

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)

ANALYSIS OF THE POTENTIAL RISK OF DAM BREAK IN TAILINGS DAM IN STATE OF PARÁ USING THE RISK-BASED PROFILING SYSTEM METHODOLOGY (RBPS)

RAIMUNDO ALMIR COSTA DA CONCEIÇÃO

Geólogo, Serviço Geológico do Brasil; Programa de Pós-Graduação em Gestão e Riscos e Desastres na Amazônia (PPGGRD), Universidade Federal do Pará (UFPA)
E-mail: almircosta@ufpa.br; raimundo.conceicao@cprm.gov.br

DR^a. ALINE MARIA MEIGUINS DE LIMA

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Riscos e Desastres na Amazônia (PPGGRD),
Universidade Federal do Pará (UFPA)
E-mail: ameiguins@ufpa.br

RESUMO ABSTRACT

Os desastres socioambientais graves e muito graves relacionados ao rompimento em 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. 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

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. 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

de componentes socioambientais, definida então com 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 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.

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 foi de 100 milhões para 3 bilhões de toneladas. Neste mesmo período, a produção de bauxita foi de pouco mais de 1 milhão para 250 milhões de toneladas (IBRAM 2014).

A extração dos recursos minerais resulta na produção simultânea de um volume significativo de material residual, incluindo rejeitos (Kossoff et al. 2014). Sua quantidade global de aproximadamente 18 bilhões de m³ por ano é equivalente a da 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 (Forstner 1999).

Quando examinados os 100 anos (1910-2010) de falhas em barragens de armazenamentos de rejeito no mundo, os dados mostram 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 produzidos, representando um desafio cada vez maior para o gerenciamento de resíduos de mina (Bowker & Chambers 2015).

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.

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 falhas “Graves” e “Muito Graves” registradas de 1940 a 2010 ocorreram a partir de 1990; dos 52 incidentes registrados, 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”, ou seja, falhas catastróficas que liberaram mais de 1 milhão de metros cúbicos de rejeitos e, em alguns casos, resultaram em múltiplas perdas de vida (Bowker & Chambers 2015). 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 no mundo, cerca de 3.500, a taxa de falha é de uma em 700 ou uma em 1.750. Essa é uma taxa considerada muito alta, principalmente se comparada às falhas em barragens de água, que é aproximadamente uma em 10.000 (Davies 2001).

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, município de Mariana, Minas Gerais, onde 43 milhões de m³ 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). Ou os danos causados pelo rompimento da barragem de rejeitos Aznalcóllar, 45 km a oeste de Sevilha, Espanha, que inundou aproximadamente 4600

hectares de terra ao longo dos rios Agrio e Guadamar, com aproximadamente 5,5 milhões de m³ de água ácida e 1,3 milhões de m³ de rejeitos de metal pesado (Hudson-Edwards et al. 2003). Neste contexto, foram adaptadas várias ferramentas de análise de risco para rompimento de barragens. Segundo McGrath (2000), essas análises foram criadas para aplicações nas indústrias de petróleo, química, nuclear e offshore com o objetivo de estimar probabilidades de falha em componentes ou sistemas e a magnitude das consequências resultantes, com a finalidade auxiliar na tomada de decisões em segurança. Colle (2008) afirma que atualmente são utilizadas por diversos países como Estados Unidos, Canadá, Noruega, França, Países Baixos, Suécia, Austrália, Portugal, Brasil, entre outros, para a análise de risco de rompimento de barragens.

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 metodologia de análise de risco oficial para barragens de mineração e foi estabelecida pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) através da Portaria nº 143/CNRH. É utilizada atualmente pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) em barragens que estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010).

Este método 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.) que possam influenciar na possibilidade da ocorrência de acidente. E quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) que é o dano que poderá ser causado à jusante pelo mau funcionamento da barragem (existência de população a jusante, impacto ambiental e socioeconômico) (CNRH, 2012).

A metodologia estabelecida 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. Um exemplo da falta de detalhamento na metodologia do CNRH pode ser observado no trabalho

de 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, entretanto, ambas estão enquadradas na mesma classificação de risco do CNRH (Risco Baixo, DPA Alto, Classe C).

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.

