análise de risco.

<b>Volume total do reservatório (a)</b>	<b>Existência de população a jusante (b)</b>	<b>Impacto ambiental (c)</b>	<b>Impacto socioeconômico (d)</b>
Muito Pequeno ≤ 500 mil m <sup>3</sup> (1)	Inexistente (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	Insignificante (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada e a estrutura armazena apenas resíduos inertes) (0)	Inexistente (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m <sup>3</sup> (2)	Pouco frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	Pouco Significativo (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos inertes) (2)	Baixo (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m <sup>3</sup> (3)	Frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	Significativo (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos inertes) (6)	Médio (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m <sup>3</sup> (4)	Existente (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	Muito significativo (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados como não inertes, (8)	Alto (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito grande ≥50 milhões m <sup>3</sup> (5)	-	Muito significativo agravado (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos perigosos) (10)	-

Fonte: CNRH (2012).

**Tabela 6** – Faixa de classificação do Dano Potencial Associado – DPA.

<b>Dano potencial associado</b>	<b>Pontuação</b>
Alto	≥ 13
Médio	7 < Pontuação < 13
Baixo	≤ 7

Fonte: CNRH (2012).

### **2.1.2 Plano de Segurança de Barragens e Plano de Ação Emergencial para Barragens de Mineração – PAEBM**

Além do Sistema de Classificação de Barragens, a Política Nacional de Segurança de Barragens, também estabelece como instrumento, o Plano de Segurança da Barragem. Este plano é normatizado, por sua vez, pela Portaria nº 70.389/2017 da Agência Nacional de Mineração (ANM/DNPM). Esta Portaria dispõe sobre a estrutura e conteúdo mínimos que deve constar no Plano de Segurança da Barragem. Este documento deve ser elaborado para barragens de mineração que se enquadrem em pelo menos uma das seguintes características:

- I - altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e
- IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto (retificação DOU -18/12/2012).

A estrutura ordinária deste Plano deverá ser composta por 4 (quatro) volumes:

1. Volume I- Informações Gerais;
2. Volume II - Planos e Procedimentos;
3. Volume III - Registros e Controles; e
4. Volume IV - Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

Quando a barragem for classificada como de Dano Potencial Associado Alto, ou a critério do DNPM, o Plano de Segurança de Barragem deverá incluir o Volume V, referente ao Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), que é um documento onde são identificadas as situações de emergência que possam pôr em risco a integridade da barragem e onde são estabelecidas as ações imediatamente necessárias nesses casos, apresentando os agentes a serem notificados de tais ocorrências, com o objetivo de evitar ou minimizar danos com perdas de vida, às propriedades e às comunidades a jusante (BRASIL, 2010). Neste documento devem constar as seguintes informações:

1. informações gerais da barragem;
2. procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em emergência;
3. detecção, avaliação e classificação das emergências;

4. fluxograma e procedimentos de notificação com os telefones, quando for o caso, dos envolvidos associados;
5. responsabilidades gerais no PAEBM;
6. análise do estudo de cenários com os possíveis impactos a jusante, resultante de uma hipotética ruptura de barragem, com seu associado mapa de cenários
7. anexos e apêndices.

A elaboração do PAEBM é de responsabilidades do empreendedor, assim com os estudos de cenários e mapas de cenários (Art. 11º), que por sua vez devem abranger os possíveis impactos a jusante, resultantes de uma hipotética ruptura de barragem, com seu associado mapa de cenários georreferenciado (Art. 6º), sendo que o método adotado para tal objetivo deve ser explicitado.

O PAEBM será a principal fonte de dados para a análise de risco deste trabalho, especificamente no que se refere aos dados básicos da barragem e às modelagens hipotéticas de ruptura, as quais definem os cenários de ruptura, a velocidade de escoamento, o tempo de chegada e a área de atingimento do rejeito transportado após o rompimento.

## 2.2 BARRAGENS DE REJEITO E ANÁLISE DE RISCO

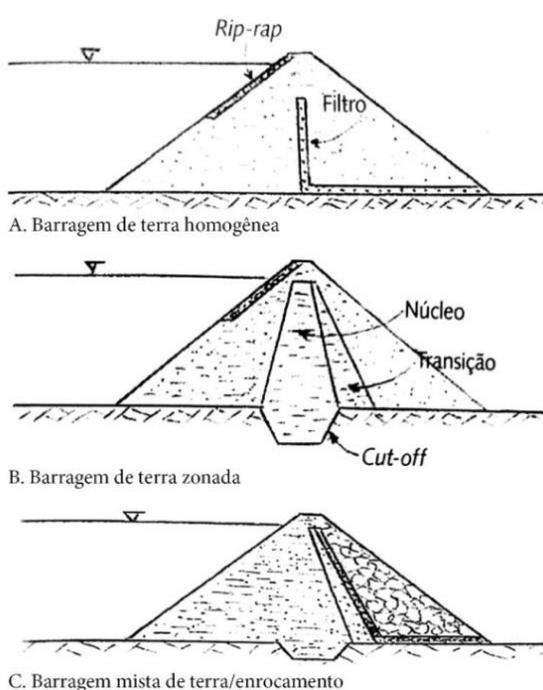
O termo barragem em engenharia é utilizado para estruturas construídas transversalmente a um rio com a finalidade de obter a elevação do seu nível d'água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água ou de regulação das vazões do rio ou de outro fluido (CBDB, 2001).

Essas estruturas desempenham um papel fundamental na relação humana com o ciclo hidrológico, no que se refere ao movimento das águas continentais, oceânicas e até atmosféricas ao ponto que, atualmente, estima-se a existam cerca de 50.000 grandes barragens em operação no mundo (ICOLD, 2008).

No âmbito da produção mineral, as barragens são utilizadas para o armazenamento de água, controle de vazões e principalmente para o armazenamento da massa de minério que é rejeitada nos processos de lavra e beneficiamento (rejeito) (LUZ, 2010). Porém, essa necessidade surgiu somente na década de 1930, devido a criação de leis para mitigação dos impactos ambientais provocados pela atividade mineral (MELLO, 2013).

Sua construção se dá com a utilização de solo, estéreis ou o próprio rejeito, sendo assim denominadas como barragens de terra (COSTA, 2012) e seus principais tipos apresentados na **Figura 1**, pois financeiramente é mais atrativo a utilização desses materiais desde que sejam obedecidas algumas características como as condições granulométricas e compactação do rejeito, a utilização de sistemas de drenagem eficiente e a proteção do talude da barragem (DAVIES; MARTIN, 2000).

**Figura 1** – Tipos de barragens mais comuns no armazenamento de rejeitos.



Fonte: Adaptado de Costa (2012).

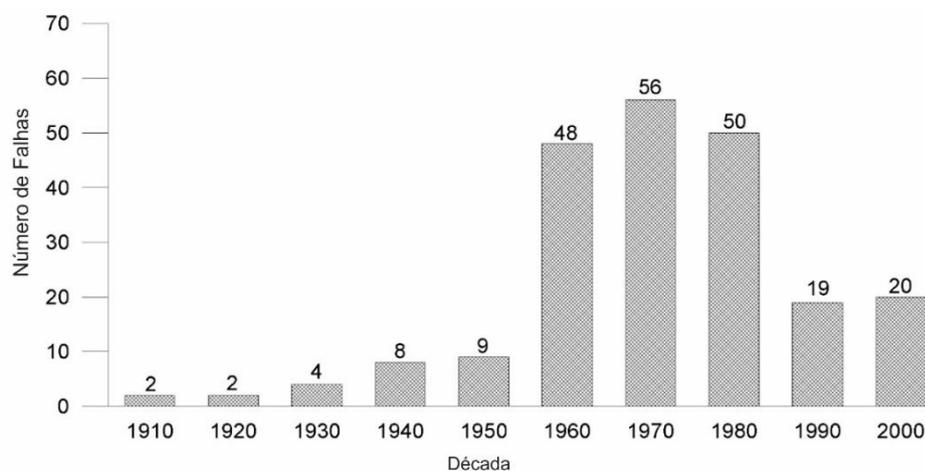
Uma barragem é considerada de terra homogênea quando há predominância de um único material, embora possa ocorrer outros materiais como filtros, rip-rap, etc. Nas barragens de terra zonada há diferenciação dos materiais terrosos em função da suas características e/ou permeabilidade. E a barragem mista é aquela constituída por diferentes materiais em sua seção transversal (COSTA, 2012). Os avanços tecnológicos e de engenharia, permitiram a partir da década de 1940, a construção de estruturas cada vez maiores, impulsionadas pela crescente demanda e constante valorização das *commodities* minerais (MELLO, 2013), provocando simultaneamente, a produção de um volume significativo de rejeitos (KOSSOFF *et al.*, 2014).

Segundo Forstner (1999), a produção de resíduos (rejeito e estéril) de mina poderá ser duplicada dentro de 20 ou 30 anos e Para Bowker e Chambers (2015), este é justamente um dos motivos do aumento dos acidentes envolvendo barragens de mineração, a partir da década de 1960. Além deste fato, as barragens de terra e rejeitos estão constantemente sujeitas a deslocamentos e deformações, em virtude de sua própria natureza e dimensões, além de agentes internos e externos (MACHADO, 2007).

Azam (2010) também constata um aumento substancial de falhas em barragens de rejeito (**Figura 2**) a partir da década de 1960 (cerca de 50 falhas/década), atribuindo este fato ao incremento da atividade mineral imediatamente após a Segunda Guerra Mundial, para atender a alta demanda por metais, minerais e matérias-primas. A partir dos anos 1990, com a implementação de novos critérios técnicos e tecnologia construtiva, as falhas foram significativamente reduzidas (cerca de 20 falhas/década). Ainda assim, este autor demonstra que proporcionalmente, a taxa de falhas em barragens de rejeito é mais do que duas ordens de magnitude maior (1,2% para um conjunto de 18.401 barragens) que a taxa de falhas em barragens de água (0,01%).

Do total de falhas em barragens de rejeito, de acordo com Rico *et. al.* (2008), a maioria dos incidentes ocorrem em três situações, sendo que 25% estão relacionados a causas meteorológicas, como, eventos/períodos de chuva incomuns e neve; 14% relacionam-se a eventos sísmicos causados por terremotos (liquefação sísmica); e 10% são causadas por mau gerenciamento das atividades humanas, como a práticas de gestão deficientes, falta de manutenção e estrutura defeituosa dos sistemas de drenagem das barragens. Outras causas envolvem má construção/localização, problemas de drenagem, infiltração e subsidência; e problemas causados por um conjunto de fatores.

**Figura 2** – Número de falhas em barragens de rejeito por década.



Fonte: Adaptada de Azam (2010).

No Brasil, os rompimentos de barragens de mineração são os mais comuns. Somente no estado de Minas Gerais ocorreram seis rompimentos nos últimos quinze anos, sendo que o restante do país soma quatros rompimentos em barragens de água (**Tabela 7**). Porém, no panorama internacional (**Tabela 8**) a maioria dos rompimentos ocorreram em barragens de água e verifica-se a grande importância dos sistemas de alerta precoce que são fundamentais para proporcionar a evacuação dos locais atingidos e consequentemente mitigar os danos causados, inclusive os índices de mortalidade (ALVES, 2015).

Os rompimentos de barragem trazem muitas vezes uma combinação de fatores como sua causa primária. Em inúmeros dos casos supracitados o colapso da estrutura da barragem decorreu, inicialmente, do advento de um fenômeno natural de intensidade inesperada, como terremotos, tufões, furacões ou grandes tempestades (ALVES, 2015).

**Tabela 7 – Acidentes com barragens no Brasil.**

LOCAL	ANO	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS	CAUSA PRIMÁRIA
Itabirito (MG)	1986	Barragem de Fernandinho	Barragem rejeitos minerários	7 óbitos	Sem informação
Nova Lima (MG)	2001	Barragem de Macacos	Barragem de rejeitos	5 óbitos	Sem informação
Cataguases (MG)	2003	Barragem em Cataguases	Barragem de rejeitos industriais.	Contaminação do rio Paraíba do Sul. Mortandade de animais e peixes e interrupção do abastecimento de água para 600.000 pessoas.	Sem informação
Miraí (MG)	2007	Barragem do rio da Pomba /Cataguases	Barragem rejeitos minerários.	Mais de 4.000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.	Instrumentos de sustentação da barragem não possuíam revestimento adequado e não resistiram as chuvas locais intensas, segundo laudo técnico da Fundação Estadual do Meio Ambiente (Feam)
Itabirito (MG)	2014	Barragem de Herculano.	Barragem rejeitos minerários.	3 óbitos.	Saturação de água de deficiência na estrutura de drenagem, segundo resultado do inquérito instaurado pela Polícia Civil de Minas Gerais.
Mariana (MG)	2015	Barragem do Fundão	Barragem rejeitos minerários.	19 óbitos. 8 pessoas desaparecidas. 600 pessoas desabrigadas ou desalojados. Interrupção do abastecimento de água para milhares de pessoas e poluição do rio São Francisco e do mar do estado do Espírito Santo (ES). Interrupção da atividade pesqueira e afetação ao Turismo em Regência/ES.	Falhas de construção e problemas de drenagem, segundo estudo encomendado pela empresa responsável pela barragem.
Alagoa Nova (PB)	2004	Camará	Barragem de água.	5 óbitos e aproximadamente 3 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas.	Falhas de construção, suspeita de trincas no paramento de montante, segundo relatório da Universidade Federal da Paraíba.
Vilhena (RO)	2008	Apertadinho	Barragem de água para geração de energia.	Danos ambientais variados (assoreamento de rios, erosão do solo, entre outros).	Sem informação
Cocal e Buriti dos Lopes (PI)	2009	Algodões	Barragem de água.	Entre 9 e 24 mortos e aproximadamente 2000 pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas.	Sem informação
Laranjal do Jari (AP)	2014	Santo Antônio	Barragem de água para geração de energia.	4 óbitos.	Sem informação

Fonte: Adaptado de Alves (2015).

**Tabela 8** – Acidentes com barragens em outros países.

(continua)

<b>LOCAL</b>	<b>DATA</b>	<b>NOME</b>	<b>TIPO</b>	<b>DANOS CAUSADOS</b>	<b>CAUSA PRIMÁRIA</b>
Los Angeles (EUA)	12/03/1928	St. Francis	Barragem de água para abastecimento.	450 óbitos	Colapso das fundações da barragem e deslizamentos de terra provocados pela pressão do volume de água para a qual foi planejada. (falhas exclusivamente tecnológicas)
Riviera Francesa (FRA)	2/12/1959	Malpasset	Barragem de água para abastecimento.	Mais de 420 óbitos.	Pressão excepcional de água proveniente de chuvas torrenciais, composição da rocha da margem esquerda e falha geológica a uma curta distância do rio abaixo. (falhas tecnológicas somadas a eventos naturais extremos).
Dolomitas (ITA)	9/10/1963	Vajont	Barragem de água para geração de energia.	Entre 2000 e 2600 óbitos.	A barragem não se rompeu mais houve um vazamento de água gigantesco provocado por um deslizamento de 260 milhões de m <sup>3</sup> de terra e rochas que atingiu as águas da barragem, causando uma onda de 250 metros que varreu o vale abaixo. (falhas tecnológicas somadas a eventos naturais extremos).
Idaho (EUA)	5/6/1976	Teton	Barragem de água para diversos propósitos, inclusive proteção contra enchentes.	11 óbitos	Infiltração e crateras na extremidade direita da barragem, causadas por erros de engenharia. Como o desastre foi previsto com horas de antecedência as cidades situadas abaixo, Wilford e Rexburg, foram evacuadas, o que reduziu consideravelmente o número de mortes. (falhas exclusivamente tecnológicas)
Marinduque (FIL)	24/3/1996	Mogpog	Barragem de rejeitos de minério.	Não houve mortes diretas, mas pouco tempo depois pessoas apresentaram doenças relacionadas ao lixo tóxico, dentre as quais várias vieram a óbito. O Rio Boac foi contaminado e considerado sem vida, centenas de pessoas ficaram desabrigadas.	(Sem informações).

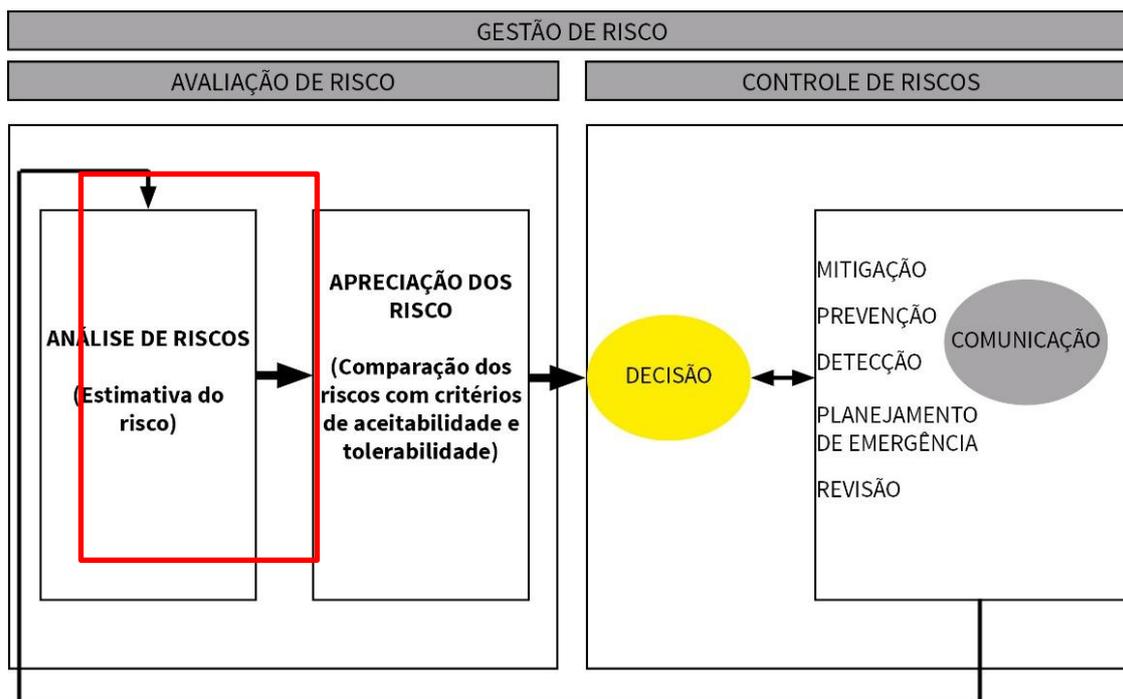
(conclusão)

LOCAL	DATA	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS	CAUSA PRIMÁRIA
Província de Henan (CHN)	8/8/1975	Banqiao	Barragem de água para controlar enchentes e gerar eletricidade.	25 mil óbitos pela enchente e 135 por consequências posteriores.	O tufão Nina gerou uma tempestade de período de retorno de 2 mil anos e foi responsável pelo colapso da barragem de Banqiao, Shimantan e um complexo de 62 barragens menores. (Causas naturais e tecnológicas) OBS: Conforme Brown, o hidrólogo Chen Xing havia alertado para a necessidade da introdução de 12 portas eclusas na barragem, mas apenas 5 foram adotadas.
Quebec (CAN)	19/7/1996	Há!Há!	Barragem de água.	Entre 7 e 10 óbitos. 16 mil pessoas foram evacuadas, 488 casas destruídas.	Chuvas torrenciais entre 18 e 21 de julho elevaram o nível das águas do lago “Há!Há!”, mesmo com a liberação do excedente de água o dique leste do lago rompeu e os escombros foram arrastados atingido uma vila inteira. (causas naturais e estruturais)
New Orleans (EUA)	De 23/0/2005 a 30/8/2005	Sistema federal de diques.	Barragem de água	1836 óbitos e 705 desaparecidos em decorrência do furacão Katrina, especificamente em função do rompimento dos diques não há informações.	A passagem do furacão Katrina, o sexto mais forte já registrado, causou o rompimento do sistema federal de diques em New Orleans, o que resultou na inundação de 80% da cidade. Alertas precoces sobre o furacão resultaram na evacuação de milhares de pessoas, reduzindo consideravelmente o número de mortes, no entanto, muitos moradores não conseguiram deixar o local o vieram a óbito. (causas naturais e estruturais)
Virgínia (EUA)	26/02/1972	Barragem 3 da Companhia Pittson Coal.	Barragem de resíduos líquidos.	125 mortos, 1.121 feridos, aproximadamente 4.000 desabrigados.	No dia 22 de fevereiro a barragem 3 havia sido inspecionada e considerada “satisfatória”, no entanto, quatro dias depois, com o advento de fortes chuvas a barragem se rompeu, lançando 500 milhões de resíduos líquidos de carvão sobre os habitantes de Buffalo Creek Hollow. (falhas tecnológicas e fenômenos naturais).
Andaluzia (ESP)	25/09/1998	Barragem da Boliden.	Barragem de resíduos de zinco, ferro e cádmio.	Danos ambientais de longo prazo. Mortandade de peixes e poluição do rio Guadiamar.	Falhas estruturais foram constatadas anos antes por um relatório encomendado pela Boliden, no entanto providências não foram tomadas e a barragem veio a colapso. Brown assevera que provavelmente a causa da negligência foi uma relação de custo benefício, já que as multas por poluição ambiental na Espanha eram irrisórias. (BROWN; <i>et al.</i> , 2012)

Fonte: Adaptado de Alves (2015).

Os acidentes com barragens atingem de forma severa, tanto os aspectos ambientais como sociais, pois o crescimento do número de barragens, assim como o aumento populacional, torna cada vez mais próximo o convívio da sociedade com estas estruturas. Visando contornar este cenário, teve início o desenvolvimento do conceito atual de gestão de risco (Figura 3) no âmbito da segurança de barragens (VIANNA, 2015).

**Figura 3** – Etapas da gestão de risco com destaque para a análise de risco.



Fonte: Adaptado de Baptista (2008).

Segundo a norma internacional ISO 31000 (*Risk Management Principles and Guidelines*, 2009) a gestão de riscos compreende o “conjunto de atividades para orientar e controlar uma organização no que diz respeito o risco”. Parte desta gestão se dá pela análise dos riscos que consiste em uso sistemático de informações disponíveis para determinar a frequência que eventos específicos podem ocorrer e a magnitude de suas consequências. A quantificação do risco é considerada uma das etapas mais complexas do processo de gerenciamento de riscos, já que pode envolver uma grande quantidade de variáveis de acordo com o grau de precisão desejado e as incertezas inerentes ao tema (VIANNA, 2015).

A análise de risco é fundamental para entender o comportamento das barragens, auxiliando nas inspeções, monitoramentos e instrumentações para identificar as medidas

de redução do risco (MCGRATH, 2000) e segundo Silveira (1999) são importantes também como um meio para gerenciar apropriadamente os recursos disponíveis, de modo a se conseguir a maior segurança das barragens a um menor custo.

A disponibilidade das informações necessárias ao estudo ou a natureza do problema definirão o tipo de abordagem da análise, sendo que quando as informações forem de difícil obtenção ou mínimas, a análise qualitativa ou semi-quantitativa por meio da observação e da avaliação direta dos itens do sistema em estudo é aconselhada. De outra forma, caso existam dados suficientes que permitam uma proximidade da realidade, as análises quantitativas são indicadas (PARDO, 2009).

A análise de risco em barragens geralmente envolve as seguintes etapas (HARTFORD; BAECHER, 2004; BAPTISTA, 2008):

- Definição de escopo: identificação dos objetivos e definição do âmbito da análise;
- Identificação e definição de carregamentos e perigos: definição dos agentes iniciadores do processo de ruptura;
- Análises probabilísticas dos riscos e carregamentos: estimativa de probabilidade de ocorrência dos agentes de ruptura;
- Identificação dos modos de falha;
- Resposta da barragem e análise da probabilidade de falha;
- Estimativa das consequências correspondentes a cada evento de falha: avaliação das perdas de vidas, danos econômicos e socioambientais
- Estimativa do risco;
- Análises de incertezas;
- Documentação;
- Análise de especialistas e/ou verificação (se possível);
- Atualização da análise (se necessário).

Para a realização das análises de risco, diversas metodologias estão disponíveis como: Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA); Análise por Árvore de Eventos (ETA); Análise por Árvore por Falhas (FTA); Diagramas de Localização,

Causa e Indicadores de Falhas (LCI); Índices de Risco; Estudos de Perigo e Operabilidade (HAZOP); Simulação de Monte Carlo, entre outras (BAPTISTA, 2008).

Dentre estas metodologias inclui-se também a *Risk Based Profiling System* (Sistema de Perfil Baseado em Risco) ou simplesmente RPBS, elaborada pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR), para melhorar sua capacidade de priorizar atividades de segurança em barragens e identificar as estruturas que representam o maior risco para o público (HARRALD *et al.*, 2004).

A base da metodologia RBPS é estabelecer o denominado “Índice de Falha” (Carga x Resposta) para o cenário hidrológico, sísmico, estático e de operação e manutenção (O&M), atribuindo um máximo de 1.000 pontos distribuídos entre estes (300 pontos para cada cenário - hidrológico, sísmico, estático – e 100 pontos para o cenário de O&M). Quanto maior o total de pontos, maior é o potencial de falha associado a determinada barragem. Para determinar o índice de falha, o avaliador trabalha com uma série de planilhas que abordam toda a gama de condições de carga (quando aplicável) e condição física da barragem (HARRALD *et al.*, 2004).

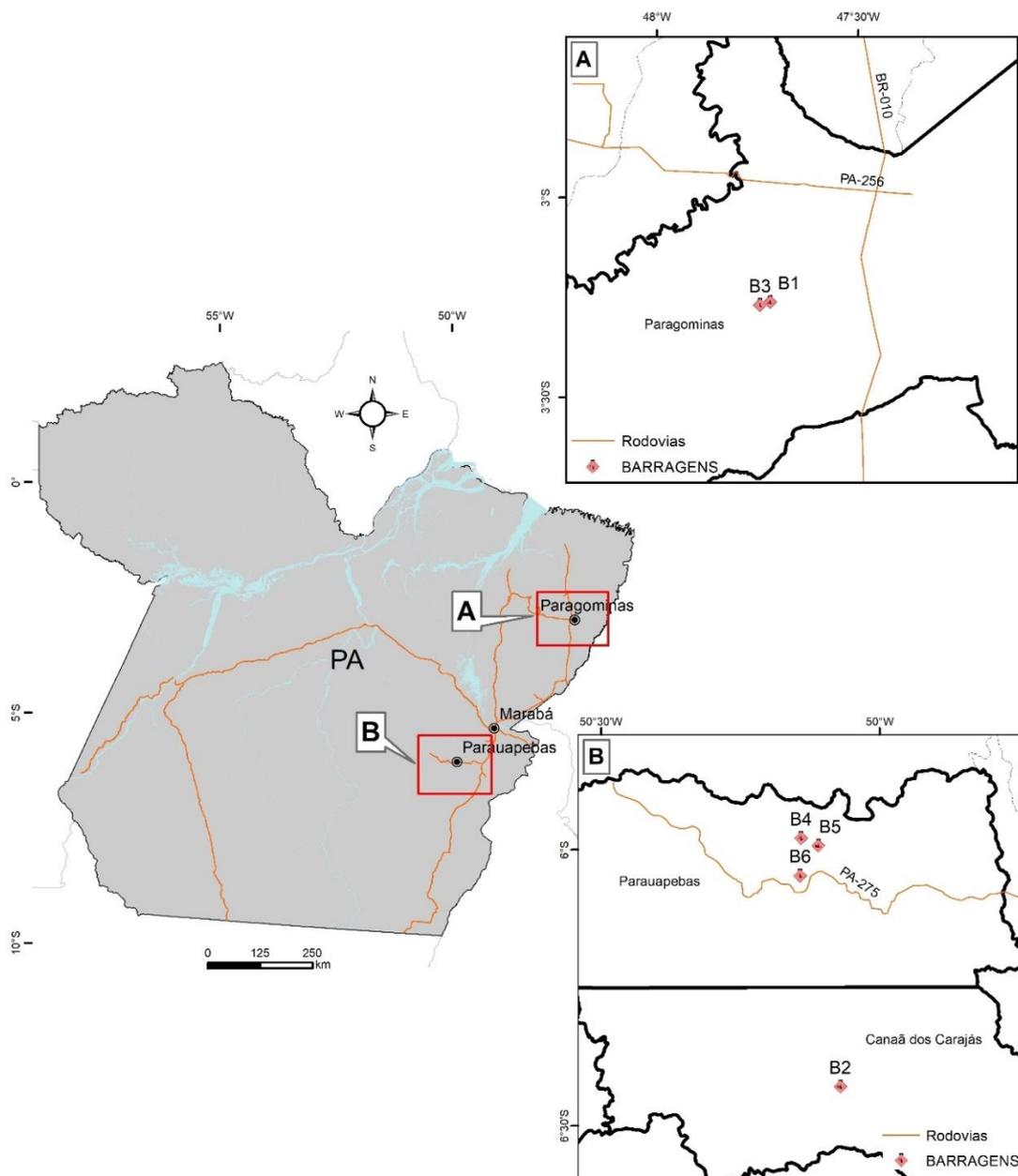
O passo seguinte para comparar barragens em um nível baseado em risco comum é multiplicar o “Índice de Falha” por um “Fator de Perdas de Vidas” que caracteriza as consequências associadas a uma falha, resultando no Índice de Risco. O “Fator de Perdas de Vidas” é determinado pela consideração de vários fatores (população em perigo, localização dessa população abaixo da barragem, severidade da inundação esperada se a represa falhar e a severidade do modo de falha em questão). Este Índice de Risco é calculado separadamente para cada cenário de Índice de Falha e depois resumido para representar o Índice de Risco Total. A pontuação final de qualquer barragem em particular é calculada comparando sua pontuação com a pontuação mais alta encontrada para todas as barragens no inventário expressa como uma porcentagem (HARRALD *et al.*, 2004).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A análise foi realizada em seis barragens de mineração no estado do Pará (Figura 4). As principais características das barragens analisadas (Tabela 9) são descritas, conforme apresentadas no Plano de Ação Emergencial para Barragens de Mineração. As barragens em estudo receberam a denominação B1, B2, B3, B4, B5 e B6.

Figura 4 – Localização das barragens em estudo.



Fonte: Mapa elaborado a partir de dados do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

**Tabela 9** – Principais características técnicas das barragens analisadas.

NOME	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<b>Finalidade</b>	Disposição de rejeito	Disposição de rejeitos/ armazenamento de água	Disposição de rejeito, contenção de sedimentos e captação de água	Regularização de vazão no abastecimento de água para a usina de beneficiamento e contenção rejeito	Contenção de minério proveniente da lavagem das instalações indústrias e controle de enchente	Acumulação de água e contenção de sedimentos
<b>Cota da Crista</b>	142,3 m a 149,30 m	251,9 m	89,00 m	217,4 m	218,0 m	320,0 m
<b>NA<sup>2</sup> Normal</b>	146,0 m	245,96	87,00 m	214,0 m	214,50 m	316,0 m
<b>Altura da Barragem</b>	13,5 m	42,10 m	34,00 m	34,0 m	24 m	45,0 m
<b>Volume do Reservatório</b>	3,58 Mm <sup>3</sup>	154 Mm <sup>3</sup>	68,34 Mm <sup>3</sup>	136,86 Mm <sup>3</sup>	8,14 Mm <sup>3</sup>	5,6 Mm <sup>3</sup>
<b>Tipo de Seção</b>	Barragem de terra homogênea	Barragem de seção mista – solo e enrocamento compactado	Barragem homogênea compactada, areno-silto-argilosa.	Barragem homogênea – material argiloso compactado	Barragem homogênea – material argiloso compactado	Laterita compactada nos espaldares e núcleo com argila siltosa
<b>Cheia de Projeto</b>	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar

Fonte: VALE (2016a; 2016b; 2016c; 2016d) e HYDRO (2017a; 2017b).

### 3.2 DADOS UTILIZADOS

Os dados utilizados para a análise de risco (**Tabela 10**) são provenientes de Planos de Ação Emergencial para Barragens de Mineração (PAEBM), em formato impresso ou digital, das respectivas barragens avaliadas. Estes planos foram disponibilizados pela Defesa Civil do Estado do Pará. Portanto, as barragens foram selecionadas de acordo com a disponibilidade e qualidade dos dados disponíveis.

A Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS/PA) forneceu o PAEBM da barragem B2, em formato digital (PDF) e a mancha de inundação proveniente da ruptura hipotética da barragem, em formato *shapefile*. Os PAEBM's forneceram informações gerais sobre as barragens e o resultado das modelagens de ruptura hipotética, na forma de mapas de mancha de inundação.

O Sistema de Informação Geográfica de Barragens de Mineração (SIGBM) da Agência Nacional de Mineração (ANM/DNPM) foi outra fonte de dados consultada, principalmente, para obtenção de informações específicas de cada barragem analisada,

<sup>2</sup> NA: Nível de água

como o método construtivo, estado de conservação e condições dos projetos de construção, dados constantes na Declaração de Condição de Estabilidade.

**Tabela 10** – Fontes de informação utilizadas neste estudo, órgão que disponibilizou e formato do arquivo.

Nº	Tipo de Dado	Disponibilizado por	Formato	Mapa digitalizado
1	PAEBM da barragem B1	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
2	PAEBM da barragem B2	Def. Civil Estadual e SEMAS	Impresso/Digital	Não
3	PAEBM da barragem B3	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
4	PAEBM da barragem B4	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
5	PAEBM da barragem B5	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
6	PAEBM da barragem B6	Def. Civil Estadual	Impresso	Sim
7	Sistema de Informação Geográfica para Barragem de Mineração – SIGBM	ANM/DNPM	Digital	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como a maioria (5/6) dos PAEBM's foram disponibilizados em formato impresso, houve a necessidade de digitalização e georreferenciamento dos mapas de inundação das barragens B1, B3, B4, B5 e B6. Foram definidos entre 8 e 10 pontos de controle em cada mapa, como base de referência para a geolocalização, foram utilizadas as imagens de satélite disponíveis no ESRI ArcGis Basemap e projetadas no Sistema de Coordenadas Planas SIRGAS 2000.