O objetivo do presente estudo é aplicar a análise RBPS a seis barragens de mineração do estado do Pará, que estão enquadradas nas condições estabelecidas na Política Nacional de Segurança de Barragens (Brasil 2010) e comparar os resultados com a metodologia de análise 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 de risco por parte do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), no âmbito do Acordo de Cooperação Técnica com o DNPM, que possibilita uma abordagem diferenciada do SGB/CPRM na elaboração de análises de risco de impacto a jusante das barragens (MME, 2016).

Ressalta-se que as análises qualitativas tem seu cerne na subjetividade, o que não deve ser motivo de desmerecimento, tendo em vista que o julgamento perceptivo tem estado presente em diversas abordagens tradicionais da engenharia e segurança de barragens, cujo o sucesso é indiscutível (Baptista 2008).

2 ÁREA DE ESTUDO

A análise foi realizada em seis barragens de mineração do estado do Pará (**Figura 1**). As principais características das barragens analisadas (**Tabela 1**) 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.

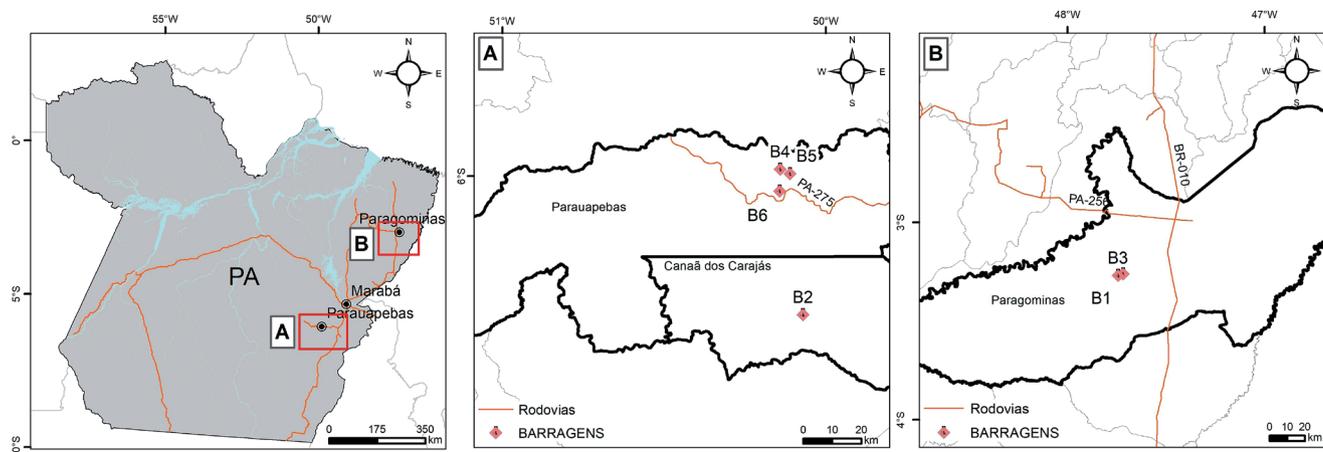


Figura 1. Localização das barragens em estudo.

Tabela 1. Principais características das barragens analisadas. Fonte: (VALE 2016a; VALE 2016b; VALE 2016c; VALE 2016d; HYDRO 2017a; HYDRO 2017b).

NOME	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Finalidade	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
Cota da Crista	de 142,3 m a 149,30 m	251,9 m	89,00 m	217,4 m	218,0 m	320,0 m
NA Normal	146,0 m	245,96	87,00 m	214,0 m	214,50 m	316,0 m
Altura da Barragem	13,5 m	42,10 m	34,00 m	34,0 m	24 m	45,0 m
Volume do Reservatório	3,58 M m ³	154 M m ³	68,34 M m ³	136,86 M m ³	8,14 M m ³	5,6 M m ³
Tipo de Seção	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
Cheia de Projeto	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar	Decamilenar

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparo dos dados

Os dados utilizados para a análise de risco (Tabela 2) são provenientes de Planos de Ação Emergencial para Barragens de Mineração (PAEBM), em formato impresso ou digital, das respectivas barragens avaliadas. Estes planos foram gentilmente 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 SIGBM (Sistema de Informação Geográfica de Barragens de Mineração) do Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM/DNPM) foi outra fonte de dados consultada, principalmente

para obtenção de informações específicas de cada barragem analisada, como o método construtivo, estado de conservação e condições dos projetos de construção, dados constantes na Declaração de Condição de Estabilidade.