O cálculo da quantidade de moradias e pessoas em risco (GONÇALVES *et al.* 2004) foi baseado na fotointerpretação de imagens de satélite, disponíveis no serviço de imagens disponíveis no ESRI ArcGis Basemap. Tratam-se de imagens *DigitalGlobe*, datadas de 07/09/2015, com resolução espacial de 0,5 m. O cálculo das moradias afetadas pela barragem B3, foi realizado sobre imagem *DigitalGlobe* de 22/05/2008, única disponível para área de forma gratuita.

As atividades de processamento, vetorização e análise espacial dos dados foram realizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica – SIG, por meio dos softwares ArcGis 10.2 e Google Earth Pro. A caracterização dos cenários de solicitação foi definida por meio de um conjunto de planilhas eletrônicas para atribuição de pesos à

determinadas características das barragens e do meio em que estão inseridas, foram realizadas através do software Excel 2016.

Na Seção VI dos PAEBM's são apresentados os resultados dos estudos de cenários para o rompimento hipotético das barragens (*Dam Break*). Esses cenários são elaborados através de modelagens hidrológicas de escoamento bidimensional, utilizando dados topográficos de diversas fontes, desde perfilamento a laser de Modelos Digitais de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), parâmetros básicos do rejeito armazenado (densidade aparente, peso específico, volume armazenado, etc.), seleção de parâmetros da brecha (formato, largura média, altura, tempo de formação, etc.) e definição do hidrograma de ruptura.

Os cenários resultantes dependem fundamentalmente da quantidade de hipóteses estabelecidas e da qualidade dos dados utilizados. Por exemplo, para os cenários de ruptura da barragem B2, foram estabelecidas cinco hipóteses de ruptura:

- cota atual: ruptura hipotética da barragem por instabilização do maciço pela ombreira direita;
- cota final: ruptura hipotética da barragem por instabilização do maciço pela ombreira direita;
- simulação das vazões naturais com tempo de retorno de 100 anos, sem ruptura da barragem;
- cota atual: ruptura hipotética da barragem por *overtopping* (galgamento) pela ombreira esquerda e;
- cota final: ruptura hipotética da barragem por *overtopping* pela ombreira esquerda.

As modelagens dos cenários de ruptura ficam a critério do empreendedor e para as barragens que possuem mais de uma hipótese de ruptura, adotou-se a mancha de inundação que caracteriza o cenário mais conservador (mais abrangente) em termos de espalhamento e danos associados (**Tabela 11**).

**Tabela 11** – Cenários de rompimento hipotético de barragem (*Dam Break*), selecionados para a análise de risco.

Nº	Barragem	Cenários	Dado topográfico	Escala do mapa impresso
1	B1	Ruptura da parede, com liberação do volume armazenado no reservatório associado a ocorrência de evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos	Perfilamento a laser aerotransportado (2016), curvas de nível (5 m), levantamento topográfico (2017) e MDE SRTM	1:20.000
2	B2	Ruptura da barragem por <i>overtopping</i> pela ombreira esquerda.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	-
3	B3	Ruptura da barragem B3, com ruptura em cascata das barragens de jusante, para a condição de novo alteamento, associado evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos	Perfilamento a laser aerotransportado (2016), curvas de nível (5 m), levantamento topográfico (2017) e MDE SRTM	1:20.000
4	B4	Ruptura por <i>piping</i> <sup>3</sup> no maciço em dia chuvoso, com tempo de retorno de 10.000 anos. Foi considerada a propagação de 1/3 do volume de rejeitos do reservatório.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	1:40.000
5	B5	Ruptura associada ao evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos. Foi considerada a propagação de 1/3 do volume de rejeitos do reservatório.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	1:40.000
6	B6	Ruptura associada ao evento de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos. Foi considerada a propagação de 1/3 do volume de rejeitos do reservatório.	Aerolevantamento e curvas de nível geradas a partir de MDE SRTM	1:15.000

Fonte: Elaborada pelo autor

As etapas envolvidas na análise de risco através da aplicação da metodologia RBPS foram adotadas da seguinte maneira:

- obtenção dos PAEBM's e avaliação dos dados de interesse;
- para as barragens que não possuíam dados vetoriais em SIG das manchas de inundação provenientes da modelagem de ruptura hipotética da barragem, os mapas impressos constantes nos PAEBM's foram digitalizados e georreferenciados no sistema de coordenadas SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) 2000, projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) 22 S;

<sup>3</sup> *Piping*: processo erosivo que ocorre dentro do aterro ou fundação da barragem, o que torna limitada a visualização da erosão. É um fenômeno ainda pouco compreendido devido a sua complexidade (Mattsson *et al.* 2008)

- fotointerpretação das imagens de satélite para estimar do número de moradias e pessoas nas áreas recobertas pela mancha de inundação de cada barragem em análise;
- qualificação dos fatores de resposta e obtenção dos pesos de cada característica associada para posterior soma dos pesos e obtenção do Índice de Falha;
- cálculo do Potencial de Perdas de Vidas Humanas;
- cálculo do Índice de Risco;
- estimativa de Danos Socioambientais

### 3.3 METODOLOGIA E APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE RISCO ADOTADA

Na análise RBPS, o risco é estimado combinando a probabilidade de ocorrência de algum cenário de solicitação (como a probabilidade de ocorrência de um terremoto) e, com a ocorrência do cenário, a probabilidade de ocorrência de alguma falha na barragem. Após determinar a possibilidade de ocorrer algum desses eventos, é possível mensurar a magnitude das consequências (VALERIUS, 2014).

Então, a avaliação é feita pela seguinte fórmula, onde  $R$  é o risco (ou IR – Índice de Risco),  $P_{(carga)}$  é a probabilidade estimada para a ocorrência do cenário;  $P_{(resposta)}$  é a probabilidade de ocorrência de falha na barragem, caso ocorra um dos cenários (HARRALD *et al.*, 2004):

$$R = \sum [P_{(carga)} \cdot P_{(resposta)}] \cdot \text{Consequências} \quad (1)$$

$P_{(carga)}$ , pode ser denominado fator de carga e é imposto pelos regimes hidrológicos e sísmicos ou ainda pela condição estática da barragem (sem a influência de nenhum fator externo), que são os denominados “cenários” de acontecimentos da maioria das respostas adversas em barragens. Inclui-se também como cenário, o conjunto dos aspectos de operação, manutenção e segurança da barragem (HARRALD, 2006).

$P_{(resposta)}$ , também denominado fator de resposta mede a resposta da barragem mediante os cenários ocorrentes (HARRALD *et al.*, 2004). A multiplicação do  $P_{(carga)}$

pelo  $P_{(resposta)}$  resulta no Índice de Falha (IF) (**Equação 2**) da barragem e representa o primeiro termo da **Equação 1**.

$$P_{(Carga)} \cdot P_{(Resposta)} = IF \quad (2)$$

Os IF's possuem um valor máximo para cada cenário (**Tabela 12**), e quando somados podem atingir o valor de 1.000 pontos, o que representa o Índice de Falha Total (IFT) da barragem (**Equação 3**). Quanto maior o valor obtido, maior será a probabilidade de falha. Para a obtenção do Índice de Falha Total, o avaliador necessita de diversas informações sobre as condições físicas da barragem, o que resulta no preenchimento de diferentes planilhas que abordam as condições e a estrutura da barragem (HARRALD *et al.*, 2004).

**Tabela 12** – Valores de pontuação atribuídos a cada cenário de solicitação na metodologia RBPS.

Cenário	Pontuação
Estático	300
Hidrológico	300
Sísmico	300
Operação e manutenção	100
<b>Total</b>	<b><math>\Sigma</math> 1000</b>

Fonte: Harrald *et al.*, (2004).

$$\sum IF = IFT \quad (3)$$

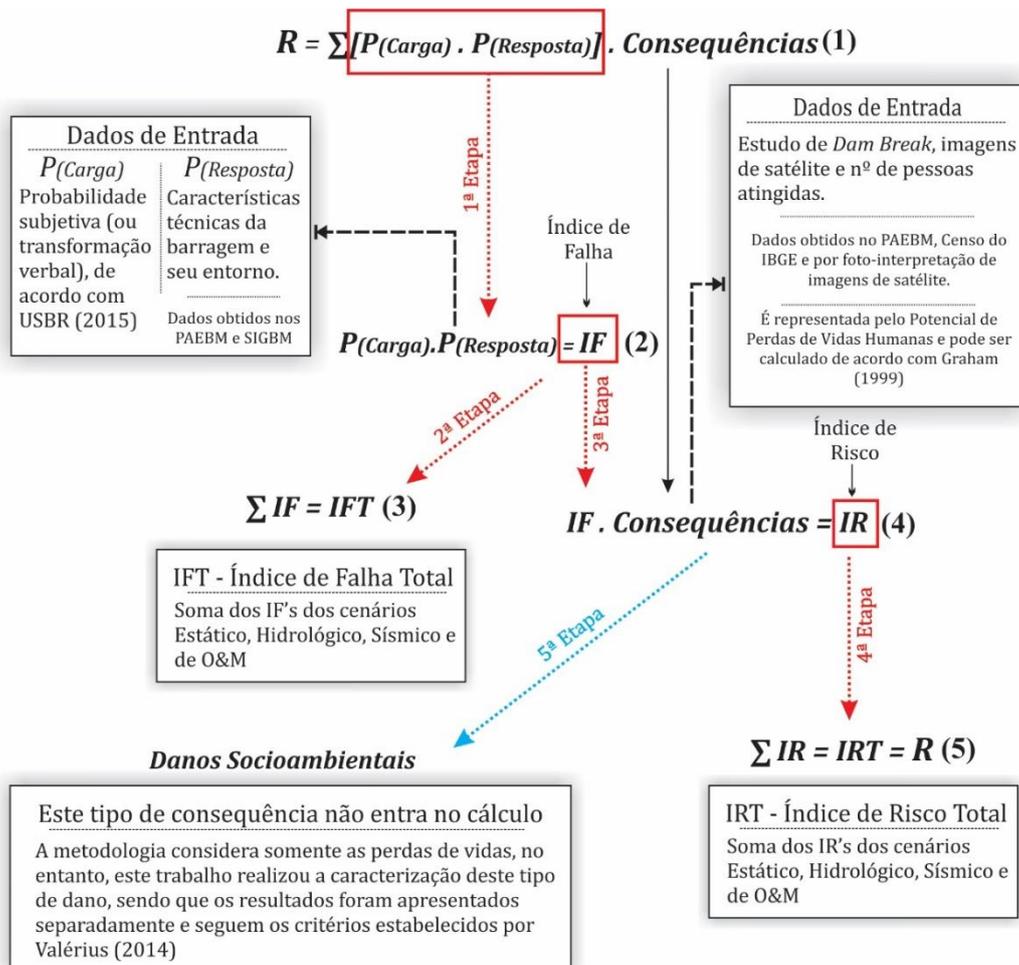
O segundo termo da **Equação 1** é a estimativa das *Consequências* esperadas devido à ocorrência de cada cenário. Elas traduzem-se no Potencial de Perdas de Vida Humanas, estimado por dados como o número de pessoas a jusante da barragem, a severidade da inundação e o entendimento da população sobre a referida severidade (GRAHAM, 1999). O Potencial de Perdas de Vida Humanas é multiplicado pelo IF, para obtenção do Índice de Risco (IR) da barragem (**Equação 4**). E após ser calculado para cada cenário é somado para se obter o Índice de Risco Total (IRT) (**Equação 5**), que representa o risco que determinada barragem exerce sobre a população a jusante (VALERIUS, 2014).

$$IF \cdot Consequências = IR \quad (4)$$

$$\sum IR = IRT = R \quad (5)$$

Um resumo da metodologia pode ser visto na **Figura 5**, onde são mostradas as equações, os dados a serem utilizados para os cálculos e a proveniência dos dados.

**Figura 5** – Fluxograma resumindo os passos da metodologia RBPS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, os fatores de carga, os fatores de resposta e as consequências serão discutidos. Dentro do escopo da análise de risco, Valerius (2014) ainda inseriu a classificação do dano socioambiental, tendo como base o tipo de resíduo armazenado na barragens e as consequências de um possível rompimento para o abastecimento de água das cidades, para as áreas de conservação ambiental, áreas urbanas, corpos d'água, entre outros.

### 3.3.1 Caracterização dos fatores de carga ( $P_{(carga)}$ )

Os fatores de carga foram estimados através de probabilidade subjetiva, isto é, o valor numérico ou a faixa de valores (**Tabela 13**) são julgados como críveis com base nas evidências disponíveis analisadas por um conjunto de especialistas, refletindo o grau de convicção na ocorrência de determinado evento. Esta técnica é utilizada quando não é possível determinar numericamente a probabilidade de determinado evento ocorrer, tendo em vista a necessidade de estudos muito mais aprofundados e séries históricas muito longas (BAPTISTA 2008; USBR 2015), o que no momento não existe ou não está disponível para as barragens em análise. Neste trabalho ela será adotada para estimar a probabilidade de ocorrência dos quatro cenários, conforme a **Tabela 14**.

**Tabela 13** – Probabilidades adotadas, através da técnica de transformação verbal.

Descritor	Probabilidade atribuída
Virtualmente certo	0,999
Muito provável	0,99
Provável	0,9
Neutro	0,5
Improável	0,1
Muito improável	0,01
Vitualmente impossível	0,001

Fonte: USBR (2015).

**Tabela 14** – Fatores de carga utilizados para todas as barragens.

Cenário	Probabilidade atribuída	Descrição
Condição estática	0,99	Muito provável
Hidrológico	0,9	Provável
Sísmico	0,5	Neutro
Operação e manutenção	-	Calculado diretamente

Fonte: Adaptado de Valerius (2014).

### 3.3.2 Caracterização dos fatores de resposta para os cenários de solicitação ( $P_{(resposta)}$ )

Dada a concretização de um cenário, os fatores de resposta (**Tabela 15, 16, 17 e 18**) são as características das barragens que mais influenciaram na probabilidade de ocorrência de uma falha, ou seja, as respostas da barragem ao cenário imposto, são enquadradas em um limiar de pontuação que define uma maior ou menor predisposição a efeitos adversos. Neste estudo, a pontuação dos fatores de resposta para cada cenário foi adaptado a partir do trabalho de Valerius (2014), em que diversos dados históricos e artigos sobre o tema foram utilizados para determinar os pesos de cada característica da barragem.

**Tabela 15** – Pontuação para os fatores de resposta do cenário estático.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	50	50
	Único ponto, de jusante para montante	40	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	20	
	De jusante para montante com <i>spray-bars</i>	10	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	8	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip rap	3	
	Outra (considerar eficiência)	1 a 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	60	60
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Fator de segurança de operação	$< 1,3$	50	50
	$\geq 1,3 < 1,5$	35	
	$\geq 1,5$	10	
Volume armazenado	$\leq 500$ mil m <sup>3</sup>	2	10
	$> 500$ mil $\leq 5$ milhões m <sup>3</sup>	4	
	$> 5$ milhões m <sup>3</sup> $\leq 25$ milhões m <sup>3</sup>	6	
	$> 25$ milhões m <sup>3</sup> $\leq 50$ milhões m <sup>3</sup>	8	
	$> 50$ milhões m <sup>3</sup>	10	
Verificação da água infiltrada no talude	Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	50	50
	Vazamento lamacento	45	
	Vazamento límpido, aumentando gradualmente	30	
	Vazamento límpido e estável	20	
	Pequeno vazamento	15	
	Nenhum vazamento verificado	2	
Sistema de drenagem superficial	Nenhum	20	20
	Em más condições	10	
	Em boas condições	5	
Sistema de drenagem interna	Nenhum	40	40
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	39	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	4	10
	Deterioração dos taludes	2	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	2	
	Erosão no talude de jusante	2	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	$\Sigma$ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

Fonte: Valerius (2014).

**Tabela 16** – Pontuação para os fatores de resposta do cenário hidrológico. As categorias destacadas em negrito foram adicionadas para este estudo.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Vazão de projeto dos vertedores	10000 anos	5	55
	1000 anos	20	
	500 anos	40	
	< 500 anos ou desconhecido	55	
Sistema alternativo de descarga das vazões	Bombeamento	15	30
	Outro (considerar eficiência)	1 até 29	
	Nenhum	30	
Sistema de drenagem superficial	Nenhum	20	20
	Em más condições	10	
	Em boas condições	5	
Sistema de drenagem interna	Nenhum	40	40
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	39	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	35	35
	Único ponto, de jusante para montante	25	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	15	
	De jusante para montante com spray-bars	5	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	3	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip-rap	3	
	Outra (considerar eficiência)	1 até 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	30	30
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Configuração do depósito	Em vale	10	10
	Em fundo de vale	8	
	Em meia encosta	6	
	Em dique fechado	4	
Fator de segurança para falha no sistema de drenagem	< 1,3	50	50
	$\geq 1,3 < 1,5$	40	
	$\geq 1,5$	20	
	Não avaliado	35	
Volume armazenado	$\leq 500$ mil m <sup>3</sup>	2	10
	$> 500$ mil $\leq 5$ milhões m <sup>3</sup>	4	
	$> 5$ milhões m <sup>3</sup> $\leq 25$ milhões m <sup>3</sup>	6	
	$> 25$ milhões m <sup>3</sup> $\leq 50$ milhões m <sup>3</sup>	8	
	$> 50$ milhões m <sup>3</sup>	10	
Área do reservatório	0,5 a 1 km <sup>2</sup>	4	10
	1 a 1,5 km <sup>2</sup>	6	
	1,5 a 2 km <sup>2</sup>	8	
	$> 2$ km <sup>2</sup>	10	

Fonte: Valerius (2014).

**Tabela 17** – Pontuação para os fatores de resposta do cenário sísmico. As categorias destacadas em **negrito** foram adicionadas para este estudo.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Nível de vibração causado pelo plano de fogo	Alto	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
	Não realiza monitoramento	10	
Sismicidade da região (casos históricos)	Desconhecido	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	15	30
	Deterioração dos taludes	5	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	5	
	Erosão no talude de jusante	5	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	$\Sigma$ de todos os problemas não pode ser maior que 30	
Fator de segurança para eventos sísmicos	< 1,3	80	80
	$\geq 1,3 < 1,5$	70	
	$\geq 1,5$	10	
	Não avaliado	50	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	60	60
	Único ponto, de jusante para montante	50	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	35	
	De jusante para montante com <i>spray-bars</i>	15	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	10	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	45	45
	Existe monitoramento	20	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	8	
Sistema de drenagem interna	Nenhum	35	35
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	34	
Existência de estradas e/ou ferrovias próximas	Sim	10	10
	Não	3	

Fonte: Valerius (2014).

**Tabela 18** – Pontuação para os fatores de resposta do cenário de operação e manutenção. As categorias destacadas em negrito foram adicionadas para este estudo.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
<b>Plano de ação emergencial</b>	Não possui (Quando obrigatório)	40	40
	Não possui (Não obrigatório)	20	
	Possui – avaliar abrangência/qualidade dos dados e determinar pontuação	1 a 39	
<b>Documentação de projeto</b>	Projeto executivo e “como construído” 5	5	20
	Projeto executivo ou “como construído” 10	10	
	Projeto básico 15	15	
	Não há projeto 20	20	
<b>Manuais e procedimentos para inspeção de segurança</b>	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação	2	10
	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento	5	
	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção	10	
<b>Cópias dos PAE's entregues aos órgãos competentes</b>	Sim	2	5
	Não	5	
<b>Relatórios de inspeção e Análise de Segurança</b>	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de análise de segurança	2	15
	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança	5	
	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento	10	
	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual	15	
<b>Infrações cometidas</b>	Multa aplicada nos últimos 10 anos	10	10
	Advertência aplicada nos últimos 5 anos	2	
	Outro tipo de infração (considerar relevância)	$\Sigma$ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

Fonte: Valerius (2014).

A maioria dos incidentes em barragens de rejeito ocorre em três situações; 25% estão relacionados a causas meteorológicas, como, eventos/períodos de chuva incomuns e neve; 14% relacionam-se a eventos sísmicos causados por terremotos (liquefação sísmica); e 10% são causadas por mau gerenciamento das atividades humanas, como a práticas de gestão ineficiente, falta de manutenção e estrutura defeituosa dos sistemas de drenagem das barragens (RICO *et al.*, 2008; AZAM; LI, 2010).

Segundo Escuder *et al.* (2007) o fator de resposta está diretamente ligado ao comportamento estrutural da barragem e dependerá diretamente dos seguintes fatores: i) capacidade, estado, manutenção e funcionamento dos equipamentos de deságue; ii)

aspectos de projeto e construção da barragem; iii) volume e área do reservatório; iv) características do rejeito armazenado; v) aspectos geológicos e geotécnicos da fundação e região do entorno; vi) existência de instrumentação e monitoramento da barragem; vii) em casos de sismos, a suscetibilidade à liquefação e as condições de estabilidade dos taludes; viii) cumprimento de normas e leis vigentes que estabelecem as diretrizes para a exploração em questão; ix) deformações, trincas, afundamentos e demais anomalias verificadas no corpo da barragem.

### **3.3.3 Caracterização do Potencial de Perdas de Vidas Humanas**

O procedimento para determinação do Potencial de Perdas de Vidas Humanas pra barragens seguiu, o quanto os dados permitiram, as diretrizes propostas por Graham (1999). Segundo o autor, o procedimento pode ser dividido em sete etapas:

- Determinar os cenários de falha da barragem;
- Determinar as categorias de tempo para as quais estimativas de perda de vida são necessárias;
- Determinar quando o aviso de falha de barragem foi iniciado;
- Determinar a área inundada para cada cenário de falha;
- Estimar o número de pessoas na área de atingimento para cada cenário de falha e categoria de tempo;
- Aplicar o método para estimar fatalidades;
- Avaliar as incertezas.

Este método foi desenvolvido usando um conjunto de dados ampliado que totalizou aproximadamente 40 inundações, muitas das quais, causadas por falhas de barragens, todas ocorridas em represas dos Estados Unidos, causando 50 ou mais mortes, e outros eventos de inundação que foram selecionados na tentativa de cobrir toda a severidade, advertência e gravidade das inundações entendendo suas combinações (GRAHAM, 1999).

Os cenários de falha utilizados foram os apresentados nos PAEBM's. Devido à distância das barragens analisadas em relação às moradias mais próximas, a categoria de tempo não foi definida. A determinação de quando os avisos de falha serão iniciados,

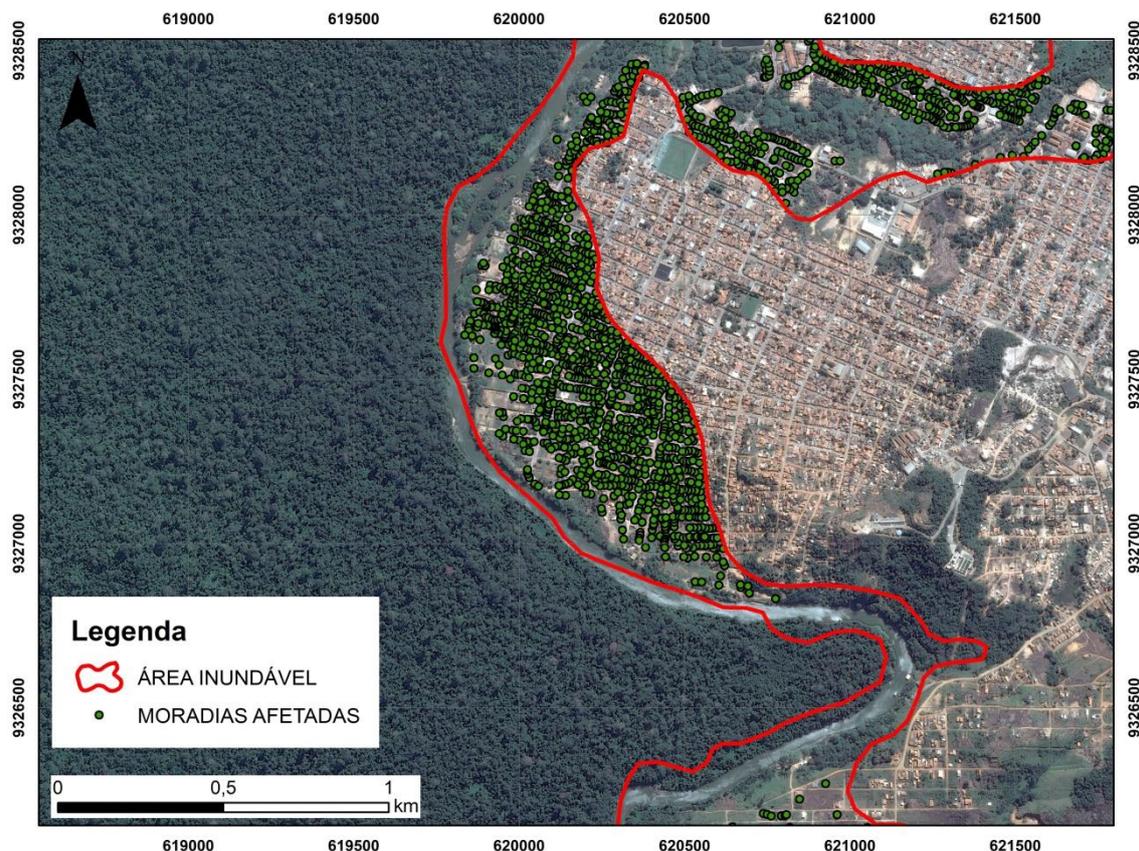
foi definido como igual ao tempo em que ocorreu o rompimento da barragem. As áreas inundáveis foram as apresentadas nos PAEBM's e que hipoteticamente causariam o maior dano à população.

A estimativa de pessoas em risco foi determinada a partir da seguinte equação, onde  $PA$  é o número de atingidas e  $UR$  é o número de unidades residenciais:

$$PA = UR \times 4,1 \quad (6)$$

Logo,  $PA$  é a multiplicação do número de unidades residências dentro das áreas inundáveis (**Figura 6**) pelo número médio de pessoas por domicílios particulares permanentes (GONÇALVES *et al.* 2004) no estado do Pará (4,1 pessoas por domicílio), de acordo com IBGE (2010). Para a contagem das moradias foram definidos vetores de ponto sobre imagem CNES/Airbus, disponíveis na aplicação Google Earth Pro, datadas de 02 de julho de 2016. Posteriormente o número de vetores foi somado para compor o número de moradias dentro da área da mancha de inundação.

**Figura 6** – Vetores de ponto, em verde, sobre imagem CNES/Airbus (Google Earth Pro) dentro dos limites da mancha de atingimento (em vermelho) modelada para a barragem B2.



Fonte: Elaborada pelo autor

Após concretizadas as etapas necessárias, o potencial de perdas de vida é definido pela multiplicação entre o número de pessoas em risco e a taxa de fatalidade. Esta, por sua vez, é determinada com base na gravidade da inundação, no tempo dos alertas emitidos e em uma medida de que as pessoas entendem a gravidade da inundação (**Tabela 19**).

Para este estudo, considerando que: i) o tempo de alerta foi definido como o momento da ruptura do barramento até a chegada da mancha de inundação; ii) todas as modelagens de rompimento presentes no PAEBM's, indicaram que a mancha de inundação alcançará a localidade rural mais próxima após 2-3h do rompimento e; iii) o caráter aplainado do relevo a jusante, tende a manter a velocidade de escoamento relativamente baixa; adotou-se a taxa de fatalidade de 0,0002 (severidade baixa da inundação, tempo de alerta maior que 60 minutos e entendimento preciso da severidade da inundação por parte da população).

**Tabela 19** – Índice de fatalidade derivada de estudos de caso.

Severidade da Inundação	Tempo de alerta (minutos)	Entendimento da Severidade da Inundação	Índice de Fatalidade (Fração das pessoas em risco com expectativa de morte)	
			Sugerido	Limiar Sugerido
Alta	Sem aviso	Não aplicável	0,75	0,30 a 1,0
	15 a 60	Vago	Use os valores mostrados acima e aplique-se ao número de pessoas que permanecem na planície de inundação da falha da barragem depois que os avisos são emitidos. Nenhuma orientação é fornecida sobre quantas pessoas permanecerão na planície de inundação.	
		Preciso		
	> 60	Vago		
Preciso				
Média	Sem aviso	Não aplicável	0,15	0,03 a 0,35
	15 a 60	Vago	0,04	0,01 a 0,08
		Preciso	0,02	0,005 a 0,04
	> 60	Vago	0,03	0,005 a 0,06
Preciso		0,01	0,002 a 0,02	
Baixa	Sem aviso	Não aplicável	0,01	0,0 a 0,02
	15 a 60	Vago	0,007	0,0 a 0,015
		Preciso	0,002	0,0 a 0,004
	> 60	Vago	0,003	0,0 a 0,0006
Preciso		0,0002	0,0 a 0,0004	

Fonte: Graham (1999).

### 3.3.4 Caracterização do dano socioambiental

O dano socioambiental está relacionado ao contato do rejeito armazenado na barragem com o ambiente urbano e florestal, promovendo consideráveis transtornos a ambos. A curto prazo (horas a meses), a depender da natureza do rejeito, os

rompimentos afetam invariavelmente a qualidade da água e dos sedimentos, a vida aquática e humana por potencialmente centenas de quilômetros a jusante. A médio e longo prazo (anos e séculos) pode afetar os solos e os sedimentos das planícies, principalmente através de rejeitos com presença de minerais metálicos, afetando a pecuária e a produção de alimentos (AHMED; TAHLAWI 2011; KOSSOFF *et al.* 2014).

Nesse aspecto, relacionam-se a qualidade do rejeito armazenado aos danos causados ao ambiente, através de um sistema de pontuação baseado na Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), conforme a **Tabela 20**.

Segundo as características dos rejeitos eles foram classificados como Perigosos, Não inertes e Inertes, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004). Os danos causados, foram obtidos junto aos PAEBM's e às análises de imagens de satélite. De acordo com a pontuação final, as barragens puderam ser enquadradas nas seguintes classes: i)  $\Sigma \geq 6$ : Dano extremo; ii)  $\Sigma \geq 4 < 6$ : Dano muito alto; iii)  $\Sigma \geq 2 < 4$ : Dano alto; iv)  $\Sigma < 2$ : Dano considerável (VALERIUS, 2014).

**Tabela 20** – Pontuação para classificação do dano socioambiental

Danos causados	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)		
	Perigoso	Não inerte	Inerte
Ruptura poderá causar transtornos para o abastecimento de água de alguma cidade	4	4	1
Ruptura poderá afetar alguma área de conservação ambiental	4	1	0,5
Ruptura poderá afetar um núcleo urbano	6	3	4
Ruptura poderá causar danos à mineradora	2	1	0,5
Ruptura poderá causar danos sobre corpos de água superficiais	2	1	0,5
Ruptura poderá afetar núcleos rurais	4	4	1
Ruptura poderá afetar estradas, pontes, rodovias, rede de energia elétrica e/ou telecomunicação, ferrovias, etc.	4	1	0,5

Fonte: Valerius (2014).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DO ÍNDICE DE FALHA TOTAL (IFT), ÍNDICE DE RISCO TOTAL (IRT) E POTENCIAL DE PERDAS DE VIDAS

Entre as seis barragens analisadas (**Tabela 21**), uma apresentou Índice de Falha Total (IFT) considerado baixo (B5: 329,47) e cinco com IFT médio (B2: 375,66; B4: 341,22; B6:335,64; B3: 455,18; B1: 428,63).

As duas barragens com IFT mais elevado (B2 e B3) apresentaram valores relativamente altos no cenário de condição estática (onde não há influências externas). Contribuem para isso, o fato de que, conforme consta no SIGBM, na barragem B3 não existe proteção do talude de jusante e não há sistema de drenagem superficial. Já na barragem B1 não foi possível obter a informação tanto da proteção do talude quanto do sistema de drenagem superficial. Ambas também apresentaram trincas em sua estrutura, de acordo com informações do SIGBM.

Quanto ao Índice de Risco Total (IRT), a barragem B2 foi a que obteve maior pontuação (969,20), 2,5 vezes maior do que a barragem do B4 (395,82). O IRT alto decorre da sua área de atingimento que pode afetar cerca de 12.900 pessoas, localizadas em propriedades rurais e principalmente na área urbana de Parauapebas, o que eleva a taxa de fatalidade média (que é função do número de pessoas). Ainda assim, o Potencial de Perdas de Vida é de 2,58, que, do ponto de vista prático é baixo e tende a zero se considerarmos que a estimativa para a chegada da mancha de inundação à área urbana de Parauapebas é de 12 a 24h e que segundo Graham (1999), mais de 99% das mortes ocorrem em menos de 24 km da barragem que falhou. Entretanto, a comunidade rural mais próxima (Vila Bom Jesus), localizada 5 km a leste a barragem, terá 17% (176 pessoas) dos residentes afetados, por uma onda de inundação que poderá chegar entre 2 e 3h após o rompimento, segundo as estimativas apresentadas no PAEBM.

A análise espacial da mancha de inundação do rompimento hipotético da barragem B4, mostrou que, apesar da área de atingimento ser praticamente duas vezes maior que a da mancha de inundação da barragem B2 (101 km<sup>2</sup> contra 57 km<sup>2</sup>), o número de pessoas afetadas é 2 vezes menor (5.818 pessoas), o que diminui o Potencial de Perdas de Vida (1,16). A mancha de inundação da barragem B5 poderá afetar cerca de 86 pessoas, o que, somando com um IFT baixo (329,47 pontos), produz um IRT muito baixo (6,59). A barragem B3, apesar de um IFT médio, também mostrou um IRT baixo (5,97) em função do número estimado de pessoas afetadas (65 pessoas). Os

demais barramentos, B6 e B1, não apresentaram manchas que afetariam pessoas ou moradias a jusante.

**Tabela 21** – Resultado da análise de risco apresentando os fatores de resposta para cada cenário, o Índice de Falha, o Índice de Risco e o Índice Socioeconômico.