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.

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 online (*BaseMap*) do software ArcGis 10.2. 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, através 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 rom-

pimento hipotético das barragens ("*Dam Break*"). Esses cenários são elaborados através de modelagens hidrológicas de escoamento bidimensional, utilizando dados topográficos (de diversas fontes, desde perfilhamento a laser a modelos digitais 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 ruptura: i) Cota atual ruptura hipotética da barragem por instabilização do maciço pela ombreira direita; ii) Cota final ruptura hipotética da barragem por instabilização do maciço pela ombreira direita; iii) Simulação das vazões naturais com tempo de retorno de 100 anos, sem ruptura da barragem; iv) Cota atual ruptura hipotética da barragem por "*overtopping*" (galgamento) pela ombreira esquerda e; v) Cota final ruptura hipotética da barragem por "*overtopping*" pela ombreira esquerda. 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 3**).

Tabela 2. Dados utilizados no estudo de análise de barragens

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

As etapas envolvidas na análise de risco através da aplicação da metodologia RBPS foram adotadas da seguinte maneira: i) obtenção dos PAEBM's e avaliação dos dados de interesse; ii) para 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 2000, projeção UTM 22

Tabela 3. Cenários 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 “overtopping” 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 “piping” ¹ 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

S; iii) 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; iv) qualificação dos fatores de resposta e obtenção dos pesos de cada característica associada para posterior soma dos pesos e obtenção do Índice de Falha; v) cálculo do Potencial de Perdas de Vidas Humanas; vi) cálculo do Índice de Risco e; vii) cálculo do Índice Socioeconômico.

3.2 Metodologia de análise “Risk-Based Profiling System” (RBPS)¹

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, P é a probabilidade estimada

para a ocorrência do cenário; P_c é a probabilidade de ocorrência de falha na barragem, caso ocorra um dos cenários (Harrald 2006):

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

$P_{(carga)}$, 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 2006). A multiplicação do fator de resposta pelo fator de carga resulta no Índice de Falha (IF) da barragem e representa o primeiro termo da equação (1).

Os IF's possuem um valor máximo para cada cenário (Tabela 4), e quando somados podem atingir o valor de 1.000 pontos, o que representa o Índice de Falha Total (IFT) da barragem. 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

¹ “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 (Mattson et al. 2008).

abordam as condições e a estrutura da barragem (Harrald 2006).

Tabela 4. Valores de pontuação atribuídos a cada cenário de solicitação na metodologia RBPS. Baseado em Harrald (2006).

Cenário	Pontuação
Estático	300
Hidrológico	300
Sísmico	300
Operação e manutenção	100
Total	1.000

O segundo termo da equação (1) é a estimativa das 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 severidade (Graham 1999). O Potencial de Perdas de Vida Humanas é multiplicado pelo IF, para obtenção do Índice de Risco (IR) da barra-

gem. E após ser calculado para cada cenário é somado para se obter o Índice de Risco Total (IRT), que representa o risco que determinada barragem exerce sobre a população a jusante (Valerius 2014). Seguido do cálculo do IR é calculado também o Índice Socioeconômico, que resulta em um índice de risco bruto, pois é calculado pela multiplicação direta do índice de falha com a população em risco e posterior divisão por 1000. Este fator não representa diretamente o número de mortes, mas considera toda a área afetada por uma possível falha (Escuder et al. 2007).

Um resumo da metodologia pode ser visto na **Figura 2**. A seguir, os fatores de carga, os fatores de resposta e as consequências serão mais bem 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.