Barragens	Cenários de solicitação	Fator de Carga	Fator de Resposta	Índice de Falha	Pot. de Perdas de Vidas Humanas	Índice de Risco	População em Risco
<b>B1</b>	Condição estática	0,99	147,00	145,53	0,0	0,00	0,0
	Hidrológico	0,9	169,00	152,10		0,00	
	Sísmico	0,5	208,00	104,00		0,00	
	Operação e manutenção	-	27,00	27,00		0	
	<b>Total</b>		<b>551</b>	<b>428,63</b>		<b>0,00</b>	
<b>B2</b>	Condição estática	0,99	134,00	132,66	2,58	342,26	12900
	Hidrológico	0,9	150,00	135,00		348,30	
	Sísmico	0,5	158,00	79,00		203,82	
	Operação e manutenção	-	29,00	29,00		74,82	
	<b>Total</b>		<b>471</b>	<b>375,66</b>		<b>969,20</b>	
<b>B3</b>	Condição estática	0,99	162	160,38	0,0131	2,10	66
	Hidrológico	0,9	182,00	163,80		2,15	
	Sísmico	0,5	208,00	104,00		1,36	
	Operação e manutenção	-	27,00	27,00		0,35424	
	<b>Total</b>		<b>579</b>	<b>455,18</b>		<b>5,97</b>	
<b>B4</b>	Condição estática	0,99	118,00	116,82	1,16	135,51	5818
	Hidrológico	0,9	131,00	117,90		136,76	
	Sísmico	0,5	151,00	75,50		87,58	
	Operação e manutenção	-	31,00	31,00		35,96	
	<b>Total</b>		<b>431,00</b>	<b>341,22</b>		<b>395,82</b>	
<b>B5</b>	Condição estática	0,99	113	111,87	0,02	2,24	86
	Hidrológico	0,9	129,00	116,10		2,32	
	Sísmico	0,5	151,00	75,50		1,51	
	Operação e manutenção	-	26,00	26,00		0,52	
	<b>Total</b>		<b>419,00</b>	<b>329,47</b>		<b>6,59</b>	
<b>B6</b>	Condição estática	0,99	116,00	114,84	0,0	0,00	0,0
	Hidrológico	0,9	127,00	114,30		0,00	
	Sísmico	0,5	151,00	75,50		0,00	
	Operação e manutenção	-	31,00	31,00		0	
	<b>Total</b>		<b>425,00</b>	<b>335,64</b>		<b>0,00</b>	

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com os Índices de Risco Totais apresentados, as barragens puderam ser ranqueadas conforme a **Tabela 22**, indicando atuações de gestão de segurança prioritárias na barragem B2.



Vale ressaltar que há carência de informações para a elaboração de um cenário sísmico mais consistente, devido a exigência de estudos sobre a influência dos planos de fogo nas barragens e sobre a sismicidade regional que são os fatores mais importantes deste cenário. No cenário de operação e manutenção, o qual reflete basicamente a eficiência e responsabilidade com que as barragens são tratadas pelos empreendedores, todas apresentaram pontuações semelhantes, porém, destaca-se que as barragens do B5 e B6, possuem apenas o projeto executivo ou o “como construído”, enquanto as demais apresentam ambas as documentações. As barragens do Sossego, B3 e B1, em seus relatórios de inspeção, não realizam análise de segurança.

Ainda no cenário de operação de manutenção, a avaliação dos PAEMB's, em termos de atendimento aos conteúdos mínimos foram satisfatórias. Verificou-se que todos atendem as diretrizes básicas, entretanto, os estudos de rompimento hipotético de barragem (*Dam Break*), apresentaram como base topográfica para a modelagem, uma junção entre dados de alta resolução (perfilamento a laser ou levantamento topográfico) nas áreas próximas às barragens e dados MDE/SRTM, que correspondem a resolução espacial de 30 m, no restante das áreas a jusante, inclusive nos núcleos urbanos. Segundo a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército – DSG (2016), essa resolução espacial é compatível com trabalhos nas escalas entre 1:50.000 e 1:25.000. Mas para modelagens hidrológicas, nos moldes do rompimento de barragens, a escala topográfica mínima é de 1:25.000, devendo ser mais detalhada em zonas urbanas ou industriais e planícies povoadas (CUNGE; HOLLY; VERWEY, 1980; MORRIS *et al.*, 2009; Agência Nacional de Águas – ANA, 2015; US Army Corps of Engineers – USACE, 2016).

### 4.3 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL

Com relação ao dano socioambiental, quatro barragens foram classificadas como dano extremo, recebendo mais de 6 pontos. São elas: B2, B3, B4 e B5. As informações constantes na **Tabela 23** foram compiladas dos Planos de Ação Emergencial das respectivas barragens, sendo complementadas através de análise espacial em ambiente SIG.

As barragens B1 e B3 são reservatórios de rejeitos provenientes da produção de alumina. Conhecido como “lama vermelha” esse tipo de rejeito é basicamente formado

pela bauxita original, por óxidos insolúveis (principalmente ferro, silício, alumínio e titânio) dispersos em um meio altamente alcalino (GALEMBECK; BARBOSA; SOUZA, 2009) e com grande capacidade de troca catiônica que pode causar sérios danos ambientais (ANTUNES; NAVARRO, 2011) como a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, contaminação do solo, danos a fauna e à flora, corrosão de equipamentos metálicos até o impacto visual sobre extensas áreas (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

**Tabela 23** – Resultado da análise de risco socioambiental caracterizando a área potencialmente atingida a jusante.

(continua)

Barragem	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)	Danos possivelmente causados	Classificação	
B1	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área potencialmente afetada: 3,3 km<sup>2</sup></li> <li>2. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o igarapé Potiritá e seus afluentes;</li> <li>3. Atingimento pontes, estradas, mineroduto e linhas de transmissão;</li> <li>4. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li> <li>5. Impactos nas instalações da mineradora.</li> </ol>	5	Muito alto
B2	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área potencialmente afetada: 57,0 km<sup>2</sup></li> <li>2. Atingimento de 3,6 km<sup>2</sup> (6%) do núcleo urbano de Parauapebas, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água e de distribuição elétrica;</li> <li>3. Atingimento da borda leste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,1 e 0,2% da sua área total;</li> <li>4. Atingimento de 4,5 km<sup>2</sup> (0,6%) da recém-criado Parque Nacional dos Campos Ferruginosos (Decreto s/nº de 5 de junho de 2017);</li> <li>5. Atingimento de parte da Vila Bom Jesus, 5 km a leste da barragem, e demais propriedades rurais a jusante, com atingimento de moradias, plantações, pastos, açudes, etc.;</li> <li>6. Ruptura poderá causar danos sobre o rio Parauapebas e seus afluentes;</li> <li>7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas.</li> <li>8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li> <li>9. Impactos nas instalações da mineradora.</li> </ol>	11	Extremo
B3	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área potencialmente afetada: 25,0 km<sup>2</sup></li> <li>2. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc;</li> <li>3. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parariquara e seus afluentes;</li> <li>4. Atingimento pontes, estradas, mineroduto e linhas de transmissão;</li> <li>5. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li> <li>10. Impactos nas instalações da mineradora.</li> </ol>	7	Extremo

(conclusão)

Barragem	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)	Danos possivelmente causados	Classificação	
B4	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área potencialmente afetada: 101,0 km<sup>2</sup></li> <li>2. Atingimento de 2,5 km<sup>2</sup> (4%) do núcleo urbano de Parauapebas, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água.</li> <li>3. Atingimento da porção nordeste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,06 e 0,07% da sua área total;</li> <li>4. Atingimento do limite norte da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, afetando aproximadamente 12,7 km<sup>2</sup> (5,45%) de área;</li> <li>5. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc;</li> <li>6. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parauapebas, ao igarapé Gelado e seus afluentes;</li> <li>7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas.</li> <li>8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li> <li>9. Impactos nas instalações da mineradora.</li> </ol>	6	Extremo
B5	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área potencialmente afetada: 40,0 km<sup>2</sup></li> <li>2. Atingimento de menos de 0,5% do núcleo urbano de Parauapebas, especificamente na confluência entre o igarapé Gelado e o rio Parauapebas;</li> <li>3. Atingimento da porção nordeste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,06 e 0,07% da sua área total;</li> <li>4. Atingimento do limite norte da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, afetando aproximadamente 3,36 km<sup>2</sup> (1,44%) de área;</li> <li>5. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc;</li> <li>6. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parauapebas, ao igarapé Gelado e seus afluentes;</li> <li>7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas.</li> <li>8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li> <li>9. Impactos nas instalações da mineradora.</li> </ol>	6	Extremo
B6	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área potencialmente afetada: 1,0 km<sup>2</sup></li> <li>2. Atingimento de 0,02% da área da Floresta Nacional de Carajás</li> <li>3. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) ao igarapé Geladinho;</li> <li>4. Interrupção da Estrada de Ferro Carajás, nas proximidades da barragem</li> <li>5. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li> <li>6. Impactos nas instalações da mineradora.</li> </ol>	2	Alto

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4 ANÁLISE E ENQUADRAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DA RESOLUÇÃO Nº 143/2012 DO CNRH

Como é possível associar, em parte, a Categoria de Risco (CR) e o Dano Potencial Associado (DPA) da análise de risco estabelecida pela Resolução nº 143/CNRH (CNRH, 2012), respectivamente, com Índice de Falha Total (IFT) e o Índice de Risco Total (IRT) da análise RBPS, foi possível traçar um comparativo entre ambas (**Tabela 24**), notando-se que houve, em grande parte, semelhanças nas classificações. Porém, enquanto a análise RBPS, categorizou as barragens B3 e B1, como de IFT (equivalente ao CR) médio, a metodologia utilizada pelo DNPM, categorizou como de CR baixo. Observou-se também que, apesar de todas as barragens serem classificadas como DPA alto, a barragem B2 possui um IRT (equivalente do DPA), no mínimo, 2,5 vezes maior que as demais barragens analisadas. Vale ressaltar que a análise RBPS não classifica as barragens em alto, médio e baixo, logo para efeitos comparativos, os 1.000 pontos para IFT apresentados na **Tabela 12**, foram divididos em: i) baixo:  $\leq 333$ ; ii) médio:  $> 333 \leq 666$  e; iii) alto:  $> 666$ .

A análise buscou também estabelecer cenários aos quais as barragens podem ser submetidas (estático, hidrológico, sísmico e de operação de manutenção), demonstrando qualitativamente, a capacidade das mesmas de resistirem a eventos internos (qualidade da operação e manutenção) e externos (inundações e sismos), a exemplo das barragens B3 e B1, que tendem a uma maior possibilidade de falha em cenários hidrológicos e a barragem B6, ao cenário estático.

Diferentemente da metodologia de análise oficial, para a utilizada neste estudo, o risco está relacionado diretamente com possíveis perdas de vida, na forma do Potencial de Perdas de Vidas Humanas, fator que permite uma visão mais clara sobre essa possibilidade que, no geral, apresentou-se baixas ou nulas para todas as barragens da análise. Dessa forma foi possível ainda observar que, no caso da barragem B2 e B4, os cenários mais conservadores indica que cerca de 12.900 e 5.818 pessoas, respectivamente, podem ser atingidas, enquanto as estimativas da análise de risco oficial para ambas as barragens está entre 501 e 1000 pessoas.

**Tabela 24** – Comparativo entre a metodologia aplicada neste estudo e a metodologia de análise de risco utilizada no Brasil

Barragens	Análise de risco utilizada no Brasil				Análise RBPS						
	CR	DPA	Classe	População em risco	Índice de Falha Total		Índice de Risco Total	Índice Socioeconômico	Dano socioambiental		Pop. em risco
B1	Baixa	Alto	B	0 – 100 <sup>4</sup>	428,63	Médio	0	0	5	Muito alto	0
B2	Baixa	Alto	B	501 - 1000	375,66	Médio	969,20	4846,01	11	Extremo	12.900
B3	Baixa	Alto	B	0 – 100	455,18	Médio	5,97	29,86	7	Extremo	65,6
B4	Baixa	Alto	B	501 - 1000	341,22	Médio	395,82	1985,22	6	Extremo	5.818
B5	Baixa	Alto	B	1 - 100	329,47	Baixo	6,59	28,33	6	Extremo	86
B6	Baixa	Alto	B	1 - 100	335,64	Médio	0	0	2	Alto	0

Fonte: Elaborada pelo autor

<sup>4</sup> \* No SIGBM não consta o limiar de população atingida, mas informa que não existem pessoas ocupando permanentemente a área em risco.

## 5 CONCLUSÃO

Dentro do sistema de gestão de riscos, a metodologia *Risk-Based Profiling System* (RPBS) é, em termos práticos, um instrumento qualitativo de tomadas de decisões baseada no risco. Sua aplicação em barragens de rejeito de mineração do estado do Pará mostrou bons resultados, passível de utilização e com maior possibilidade de detalhamento em comparação à análise de risco utilizada atualmente para este tipo de barragem, tendo em vista que a RBPS baseia-se na avaliação de quatro cenários e na possibilidade de estimar (considerando as incertezas das modelagens hidrológicas) o número de pessoas afetadas por um possível rompimento de barragem, na dissociação entre o risco à população e o risco ao ambiente, tanto urbano quanto natural (na forma do Índice de Risco Total e do Dano Socioambiental) e na projeção dos possíveis cenários de falha. Ainda assim, ambas cumpriram seu papel de forma satisfatória.

No aspecto da tomada de decisão baseada no risco, a barragem que mais apresentou potencial de afetar as áreas a jusante foi a barragem B2, pois seu rompimento afetaria uma série de aspectos ambientais (vegetação, corpos hídricos superficiais, vida animal, biota aquática, solo, tanto fora quanto dentro de áreas especiais de conservação) e aspectos urbanos (moradias, equipamentos de fornecimento de água e energia, hospitais, escolas, estabelecimentos comerciais, entre outros). Não menos importante, afetaria áreas rurais (sítios, sedes de fazenda, plantações, pastos, entre outros).

Dentre as barragens que afetariam o município de Parauapebas, o rompimento da barragem B2, atingiria 4% da área urbana, principalmente as porções localizadas às margens do rio Parauapebas e seus afluentes que cortam a cidade. Nessas áreas, denominadas áreas de várzea, geralmente estão estabelecidas as populações de menor poder aquisitivo, menor índice educacional, com pouco acesso a serviços básicos de saúde e segurança, aspectos que influenciam diretamente para tornar essas populações mais vulneráveis a riscos tecnológicos e socioambientais.

O ponto relevante e diferencial da metodologia RBPS é a possibilidade de análise de cenários individuais, para os quais, em cada um deles, determinados parâmetros das barragens e seu ambiente de entorno são exigidas em maior ou menor escala. Considerando que cada cenário recebeu o máximo de 300 pontos para os fatores de resposta, com exceção do cenário de operação e manutenção, que recebe no

máximo 100 pontos, nenhuma das barragens, em cada cenário, obteve pontuação próxima do seu máximo, indicando uma tendência equilibrada, onde nenhum cenário de solicitação apresentou-se como um ponto focal de possível rompimento.

Os estudos de rompimento hipotético de barragem (“*Dam Break*”), presentes nos PAEBM’s foram fundamentais para a análise de risco das áreas a jusante das barragens. Seu entendimento é fundamental para extrair e gerar informações derivadas que dão substância à análise. Fica claro que a qualidade desses estudos não deve ser desmerecida e é fundamental que, principalmente nas áreas urbanas, seja realizada a partir de dados topográficos de alta resolução.

Assim, a identificação e detalhamento do potencial de risco das barragens por meio da análise RBPS representa um instrumento que pode ser útil como subsídio a implantação de medidas mitigadoras de risco, tanto na barragem com nas áreas a jusante, atuando também de forma complementar a metodologia de análise vigente, sobretudo quanto aos cenários de solicitação e a caracterização do potencial de perdas de vidas e danos socioambientais nas áreas a jusante.

Entretanto, ainda existem fontes de incerteza que devem ser ponderadas para esta análise. Algumas podem ser dirimidas com a disponibilidade de informações, outras são inerentes à metodologia e à conjuntura social em que está inserida a barragem.

Para a construção dos cenários de solicitação, algumas informações não puderam ser obtidas, mesmo com os dados do SIGBM. As categorias fator de segurança, sistema de descarga de vazões, nível de vibração do plano de fogo e infrações cometidas foram definidas como “sem informação” para todos os cenários, recebendo valores intermediários para que sua ausência não influenciasse diretamente nos resultados. Ainda assim, são informações extremamente relevantes para a análise. Estabeleceu-se ainda que a posição do lançamento do rejeito dá-se em um único ponto, de montante para jusante em todas os reservatórios.

A construção do cenário sísmico foi a que mais careceu de informações, pois além do nível de vibração do plano de fogo, a taxa de sismicidade regional (ou dados históricos) não puderam ser obtidos, logo, os resultados oriundos deste cenário devem ser tratados com cautela e posteriormente reavaliados.

Ressalta-se ainda que os dados extraídos do SIGBM não foram validados em campo, logo, não se pôde definir, especificamente, a relevância, a localização e as dimensões (ou ainda medidas corretivas) das trincas e de outros fatores nos resultados. Portanto, a utilização desses dados teve caráter de experimentação metodológica e a metodologia aplicada será ainda amplamente discutida com a finalidade de alcançar os melhores resultados possíveis com os dados à disposição.