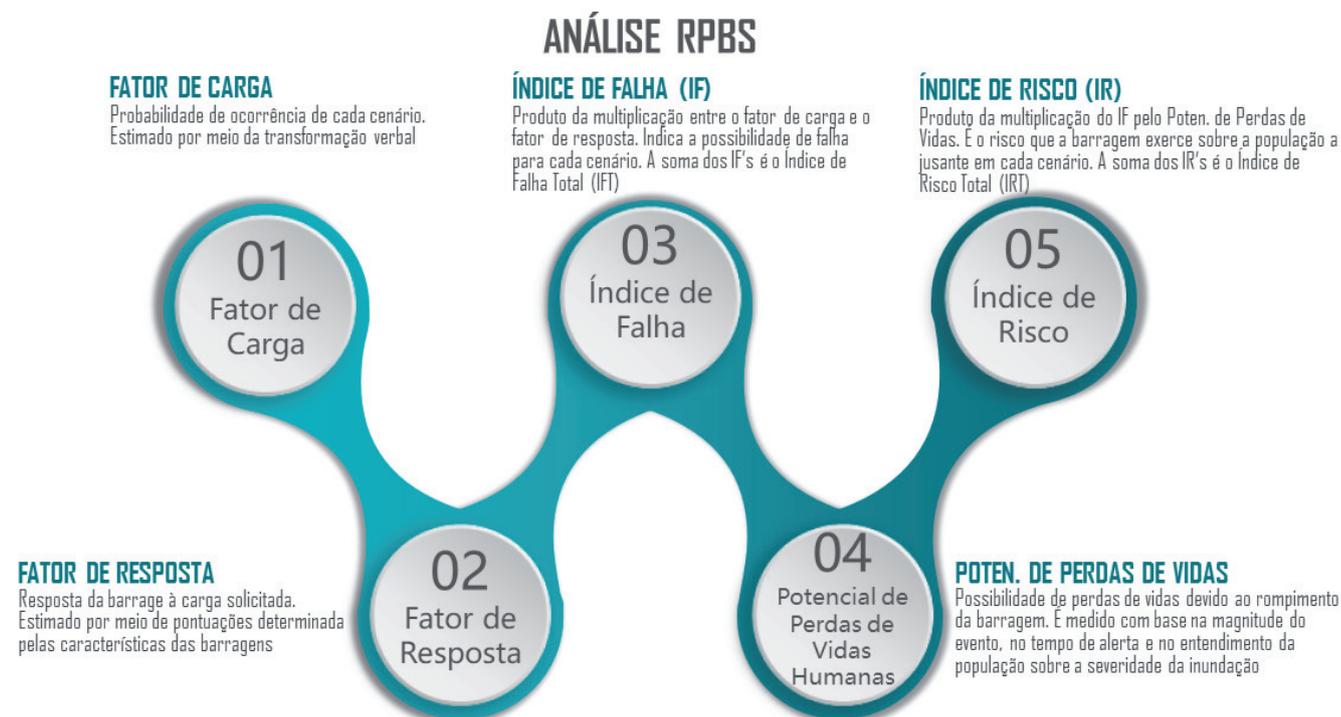


Figura 2. Fluxograma resumindo os passos da metodologia RBPS. Modificado de Valerius (2014).

3.3 Caracterização dos fatores de carga

Os fatores de carga foram estimados através de probabilidade subjetiva, isto é, o valor numérico ou a faixa de valores (**Tabela 5**) 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 (Baptista 2008, USBR 2015). 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, 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 6**.

Tabela 5. Probabilidades adotadas, através da técnica de transformação verbal (USBR 2015)

Descritor	Probabilidade atribuída
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 6. Fatores de carga utilizados para todas as barragens. Adaptado de Valerius (2014)

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

3.4 Caracterização dos fatores de resposta para os cenários de solicitação

Dada a concretização de um cenário, os fatores de resposta (**Tabelas 7, 8, 9 e 10**) são as características das barragens que mais influenciaram na probabilidade de ocorrência de uma falha na barragem, ou seja, as respostas da barragem ao cenário imposto, são enquadradas em um limiar de pontuação de define uma maior ou menor predisposição a efeitos adversos (Valerius 2014).

A maioria dos incidentes em barragens ocorrem 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 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 (Rico et al. 2008 from which 26 located in Europe, was compiled in a database. This contains six sections, including dam location, its physical and constructive characteristics, actual and putative failure cause, sludge hydrodynamics, socio-economical consequences and environmental impacts. Europe ranks in second place in reported accidents (18%).

Tabela 7. 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	Abaixo 1,3	50	50
	De 1,3 a 1,5	35	
	Acima de 1,5	10	
Volume armazenado	Abaixo de 500 mil m ³	2	10
	De 500 mil a 5 milhões m ³	4	
	De 5 milhões m ³ a 25 milhões m ³	6	
	De 25 milhões m ³ a 50 milhões m ³	8	
	Acima de 50 milhões m ³	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)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

Tabela 8. Pontuação para os fatores de resposta do cenário hidrológico.