Em termos metodológicos, a incerteza está relacionada aos estudos de “*Dam Break*”, que são extremamente complexos, pois o escoamento proveniente da ruptura de barragens é tipicamente tridimensional com grande variação das grandezas hidráulicas (Monte-Mor 2004) e necessitam de dados de alta qualidade para obtenção de resultados consistentes, sendo que os estudos de “*Dam Break*” avaliados em grande parte foram elaborados a partir de MDE’s SRTM que são fontes incompatíveis com a escala da análise, podendo interferir, principalmente nos limites das áreas inundadas.

No caráter social, as fontes de incerteza são condições de vulnerabilidade e entendimento do risco por parte da população já que uma análise mais específica desses aspectos é necessária. E em âmbito geral as condições de governabilidade municipais, estaduais e federais que vão ditar, em parte, a resiliência nas áreas a jusante.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Manual do Empreendedor: guia de orientação e formulários dos planos de ação de emergência – PAE*. Brasília, DF: Agencia Nacional de Águas, 2015. v. 4.

AHMED, S.S.; TAHLAWI, M.R.E. Environmental Impacts of Mining Operations A Case Study: Monitoring the Impacts at Abu Tartour Phosphate Mine. *Egypt*, v. 1, n. 4, p. 1-6, 2011.

ALVES, H. R. *O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos?* 2015. Disponível em: <[http://www.domhelder.edu.br/uploads/artigo\\_HRA.pdf](http://www.domhelder.edu.br/uploads/artigo_HRA.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2017.

ANTUNES, M.L.P.; NAVARRO, G.R.B. Caracterização da Lama Vermelha Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras Aplicações. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 3., 2011, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Universidade Paulista, 2011. p.1-10.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 10004*. 2. ed. Rio de Janeiro: CENWEB, 2004.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: A review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-53, 2010.

BAPTISTA, M.L.P. *Abordagens de risco em barragens de aterro*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

BOWKER L.N.; CHAMBERS D.M. The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures. *Earthwork Act*, p. 1-56, 2015.

BRASIL. Lei 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, 2012.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Seção I, n. 181, p. 1-2. 2010.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. Portaria no 416, de 03 de Setembro de 2012. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, n. 243, Seção 1, pág. 81, 2012. Disponível em: <<http://www.dnmp.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnmp/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-416-em-03-09-2012-do-diretor-geral-do-dnmp>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

\_\_\_\_\_. Portaria nº 526, de 12 de maio de 2010. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, 14 mai. 2010

CARMO, F.F.; KAMINO, L.H.Y.; TOBIAS JUNIOR, R.; CAMPOS, I.C.; CARMO, F.F.; SILVINO, G.; CASTRO, K.J.S.X.; MAURO, M.L.; RODRIGUES, N.U.A.; MIRANDA, M.P.S.; PINTO, C.E.F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

COLLE, G.A. *Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança*. 124f. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CBDB. Guia básico de segurança de barragens. 2001. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/simposio/Guia%20Seg.%20Barr%20-%20CBDB-SP.pdf>>. Acesso em: 4 mar. 2018.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. *Resolução no 143*, de 10 de julho de 2012. Disponível em: <[http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2013/12/resolucao\\_cnrh\\_143\\_\\_de\\_classificacao\\_barragens\\_categoria\\_risco.pdf](http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2013/12/resolucao_cnrh_143__de_classificacao_barragens_categoria_risco.pdf)>. Acesso em: 31 mar 2017.

COSTA, W.D. *Geologia de barragens*. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.

CUNGE J.A.; HOLLY J.F.M.; VERWEY A. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Boston: Pitman Edition, 1980.

DAVIES, M.P. Distinguished Lecturer Series - Impounded mine tailings: What are the failures telling us? *CIM Bulletin*, v. 94, n. 1052, p. 53, 2001.

DAVIES, M.P.; MARTIN, T.E. Mine tailings dams: when things go wrong in proceedings of tailing dams. Las Vegas: Association of State Dam Safety Officials, U.S. *Committee on Large Dams*, 2000. p. 261-273.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO - DSG. *Especificação técnica para produtos de conjuntos de dados geoespaciais*. 2. ed. Brasília, DF, 2016 195p.

ESCUDER I.; MEMBRILLERA M.G.; MORENO P.; PÉREZ O.; ARDILES L.; JENARO E. Development of a complementary program based on security risk analysis for dams of the hydrographic confederation of the Duero (in Spanish). In: CONGRESO DE INGENIERÍA CIVIL, 5., 2007, Sevilha, Espanha. *Anais...* Sevilha: Territorio y Medio Ambiente, 2007. p. 1-15.

FÖRSTNER, U. Introduction. In: AZCUE J.M. (Ed.). *Environmental impacts of mining activities*. Berlin: Heidelberg Environmental Science, Springer, 1999. p. 1-2.

FOSTER, M; FELL, R; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 25, p. 1000-1024, 2000.

G1 PARÁ. *10 pontos para entender o vazamento de barragem de mineradora que contamina Barcarena, no PA*. 2018. Disponível em:< <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/10-pontos-para-entender-o-vazamento-de-barragem-de-mineradora-que-contamina-barcarena-no-pa.ghtml>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

\_\_\_\_\_. *Vazamento de caulim chega ao afluente do Rio Pará*. 2007. Disponível em:<<http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,MUL51630-5598,00.html>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

GALEMBECK, F.; BARBOSA, C.A.S.; SOUSA, R.A. Aproveitamento sustentável de biomassa e de recursos naturais na inovação química. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 571-581, 2009.

GONÇALVES, C.D.A.B.; SOUZA, Í.M.; PEREIRA, M.N.; FREITAS, C.C. Análise do ambiente residencial urbano visando a inferência populacional a partir do uso de dados de sensoriamento remoto de alta resolução. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 14., 2004, Campinas-SP. *Anais...* Campinas: Associação Brasileira de Estudos Populacionais, 2004. p. 1-22.

GRAHAM, W. A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. U.S. *Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office*, set, p 1-43. 1999.

HARRALD, J. R., RENDA-TANALI, I., SHAW, G. L., RUBIN, C. B., YELETAYSI, S. *Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams*. 2004. Disponível em: [http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/USACE\\_ICDRM\\_RepApr29.pdf](http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/USACE_ICDRM_RepApr29.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2018.

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

HIND, A.R.; BHARGAVA, S.K.; GROCCOTT, S.C. The surface chemistry of Bayer process solids: A review. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 146, n. 1-3, p. 359–374, 1999.

HUDSON-EDWARDS, K.; MACKLIN, M.G.; JAMIESON, H.E.; BREWER, P.A.; COULTHARD, T.; HOWARD, A.; TURNER, J. The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the R os Agrio–Guadamar, Aznalcóllar, Spain. *Applied Geochemistry*, v. 18, n. 2, p. 221-239, fev. 2003.

HYDRO. *Plano de ações emergenciais de barragens de mineração – PAEBM: Sistema de disposição de rejeitos área do Vale (B3)*. 2017a. 99p.

\_\_\_\_\_. *Plano de ações emergenciais de barragens de mineração – PAEBM: Sistema de disposição de rejeitos área do Patlô 1 (RP-1)*. 2017b. 99p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE . 2010. *Censo demográfico*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 25 maio 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. *Gestão e manejo de rejeitos de mineração*. Brasília, DF: IBRAM, 2016. 128p.

\_\_\_\_\_. *Perspectivas da mineração no mundo e no Brasil*. Porto Alegre: UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. 76p.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS - ICOLD. *80 years: dams for human sustainable development*. Paris: CIGB/ICOLD, 2008. 23p.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W.E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S.J.; MACKLIN, M.G.; HUDSON-EDWARDS, K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229–245, 2014.

LOUREÇO, L. Riscos naturais, antrópicos e mistos. *Territorium: Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, Coimbra, v. XIV, 2007.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A . *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 896 p.

MATTSON H.; HELLSTRÖM J.G.I.; LUNDSTRÖM T.S. On Internal Erosion in Embankment Dams: a literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically. *Research Report*. p. 1-52. 2008.

MCGRATH S. To Study International Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management. 2000. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/churchillreport.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2017.

MELLO, F.M. A importância dos reservatórios formados por barragens. 2013. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/site\\_antigo\\_2013/img/47artigo.pdf](http://www.cbdb.org.br/site_antigo_2013/img/47artigo.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

MONTE-MOR, R.C.A. *Mapeamento de áreas inundáveis associadas à ruptura de barragens – estudo de caso: barragem de Ninho da Águia - MG*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004

MORRIS, M.; HASSAN M.; KORTENHAUS A.; VISSER P.J. Breaching Processes: A state of the art review. *Floodsite Project Report*, v. 5, n. 2, p. 1-70. 2009.

PARDO, J.A.R. *Metodologia para análise e gestão pavimentos ferroviários*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A.R.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. G. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, n. 2, p. 846–852, 2008.

SILVEIRA, J.F.A. A análise de risco aplicada a segurança de barragens. *Revista Brasileira de Engenharia*, ed. especial, p. 1-42, nov. 1999.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION - USBR. Subjective Probability and Expert Risk Management. In: USBR. UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. *Risk management - best practices and risk methodology*. 2015. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/I-6-20150608.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*. [S.l.]: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016. 960p.

VALE. *Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: barragem do Sossego*. Canaã dos Carajás, 2016a. 101p.

\_\_\_\_\_. *Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: barragem do Gelado*. Parauapebas, 2016b. 97p.

\_\_\_\_\_. *Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: barragem do Geladinho*. Parauapebas, 2016c, 95p.

\_\_\_\_\_. *Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: barragem do Pera Jusante*. Parauapebas, 2016d, 100p.

VALERIUS, M.B. *Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás*. 2014. 121f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

VIANNA, L.F.V. *Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão*. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

## APÊNDICE

**APÊNDICE A: GUIA DE ANÁLISE DE RISCO EM BARRAGENS DE  
MINERAÇÃO**

GUIA PRÁTICO

# **Análise de Risco em Barragens de Rejeitos de Mineração**

RAIMUNDO ALMIR COSTA DA CONCEIÇÃO

## ANÁLISE DE RISCO EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

### **Nota:**

O material apresentado a seguir faz parte de um dos objetivos da tese de mestrado profissional do aluno, Raimundo Almir Costa da Conceição, denominada **Análise do potencial de risco de rompimento em barragens de rejeito de mineração do estado do Pará utilizando a metodologia *Risk-Based Profiling System (RBPS)*** desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastres na Amazônia, da Universidade Federal do Pará (UFPA).

# Conteúdo

<b>Apresentação</b>	<b>4</b>
<b>Motivação e Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>Análise de Risco</b>	<b>6</b>
<b>Análise do Potencial de Falha</b>	<b>7</b>
Determinação do Fator de Carga	7
Determinação do Fator de Resposta	8
<b>Estimativa de Perdas de Vidas Humanas</b>	<b>9</b>
<b>Índice de Risco</b>	<b>12</b>
<b>Danos Socioambientais</b>	<b>13</b>
<b>Resultados da Análise</b>	<b>14</b>
<b>Considerações Finais</b>	<b>17</b>
<b>Bibliografia Consultada</b>	<b>18</b>
<b>Anexo</b>	<b>19</b>
<i>Tabela de Pontuação dos fatores de carga do Cenário de Condição Estática</i>	<i>20</i>
<i>Tabela de Pontuação dos fatores de carga do Cenário Hidrológico</i>	<i>21</i>
<i>Tabela de Pontuação dos fatores de carga do Cenário Sísmico</i>	<i>22</i>
<i>Tabela de Pontuação dos fatores de carga do cenário de Operação e Manutenção (O&amp;M)</i>	<i>23</i>

# A análise de risco é uma ferramenta de planejamento

## Apresentação

Este guia apresenta de forma prática e fácil, os principais aspectos metodológicos de uma análise de risco de rompimento em barragens de mineração. Foi baseado na análise *Risk-Based Profiling System* (RBPS), criada pelo criada pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR), Agência Federal Americana responsável pela gestão do abastecimento de água em 17 estados americanos. A adaptação para barragens de mineração foi elaborada por Valerius (2014) ao fazer análise de risco das barragens do estado de Goiás. Para este guia, algumas modificações foram realizadas na metodologia adaptada.

# A cada 1/3 de século, o risco em barragens de mineração aumenta em 20 vezes

## Motivação e Objetivos

Estudos apontam um crescimento relevante, em todo o mundo, de acidentes graves e muito graves relacionados a rompimentos de barragem, a exemplo dos vazamentos recentes de rejeito de bauxita no município de Barcarena, PA e do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG, este resultando de 19 mortes e severos impactos ambientais no ano de 2015.

Esses eventos estão diretamente ligados ao aumento da produção mineral mundial e consequentemente ao aumento exponencial na produção de rejeitos, que necessitam de reservatórios de contenção cada vez maiores, o que levou a um aumento dos acidentes de barragens, a partir da década de 1960. Alguns autores, como Robertson (2011), afirmam que o potencial de risco das barragens de rejeito aumenta 20 vezes a cada  $\frac{1}{3}$  de século.

Após o evento de rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG, foi firmado um Acordo de Cooperação Técnica entre o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e o Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) para a realização de mapeamentos e análises de risco em barragens de mineração incluídas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010).

Além de colaborar com alguns aspectos deste Acordo de Cooperação, foi elaborado este guia, para apresentar uma metodologia de análise de risco que possa ser realizada com dados obtidos relativa facilidade, que possa ser também uma alternativa aos critérios de análise de risco de barragens de mineração vigente no país (Resolução nº 143/CNRH).

Não se esgotam, entretanto, as possibilidades de atualizações futuras deste documento, tendo em vista o seu caráter construtivo-metodológico.



Vazamento de rejeito de bauxita (lama vermelha) em Barcarena, PA. Foto: G1



Destroços das moradias após o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana, MG. Foto: Christophe Simon/AFP

# Indústrias químicas, petrolíferas e nucleares: pioneiras na análise de risco

## Análise de Risco

A premissa básica da análise de risco é obter um panorama geral da condição apresentada a partir dos dados disponíveis, com a finalidade de garantir um sistema de gestão mais seguro.

Para alcançar este panorama geral, a metodologia de análise, deverá responder a seguinte pergunta:

“Ocorrendo um cenário que propicie o rompimento de uma barragem (chuva atípica, sismo, operação ineficiente...), qual a probabilidade de que este rompimento ocorra?”

Para responder a pergunta, deve-se realizar as seguintes etapas:

1. Análise do Potencial de Falha;
2. Estimativa de Perdas de Vidas Humanas;
3. Análise do Dano Socioambiental.

Logo, a análise segue a equação clássica do risco:

$$R = \sum [P(\text{Carga}) \cdot P(\text{Resposta})] \cdot \text{Consequências}$$

Onde:

**P(Carga)**. **P(Resposta)** é a Análise do Potencial de falha e;

**As Consequências** são a Estimativa de Perdas de Vida e a Análise do Dano Socioambiental.

### **P(Carga) ou Fator de Carga?**

Indica a probabilidade da ocorrência de um cenário de solicitação (chuva anômala, abalo sísmicos, operação inadequada da barragem)

### **P(Resposta) ou Fator de Resposta?**

Na ocorrência de um cenário de solicitação, indica qual a probabilidade de falha da barragem

### **Análise Qualitativa**

Esta análise é subjetiva, o que não é motivo de desmerecimento, já que o julgamento perceptivo tem estado presente em diversas abordagens da engenharia e segurança de barragens, cujo o sucesso é indiscutível

# O fator de carga é pré-estabelecido através da probabilidade subjetiva

## Análise de Risco

### Análise do Potencial de Falha

#### Determinação do Fator de Carga

Primeiramente, deve-se estabelecer o **fator de carga**, que indica a probabilidade de ocorrência de determinado cenário. Esses cenários representam as situações onde ocorrem a maioria dos acidentes de barragens: **cenário Estático, Hidrológico, Sísmico e de Operação e Manutenção (O&M)**.

O fator de carga é pré-estabelecido através do recurso de probabilidade subjetiva, utilizado pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR), onde faixa de valores (Tabela 1) são julgadas como críveis com base nas evidências disponíveis analisadas por um conjunto de especialistas, refletindo o grau de convicção na ocorrência de determinado evento. A probabilidade de cada cenário é apresentada na **Tabela 2**.

#### Cenário Estático

Considera-se a barragem trabalhando normalmente, sem implicações externas. Dessa forma, os fatores que podem ter maior influência quando a barragem é exigida será o nível máximo de alteamento e o nível de água no talude.

#### Cenário Hidrológico

Considera-se principalmente as inundações que ocorrem a montante da barragem, dentro da bacia hidrográfica. Geralmente este cenário está atrelado a ocorrência de chuvas anômalas.

#### Cenário Sísmico

Relaciona-se a incidência sísmica natural da região ou ainda a sismicidade induzida pelos planos de fogo das minas e pelo trânsito de equipamentos de transporte pesado às proximidades da barragem.