Categorias	Probabilidade atribuída	Pontuações	
		Individual	Máxima
Vazão de projeto dos vertedores	10.000 anos	5	55
	1.000 anos	20	
	500 anos	40	
	Menos de 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	
	Em boas condições	5	
	Nenhum	40	
	Tapete drenante	30	
Sistema de drenagem interna	Dreno de Pé	20	40
	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	
	Único ponto, de montante para jusante	35	
Posição do lançamento de rejeitos e tipo de descarga	Único ponto, de jusante para montante	25	35
	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	
	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	Abaixo de 1,3	50	50
	De 1,3 a 1,5	40	
	Acima de 1,5	20	
	Não avaliado	35	
Volume armazenado	Abaixo de 500 mil m ³	2	10
	De 500 mil a 5 milhões m ³	4	
	De 5 milhões m ³ a 25 milhões m ³	6	
	De 25 milhões m ³ a 50 milhões m ³	8	
	Acima de 50 milhões m ³	10	
Área do reservatório	0,5 a 1 km ²	4	10
	1 a 1,5 km ²	6	
	1,5 a 2 km ²	8	
	Acima de 2 km ²	10	

Tabela 9. Pontuação para os fatores de resposta 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)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 30	
Fator de segurança para eventos sísmicos	Abaixo de 1,3	80	80
	De 1,3 a 1,5	70	
	Acima de 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	
Monitoramento da linha piezométrica do talude	De jusante para montante em vários pontos e com ciclonagem	10	45
	Não existe monitoramento	45	
	Existe monitoramento	20	
Sistema de drenagem interna	Existe monitoramento com níveis de alerta	8	35
	Nenhum	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		
Existência de estradas e/ou ferrovias próximas	Outro tipo de drenagem (considerar eficiência)	34	10
	Sim	10	
	Não	3	

Tabela 10. 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
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)	Σ de todos os problemas não pode ser maior que 10	

A pontuação dos fatores de resposta para cada cenário que será utilizada foi elaborada por Valerius (2014), com base em dados históricos, consulta a artigos e nos dados disponíveis. Para este estudo, foram retirados e adicionados alguns fatores de pontuação para melhor caracterização dos cenários.

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 moni-

toramento 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.

3.5 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) an extensive evaluation of dam failures and the factors that contributed to loss of life was conducted.

Every U.S. dam failure that resulted in more than 50 fatalities and every dam failure that occurred after 1960 resulting in any fatalities was investigated with regard to warning, population at risk (PAR. Segundo o autor, o procedimento pode ser dividido em sete etapas: i) determinar os cenários de falha da barragem; ii) determinar as categorias de tempo para as quais estimativas de perda de vida são necessárias; iii) determinar quando os avisos de falha de barragens foram iniciados; iv) determinar a área inundada para cada cenário de falha; v) estimar o número de pessoas em risco para cada cenário de falha e categoria de tempo; vi) aplicar equações baseadas empiricamente ou método para estimar fatalidades; vii) avaliar as incertezas.

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 multiplicação do número de unidades residências dentro das áreas inundáveis 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).

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 11**).

Este método foi desenvolvido usando um conjunto de dados ampliado que totalizou aproximadamente 40 inundações, muitas das quais causadas por falhas de barragens, todas as falhas nas represas dos EUA 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)

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, indicam 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 11. Taxa de fatalidade derivada de estudos de caso (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	0,03 a 0,35
	15 a 60	Vago	0,04	0,01 a 0,08
		Preciso	0,02	0,005 a 0,04
	Acima de 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
	De 15 a 60	Vago	0,007	0,0 a 0,015
		Preciso	0,002	0,0 a 0,004
	Acima de 60	Vago	0,003	0,0 a 0,0006
Preciso		0,0002	0,0 a 0,0004	

3.6 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 quilô-

metros 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, conforme a **Tabela 12**.

Tabela 12. 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

Segundo as características dos rejeitos eles foram classificados com 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) \sum maior do que 6: Dano extremo; ii) \sum de 4 a 6: Dano muito alto; iii) \sum de 2 a 4: Dano alto; iv) \sum menor do que 2: Dano considerável (Valerius 2014).