#### Cenário O&M

Cumprimento das responsabilidades por parte do empreendedor. Geralmente é verificada em relatórios de inspeção fiscal, de consultorias ou ainda do Plano de Ação Emergencial para Barragens de Mineração (PAEBM)

Tabela 1. Probabilidades subjetiva

Descritor	Probabilidade
Virtualmente certo	0,999
Muito provável	0,99
Provável	0,9
Neutro	0,5
Improvável	0,1
Muito improvável	0,01
Vitualmente impossível	0,001

Tabela 2. Fatores de carga para cada cenário

Cenário	Probabilidade
Condição estática	0,99
Hidrológico	0,9
Sísmico	0,5
O&M	---

# A soma dos Índices de Falha representará Potencial de Falha da barragem

## Análise de Risco

### Análise do Potencial de Falha

#### Determinação do Fator de Resposta

O **fator de resposta** representa a resposta da barragem ao cenário solicitado e é definido através de pontuações. Dependendo da avaliação cada cenário poderá receber até 300 pontos, com exceção do cenário de O&M que receberá no máximo 100 pontos, totalizando 1.000 pontos possíveis. A estimativa de pontuação é realizada através do preenchimento de 4 planilhas eletrônicas (**Anexo 1**) e podem ser atualizadas de acordo com as necessidades, porém, respeitando o limite de pontuação.

Esta etapa exige grande quantidade de dados, tanto da barragem (altura, volume, revestimento e condição do talude, sistema de drenagem, etc.), quanto das condições de operação (PAEBM, tipo de inspeção, documentação, etc.).

Esses dados podem ser obtidos no PAEBM, no SIGBM (Sistema de Informação Geográfica para Barragens de Mineração) de responsabilidade do DNPM (ANM - Agência Nacional de Mineração), junto às Secretarias Estaduais de Meio Ambiente (SEMA) e junto ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

#### Cálculo do Índice de Falha (IF)

A multiplicação do Fator de Carga pelo Fator de Resposta resultará no Índice de Falha (IF) da barragem que mede seu potencial de falha. A soma dos IF's representa do Índice de Falha Total (IFT).

O Potencial de Falha é o primeiro termo da equação do risco.

#### Caracterização do cenário

É realizada com base no preenchimento de planilhas eletrônicas para definição das pontuações de cada aspecto da barragem que mais influencia no cenário analisado. Essa pontuação define o potencial de falha. Quanto mais próximo do limite estipulado, maior será o potencial.

#### Incertezas

Caso não existe informações suficientes para a caracterização completa do cenário, este dado poderá ser estimado de forma conservadora. Grande parte dos dados são encontrados nos PAEBM e no SIGBM (Sistema de Informação Geográfica de Barragens de Mineração) de responsabilidade do DNPM.

# As estimativas de perdas de vidas humanas são permeadas por incertezas

## Análise de Risco

### Estimativa de Perdas de Vidas Humanas

As estimativas de perdas de vidas em acidentes relacionados a barragem são permeadas por diversas incertezas, pois são altamente dependentes de vários fatores como o tempo de falha da barragem (hora, dia, estação), condições da existente do momento da falha (chuva, neve, escuridão). Não se sabe quando o aviso será emitido, pois são dependentes de várias considerações por parte das mineradoras. As estimativas de atingimento da mancha de inundação, realizadas através de modelagem matemática são imprecisas, devido principalmente a sua complexidade.

Ainda assim Graham (1999), elaborou uma estimativa de perdas de vida baseando-se em dados estatísticos de mais de 400 acidentes com barragens que ocorreram entre 1960 e 1998. Esta estimativa orienta-se através de três tipos de informação: **a severidade da inundação, o tempo de alerta, o entendimento da severidade da inundação e o número de pessoas afetadas.**

### Estatísticas de perda

**50% das mortes ocorreram a 4,8 km ou menos de uma barragem que falhou. Mais de 99% das mortes ocorreram a 24 km ou menos. E as falhas em barragens com menos de 15 m de altura causou 88% das mortes. Essas barragens não são suficientemente altas para serem incluídas no inventário ICOLD (Graham, 1999)**

### Severidade da inundação

Relaciona-se com o potencial de destruição: considera-se **severidade baixa** quando as moradias e afins não são levados de suas fundações; a **severidade média** ocorre quando as casas são destruídas, mas as árvores ou as casas destroçadas permanecem para que as pessoas busquem refúgio e; a **severidade alta** ocorre quando a inundação varre a área e nada permanece.

Geralmente, a severidade pode ser associada a velocidade da onda de inundação. Esse dado está disponível nos estudos de rompimento hipotético de barragem (*Dam Break*) apresentado no PAEBM

### Tempo de alerta

Refere-se ao tempo decorrido entre o alerta de rompimento e o tempo de chegada da onda de inundação: **Nenhum aviso significativo, 15 a 60 minutos e mais de 60 minutos.**

### Entendimento sobre a severidade da inundação

Entendimento dos emissores sobre a gravidade da inundação: a **compreensão é vaga** quando os emissores de alerta não compreendem a verdadeira magnitude da inundação e; o **entendimento é preciso** quando os emissores de alerta têm uma excelente compreensão das inundações.

### Número de pessoas afetadas

É a quantidade de pessoas que podem ser afetadas pela onda de inundação. Esse número pode ser calculado de forma prática através da contagem de unidades residenciais em imagens de satélite. Multiplica-se posteriormente o valor encontrado, pelo número médio de pessoas por moradia, fornecido pelo Censo 2010 do IBGE. Esse valor pode variar, por estado. No Pará, por exemplo, o número médio de pessoas por moradia é 4,1. Existem outras formas mais precisas para estimar esse valor e podem ser utilizadas, porém exigem tempo e outros tipos de dados.

# A soma dos Índices de Falha é representar o Potencial de Falha da barragem

## Análise de Risco

### Estimativa de Perdas de Vidas Humanas

As informações de severidade da inundação, o tempo de alerta e o entendimento sobre a severidade são associados ao índice de fatalidade, conforme a **Tabela 3**. O limiar correspondente a barragem em estudo **é multiplicado pelo número de pessoas, obtendo-se assim o estimativa de perdas de vida.**

Tabela 3. Índice de Fatalidade elaborado por Graham (1999)

Severidade da Inundação	Tempo de alerta (minutos)	Entendimento da Severidade da Inundação	Índice de Fatalidade (Fração das pessoas em risco com expectativa de morte)			
			Sugerido	Limiar Sugerido		
Alta	Sem aviso	Não aplicável	0,75	0,30 a 1,0		
	15 a 60	Vago	Use os valores mostrados acima e aplique-se ao número de pessoas que permanecem na planície de inundação da falha da barragem depois que os avisos são emitidos. Nenhuma orientação é fornecida sobre quantas pessoas permanecerão na planície de inundação.			
		Preciso				
	> 60	Vago				
		Preciso				
	Média	Sem aviso			Não aplicável	0,15
15 a 60		Vago			0,04	0,01 a 0,08
		Preciso	0,02	0,005 a 0,04		
> 60		Vago	0,03	0,005 a 0,06		
		Preciso	0,01	0,002 a 0,02		
Baixa		Sem aviso	Não aplicável	0,01	0,0 a 0,02	
	15 a 60	Vago	0,007	0,0 a 0,015		
		Preciso	0,002	0,0 a 0,004		
	> 60	Vago	0,003	0,0 a 0,0006		
		Preciso	0,0002	0,0 a 0,0004		

# A soma dos Índices de Falha representará Potencial de Falha da barragem

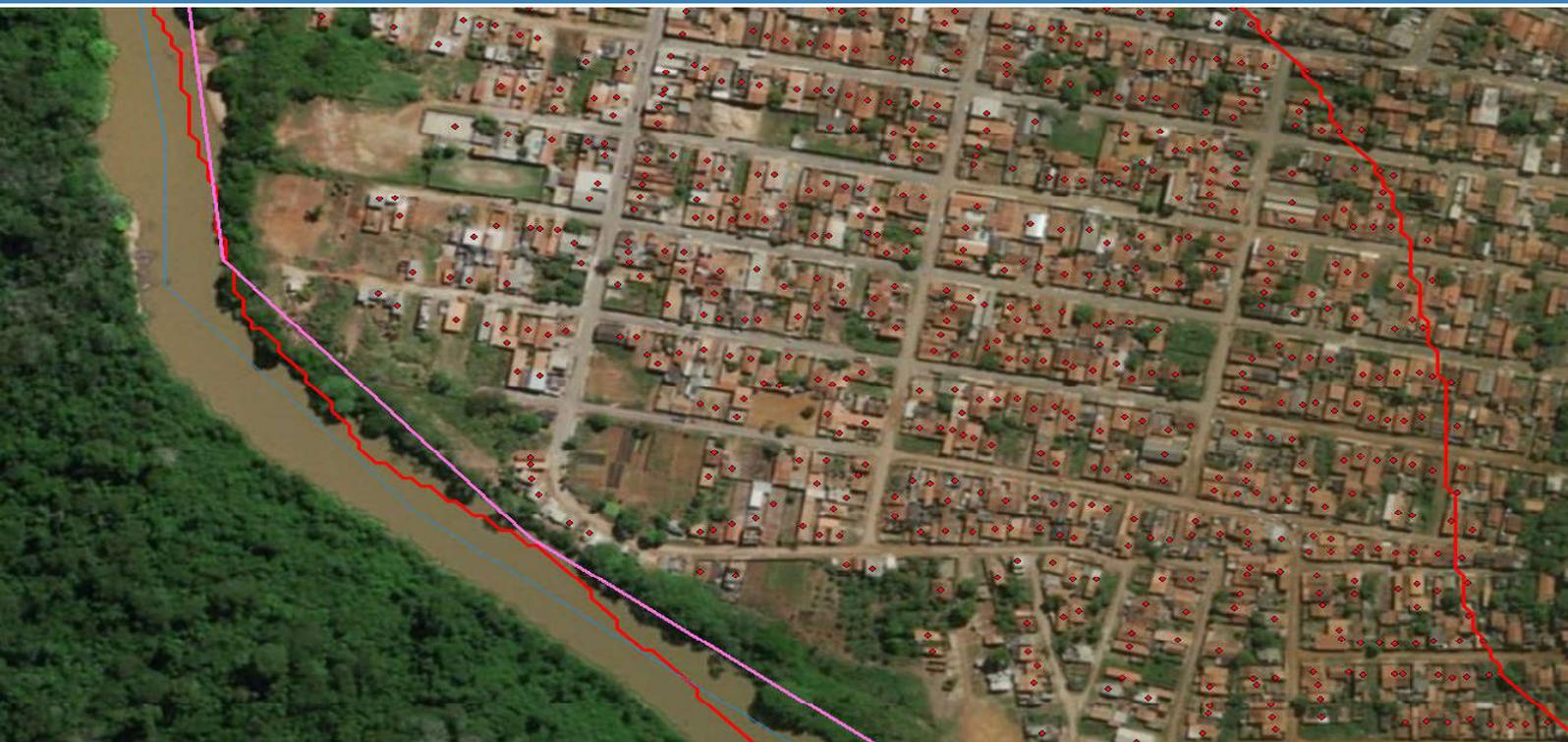


Figura 3. Imagem de satélite utilizada para contagem das moradias dentro da mancha de inundação. Os pontos vermelhos indicam as moradias e a linha em vermelho indica o limite da mancha de inundação modelada pela análise de rompimento de barragem (*Dam Break*)

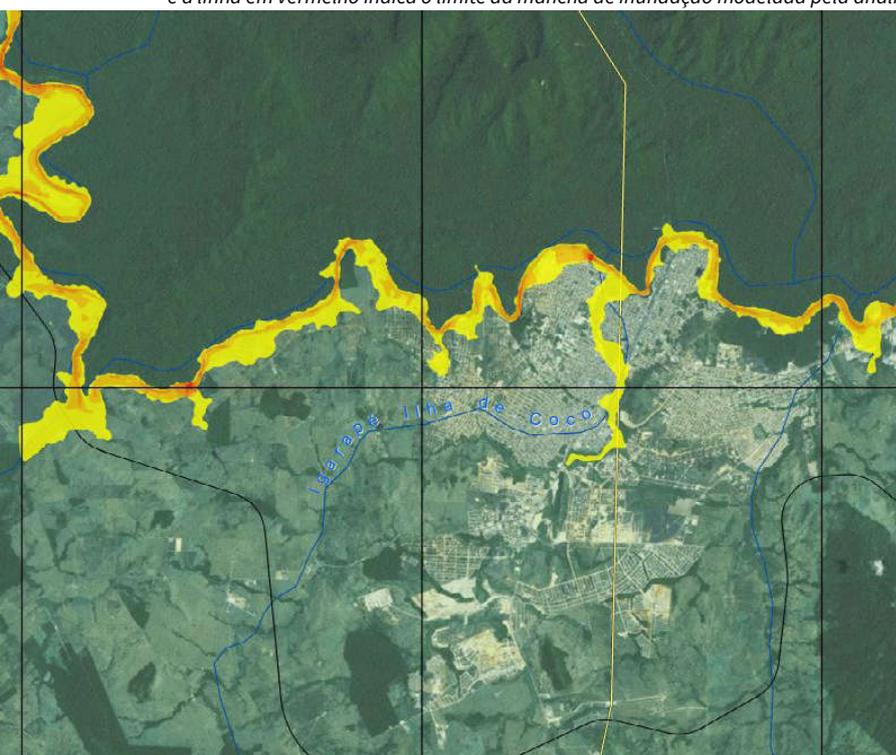


Figura 4. Estudo de *Dam Break*. Cenário de velocidade máxima. Esse tipo de modelagem pode indicar a severidade da inundação.

# Os valores de IF de cada cenário são multiplicados pelas perdas, obtendo-se o IRT

## Análise de Risco

### Índice de Risco

Realizadas as duas etapas anteriores (determinação do índice de falha da barragem e potencial de perdas de vidas humanas), os valores obtidos são multiplicados para determinar o Índice de Risco da barragem.

É importante ressaltar que este índice está diretamente ligado ao número de pessoas atingidas. Logo, o número de pessoas é determinante para um risco elevado, mesmo que o índice de falha seja consideravelmente elevado. Do mesmo modo, uma grande área de atingimento em caso de acidente não garante também um risco alto.

Na metodologia da USBR, os danos socioambientais não são tratados. Entretanto Valérius (2014), incluiu a Estimativa de Danos Socioambientais, que será mostrada a seguir.

Vamos a um exemplo:

Supondo que:

1. Para cada cenário, o IF foi:
  - Condição Estática = 132,1
  - Hidrológico = 120,34
  - Sísmico = 60,0
  - O&M = 30
2. O Potencial de Perdas de Vidas foi igual a 3 (indicando que de todas as pessoas afetadas, três delas tem chance de vir a óbito).
3. Multiplica-se o Potencial de Perdas de Vidas por cada cenário, resultando no IR de cada um deles:
  - $132,1 \times 3 = 393,3$
  - $120,34 \times 3 = 361,02$
  - $60,0 \times 3 = 180,0$
  - $30 \times 3 = 90,0$
4. A soma dos IR's é o índice de Risco Total da barragem:
  - **IRT = 1.024,32**

# Os Danos Socioambientais são medidos pelos transtornos causados

## Análise de Risco

### Danos Socioambientais

Este tipo de dano implica na exposição do rejeito proveniente do rompimento da barragem ao meio ambiente, ao espaço urbano e rural. Em curto prazo - horas ou meses - a qualidade da água, dos sedimentos, e da biota aquática é afetada. No médio e longo prazo - anos ou séculos - os solos, a planície como um todo e a vegetação podem ser afetadas, principalmente na presença de minerais metálicos, influenciando negativamente na pecuária e na agricultura.

Nesse aspecto, relacionam-se a qualidade do rejeito (NBR 10004 – ABNT, 2004) armazenado aos danos causados ao ambiente, através de um sistema de pontuação, conforma a **Tabela 4**.

Tabela 4. classificação do dano socioambiental

Danos causados	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)		
	Perigoso	Não inerte	Inerte
Ruptura poderá causar transtornos para o abastecimento de água de alguma cidade	4	4	1
Ruptura poderá afetar alguma área de conservação ambiental	4	1	0,5
Ruptura poderá afetar um núcleo urbano	6	3	4
Ruptura poderá causar danos à mineradora	2	1	0,5
Ruptura poderá causar danos sobre corpos de água superficiais	2	1	0,5
Ruptura poderá afetar núcleos rurais	4	4	1
Ruptura poderá afetar estradas, pontes, rodovias, rede de energia elétrica e/ou telecomunicação, ferrovias, etc.	4	1	0,5

Conforme a soma das pontuações, o dano pode ser qualificado como:

- Dano Extremo se  $\Sigma \geq 6$
- Dano Muito Alto se  $\Sigma \geq 4 < 6$
- Dano Alto se  $\Sigma \geq 2 < 4$
- Dano Considerável se  $\Sigma < 2$
- 

### NBR 10004

**resíduos classe I – Perigosos: podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente;**  
**resíduos classe II A – Não inertes: podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água;**  
**resíduo classe II B – Inertes: na água, seus constituintes não são solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.**

# O fluxograma é uma forma simples e eficiente de entender a metodologia

## Análise de Risco

### Fluxograma resumido da análise de risco RBPS

$$R = \sum [P(\text{Carga}) \cdot P(\text{Resposta})] \cdot \text{Consequências} \quad (1)$$

Dados de Entrada	
$P(\text{Carga})$	$P(\text{Resposta})$
Probabilidade subjetiva (ou transformação verbal), de acordo com USBR (2015)	Características técnicas da barragem e seu entorno.
	Dados obtidos nos PAEBM e SIGBM

Dados de Entrada
Estudo de <i>Dam Break</i> , imagens de satélite e nº de pessoas atingidas.
Dados obtidos no PAEBM, Censo do IBGE e por foto-interpretação de imagens de satélite.
É representada pelo Potencial de Perdas de Vidas Humanas e pode ser calculado de acordo com Graham (1999)

$$P(\text{Carga}) \cdot P(\text{Resposta}) = \text{IF} \quad (2)$$

$$\sum \text{IF} = \text{IFT} \quad (3)$$

$$\text{IF} \cdot \text{Consequências} = \text{IR} \quad (4)$$

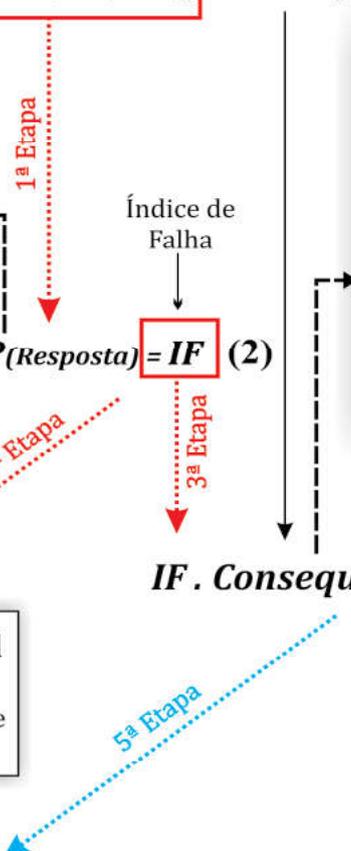
$$\sum \text{IR} = \text{IRT} = R \quad (5)$$

**IFT - Índice de Falha Total**  
Soma dos IF's dos cenários Estático, Hidrológico, Sísmico e de O&M

#### Danos Socioambientais

Este tipo de consequência não entra no cálculo. A metodologia considera somente as perdas de vidas, no entanto, este trabalho realizou a caracterização deste tipo de dano, sendo que os resultados foram apresentados separadamente e seguem os critérios estabelecidos por Valérius (2014)

**IRT - Índice de Risco Total**  
Soma dos IR's dos cenários Estático, Hidrológico, Sísmico e de O&M



# É importante a sumarização dos resultados da análise em tabelas e gráficos

## Resultados da Análise

Os resultados da análise de risco podem ser resumidos em tabelas ou gráficos que sumarizem os principais resultados:

1. Devem constar os Fatores de Carga, os Fatores de Resposta, os Índices de Falha, o Potencial de Perdas de Vidas Humanas, o Índice de Risco em todos os cenários estudados, além da população em risco (**Tabela 5**).
2. É importante comparar os IF's obtidos, assim como os IR's (**Figura 3**).
3. Outro aspecto relevante é realizar descrições detalhadas sobre os danos socioambientais, indicando a área total atingida, se afetará áreas de proteção especial (APA, AI, FLONA, Parques Nacionais, etc.), se afetará áreas urbanas (se possível indicar a área total, bairros, drenagens, sistema de asbatemento de água, telecomunicação, energia, etc.) ou rurais (comunidades, fazendas, se possível indicar a área total, porcentagem de moradias, etc.), citar impactos a fauna e a flora regionais, remoção e alteração da cobertura do solo, deposição de rejeito, alteração da calha de drenagem, entre outros (**Tabela 6**).
4. Realizar comparação entre a metodologia adotada pelo DNPM (Resolução nº 143/CNRH) e análise realizada (**Tabela 7**).

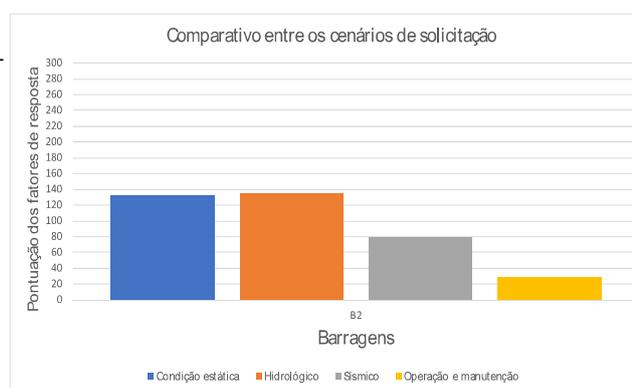


Figura 5. Comparativo dos fatores de resposta dos cenários avaliados

Tabela 5. Exemplo de resumo dos resultados da análise

Barragem	Cenários de solicitação	Fator de Carga	Fator de Resposta	Índice de Falha	Pot. de Perdas de Vidas Humanas	Índice de Risco	População em Risco
Barragem A	Condição estática	0,99	134,00	132,66	2,58	342,26	12900
	Hidrológico	0,9	150,00	135,00		348,30	
	Sísmico	0,5	158,00	79,00		203,82	
	O&M	-	29,00	29,00		74,82	
Total		-	471	375,66	-	969,20	-

# Os PAEBM são a fonte de informação sobre os Danos Socioambientais

## Resultados da Análise

Os dados para a descrição dos danos socioambientais podem ser obtidos diretamente do PAEBM, nos resultados do estudo de ruptura hipotética da barragem (*Dam Break*). Além disso, é possível realizar análises espaciais em ambiente SIG, para obtenção de informações complementares.

Tabela 6. Exemplo de descrição dos possíveis danos socioambientais

Barragem	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)	Danos possivelmente causados
Barragem A	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Área potencialmente afetada: 57,0 km<sup>2</sup>;</li><li>2. Atingimento de 3,6 km<sup>2</sup> (6%) do núcleo urbano de _____, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água e de distribuição elétrica;</li><li>3. Atingimento da borda leste da Floresta Nacional _____, afetando entre 0,1 e 0,2% da sua área total;</li><li>4. Atingimento de 4,5 km<sup>2</sup> (0,6%) da recém-criado Parque Nacional;</li><li>5. Atingimento de parte da Vila, 5 km a leste da barragem, e demais propriedades rurais a jusante, com atingimento de moradias, plantações, pastos, açudes, etc.;</li><li>6. Ruptura poderá causar danos sobre o rio e seus afluentes;</li><li>7. Atingimento pontes, estradas, rodovias e ferrovias, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas;</li><li>8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito;</li><li>9. Impactos nas instalações da mineradora.</li></ol>

# Em parte é possível fazer comparações entre os critérios de análise vigente no país e a apresentada neste documento

## Resultados da Análise

As comparações entre as metodologias podem ser realizadas em forma de tabelas. É importante ter em mente que, por analogia, é possível associar em parte a Categoria de Risco (CR) e o Dano Potencial Associado (DPA) da análise de risco estabelecida pela Resolução nº 143/CNRH, respectivamente, com Índice de Falha Total (IFT) e o Índice de Risco Total (IRT). E para efeitos comparativos é possível dividir o IFT nas classes Alta (> 666 pontos), Média (> 333 ≤ 666 pontos) e Baixa (≤ 333 pontos).

Tabela 7. Exemplo de tabela comparativa entre as metodologias

Barragem	Análise de risco utilizada no Brasil				Análise RBPS						
	CR	DPA	Classe	População	Índice de Falha Total	Índice de Risco Total	Índice Socioeconômico	Dano socioambiental	População		
Barragem A	Baixa	Alto	B	501 - 1000	375,66	Médio	969,2	4846,01	11	Extremo	12.900

# A metodologia apresentada pode ser atualizada constantemente

## Considerações Finais

A análise apresentada neste guia mostrou-se bastante interessante e viável do ponto de vista da disponibilidade de dados para a sua elaboração. Ainda assim, algumas fontes de incerteza estão bastante presentes.

Uma das incertezas está relacionada aos estudos de *Dam Break*, que são extremamente complexos e exigem de dados de alta qualidade para obtenção de resultados consistentes. Entretanto, todos os estudos de *Dam Break* avaliados foram modelados a partir de MDE's SRTM, principalmente na área urbana afetada. Este tipo de dados é incompatível com a escala da análise, podendo interferir, principalmente nos limites das áreas inundadas, consequentemente na estimativa de perdas de vida e nos danos socioambientais.

Além disso, pode ocorrer a indisponibilidade de dados importantes para a análise dos fatores de resposta obrigar a adoção de valores médios ou ainda a retirada de determinado parâmetro.

Outra incerteza preponderante é a condição de vulnerabilidade e o entendimento do risco por parte da população. Em âmbito geral as condições de governabilidade municipais, estaduais e federais que vão ditar, em parte, a resiliência nas áreas a jusante.

Ressaltasse ainda, que parâmetros podem ser adicionados, modificados ou retirados para uma melhor caracterização da barragem, desde que respeite as categorias de pontuação dos fatores de resposta.

É possível futuramente, adicionar aspectos relacionados a valoração do risco, indicando em termos monetários o custeio que as perdas e danos podem impor às esferas habitacionais, comerciais, industriais e governamentais.

## Bibliografia Consultada

To Study International Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management.

Autor: MCGRATH, S.

Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/churchillreport.pdf>>

A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office, n. September, p. 43, 1999

Autor: GRAHAM, W.

Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/TechDev/DSOTechDev/DSO-99-06.pdf>>

Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams.

Autor: HARRALD, J. R.

Disponível em: <[http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/USACE\\_ICDRM\\_RepApr29.pdf](http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/USACE_ICDRM_RepApr29.pdf)>.

Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2014.

Autor: VALERIUS, M. B.

Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/245-2014.pdf>>

Risk Management - Best Practices and Risk Methodology: Chapter I-6, Subjective Probability and Expert Elicitation.

Autor: U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation (USBR).

Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/I-6-20150608.pdf>>.

The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures

Autores: BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M.

Disponível em: <[https://www.earthworksaction.org/files/pubs-others/BowkerChambers-RiskPublicLiability\\_EconomicsOfTailingsStorageFacility Failures-23Jul15.pdf](https://www.earthworksaction.org/files/pubs-others/BowkerChambers-RiskPublicLiability_EconomicsOfTailingsStorageFacility Failures-23Jul15.pdf)>

Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials, v. 152, n. 2, p. 846–852, 2008.

Autores: RICO, M. et al.

Environmental Impacts of Mining Operations A Case Study: Monitoring the Impacts at Abu Tartour Phosphate Mine, Egypt. v. 1, n. 4, p. 1–6, 2011

Autores: AHMED & TAHLAWI.

Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/257351613\\_Environmental\\_Impacts\\_of\\_Mining\\_Operations\\_a\\_Case\\_Study\\_Monitoring\\_the\\_Impacts\\_of\\_Abu\\_Tartour\\_Phosphate\\_Mine\\_Egypt](https://www.researchgate.net/publication/257351613_Environmental_Impacts_of_Mining_Operations_a_Case_Study_Monitoring_the_Impacts_of_Abu_Tartour_Phosphate_Mine_Egypt)>

Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry, v. 51, p. 229–245, 2014.

Autores: KOSSOFF, D. et al.

## Anexos

**Tabela de Pontuação dos fatores de carga do Cenário de Condição Estática**

Categorias	Probabilidade atribuída		Pontuações	
	Perigoso		Individual	Total
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga		Único ponto, de montante para jusante	50	50
		Único ponto, de jusante para montante	40	
		Descarga em vários pontos, de jusante para montante	20	
		De jusante para montante com <i>spray-bars</i>	10	
		De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	8	
Proteção do talude de jusante		Não existe	10	10
		Vegetação	5	
		Rip rap	3	
		Outra (considerar eficiência)	1 a 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude		Não existe monitoramento	60	60
		Existe monitoramento	15	
		Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Fator de segurança de operação		< 1,3	50	50
		≥ 1,3 < 1,5	35	
		≥ 1,5	10	
Volume armazenado		≤ 500 mil m <sup>3</sup>	2	10
		> 500 mil ≤ 5 milhões m <sup>3</sup>	4	
		> 5 milhões m <sup>3</sup> ≤ 25 milhões m <sup>3</sup>	6	
		> 25 milhões m <sup>3</sup> ≤ 50 milhões m <sup>3</sup>	8	
		> 50 milhões m <sup>3</sup>	10	
Verificação da água infiltrada no talude		Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	50	50
		Vazamento lamacento	45	
		Vazamento límpido, aumentando gradualmente	30	
		Vazamento límpido e estável	20	
		Pequeno vazamento	15	
Sistema de drenagem superficial		Nenhum	20	20
		Em más condições	10	
		Em boas condições	5	
Sistema de drenagem interna		Nenhum	40	40
		Tapete drenante	30	
		Dreno de Pé	20	
		Poços de Alívio	15	
		Em parte dos alteamentos	10	
		Em todos os alteamentos	5	
		Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
		Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	39	
Problemas verificados no corpo da barragem		Trincas	4	10
		Deterioração dos taludes	2	
		Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	2	
		Erosão no talude de jusante	2	
		Outros problemas (considerar a gravidade)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

**Tabela de Pontuação dos fatores de carga do Cenário Hidrológico**

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Total
Vazão de projeto dos vertedores	10000 anos	5	55
	1000 anos	20	
	500 anos	40	
	< 500 anos ou desconhecido	55	
Sistema alternativo de descarga das vazões	Bombeamento	15	30
	Outro (considerar eficiência)	1 até 29	
Sistema de drenagem superficial	Nenhum	30	20
	Nenhum	20	
	Em más condições	10	
Sistema de drenagem interna	Em boas condições	5	40
	Nenhum	40	
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	39	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	35	35
	Único ponto, de jusante para montante	25	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	15	
	De jusante para montante com spray-bars	5	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonação	3	
Proteção do talude de jusante	Não existe	10	10
	Vegetação	5	
	Rip-rap	3	
	Outra (considerar eficiência)	1 até 9	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	30	30
	Existe monitoramento	15	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	5	
Configuração do depósito	Em vale	10	10
	Em fundo de vale	8	
	Em meia encosta	6	
	Em dique fechado	4	
Fator de segurança para falha no sistema de drenagem	< 1,3	50	50
	$\geq 1,3 < 1,5$	40	
	$\geq 1,5$	20	
	Não avaliado	35	
Volume armazenado	$\leq 500$ mil m <sup>3</sup>	2	10
	$> 500$ mil $\leq 5$ milhões m <sup>3</sup>	4	
	$> 5$ milhões m <sup>3</sup> $\leq 25$ milhões m <sup>3</sup>	6	
	$> 25$ milhões m <sup>3</sup> $\leq 50$ milhões m <sup>3</sup>	8	
Área do reservatório	$> 50$ milhões m <sup>3</sup>	10	10
	0,5 a 1 km <sup>2</sup>	4	
	1 a 1,5 km <sup>2</sup>	6	
	1,5 a 2 km <sup>2</sup>	8	
	$> 2$ km <sup>2</sup>	10	

**Tabela de Pontuação dos fatores de carga do Cenário Sísmico**

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Nível de vibração causado pelo plano de fogo	Alto	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
	Não realiza monitoramento	10	
Sismicidade da região (casos históricos)	Desconhecido	20	20
	Médio	10	
	Baixo	5	
Problemas verificados no corpo da barragem	Trincas	15	30
	Deterioração dos taludes	5	
	Vazamento em tubulação de equipamento de descarga	5	
	Erosão no talude de jusante	5	
	Outros problemas (considerar a gravidade)	$\Sigma$ de todos os problemas não pode ser maior que 30	
Fator de segurança para eventos sísmicos	< 1,3	80	80
	$\geq 1,3 < 1,5$	70	
	$\geq 1,5$	10	
	Não avaliado	50	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de montante para jusante	60	60
	Único ponto, de jusante para montante	50	
	Descarga em vários pontos, de jusante para montante	35	
	De jusante para montante com spray-bars	15	
	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	10	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	Não existe monitoramento	45	45
	Existe monitoramento	20	
	Existe monitoramento com níveis de alerta	8	
Sistema de drenagem interna	Nenhum	35	35
	Tapete drenante	30	
	Dreno de Pé	20	
	Poços de Alívio	15	
	Em parte dos alteamentos	10	
	Em todos os alteamentos	5	
	Conjunto de Equipamentos drenantes	3	
	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	34	
Existência de estradas e/ou ferrovias próximas	Sim	10	10
	Não	3	

**Tabela de Pontuação dos fatores de carga do cenário de Operação e Manutenção (O&M)**

Categoria	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Total
Plano de ação emergencial	Não possui (Quando obrigatório)	40	40
	Não possui (Não obrigatório)	20	
	Possui – avaliar abrangência/qualidade dos dados e determinar pontuação	1 a 39	
Documentação de projeto	Projeto executivo e “como construído” 5	5	20
	Projeto executivo ou “como construído” 10	10	
	Projeto básico 15	15	
	Não há projeto 20	20	
Manuais e procedimentos para inspeção de segurança	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação	2	10
	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento	5	
	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção	10	
Cópias dos PAE’s entregues aos órgãos competentes	Sim	2	5
	Não	5	
Relatórios de inspeção e Análise de Segurança	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de análise de segurança	2	15
	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança	5	
	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento	10	
	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual	15	
Infrações cometidas	Multa aplicada nos últimos 10 anos	10	10
	Advertência aplicada nos últimos 5 anos	2	
	Outro tipo de infração (considerar relevância)	$\sum$ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