4 RESULTADOS

4.1 Análise do Índice de Falha (IFT), do Índice de Risco Total (IRT) e do Potencial de Perdas de Vidas

Entre as seis barragens analisadas (Tabela 13), uma apresentou Índice de Falha Total (IFT) considerado baixo (B5: 329,47) e cinco com IFT considerado médio (B2: 375,66; B4: 341,22; B6:335,64; B3: 455,18; B1: 428,63).

Tabela 13. 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	Índice socioeco-nômico
B1	Condição estática	0,99	147,00	145,53	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hidrológico	0,90	169,00	152,10		0,00		0,00
	Sísmico	0,50	208,00	104,00		0,00		0,00
	Operação e manutenção	-	27,00	27,00		0,00		0,00
	Total			551,00		428,63		0,00
B2	Condição estática	0,99	134,00	132,66	2,58	342,26	12900,00	1711,31
	Hidrológico	0,90	150,00	135,00		348,30		1741,50
	Sísmico	0,50	158,00	79,00		203,82		1019,10
	Operação e manutenção	-	29,00	29,00		74,82		374,10
	Total			471,00		375,66		969,20
B3	Condição estática	0,99	162,00	160,38	0,01	2,10	66,00	10,52
	Hidrológico	0,90	182,00	163,80		2,15		10,75
	Sísmico	0,50	208,00	104,00		1,36		6,82
	Operação e manutenção	-	27,00	27,00		0,35		1,77
	Total			579,00		455,18		5,97
B4	Condição estática	0,99	118,00	116,82	1,16	135,51	5818,00	679,66
	Hidrológico	0,90	131,00	117,90		136,76		685,94
	Sísmico	0,50	151,00	75,50		87,58		439,26
	Operação e manutenção	-	31,00	31,00		35,96		180,36
	Total			431,00		341,22		395,82
B5	Condição estática	0,99	113	111,87	0,02	2,24	86,00	9,62
	Hidrológico	0,90	129,00	116,10		2,32		9,98
	Sísmico	0,50	151,00	75,50		1,51		6,49
	Operação e manutenção	-	26,00	26,00		0,52		2,24
	Total			419,00		329,47		6,59
B6	Condição estática	0,99	116,00	114,84	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hidrológico	0,90	127,00	114,30		0,00		0,00
	Sísmico	0,50	151,00	75,50		0,00		0,00
	Operação e manutenção	-	31,00	31,00		0,00		0,00
	Total			425,00		335,64		0,00

As duas barragens com IFT mais elevado, apresentaram valores relativamente altos no cenário de condição estática (onde não há influências externas), pois na barragem B3 não existe proteção do talude de jusante e não há sistema de drenagem superficial, conforme consta no SIGBM. 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 do B2 foi a de maior destaque (969,20 pontos), 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) an extensive evaluation of dam failures and the factors that contributed to loss of life was conducted. Every U.S. dam failure that resulted in more than 50 fatalities and every dam failure that occurred after 1960 resulting in any fatalities was investigated with regard to warning, population at risk (PAR, 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 km² contra 57 km²), 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.

4.2 Análise dos cenários de solicitação

Na avaliação dos cenários de solicitação (**Figura 3**), as barragens B3 e B1, foram as que apresentaram maiores pontuações no cenário de condição estática (160,38 e 145,53 pontos, respectivamente) e no cenário hidrológico (163,80 e 152,10 pontos, respectivamente). Esses valores foram principalmente influenciados pela constatação da presença de trincas no talude de ambas as barragens, ausência de drenagem superficial na B3 (de acordo com dados do SIGBM), a falta dessa informação para a B1 e pela ausência de informação sobre o tipo de drenagem interna em ambas as barragens, tanto nos PAEBM's quanto no SIGBM. A presença de trincas também influenciou no aumento da pontuação para o cenário sísmico (104,00 pontos em ambas), cenários este que prioriza condições como a sismicidade natural da região ou a sismicidade induzida, como as causadas pelos planos de fogo ou deslocamento de caminhões pesados.

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 PAEBM'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*"), apresen-

taram 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 o DSG (2016), essa re-

solução 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 et al. 1980; Morris 2009; ANA 2015; USACE 2016).

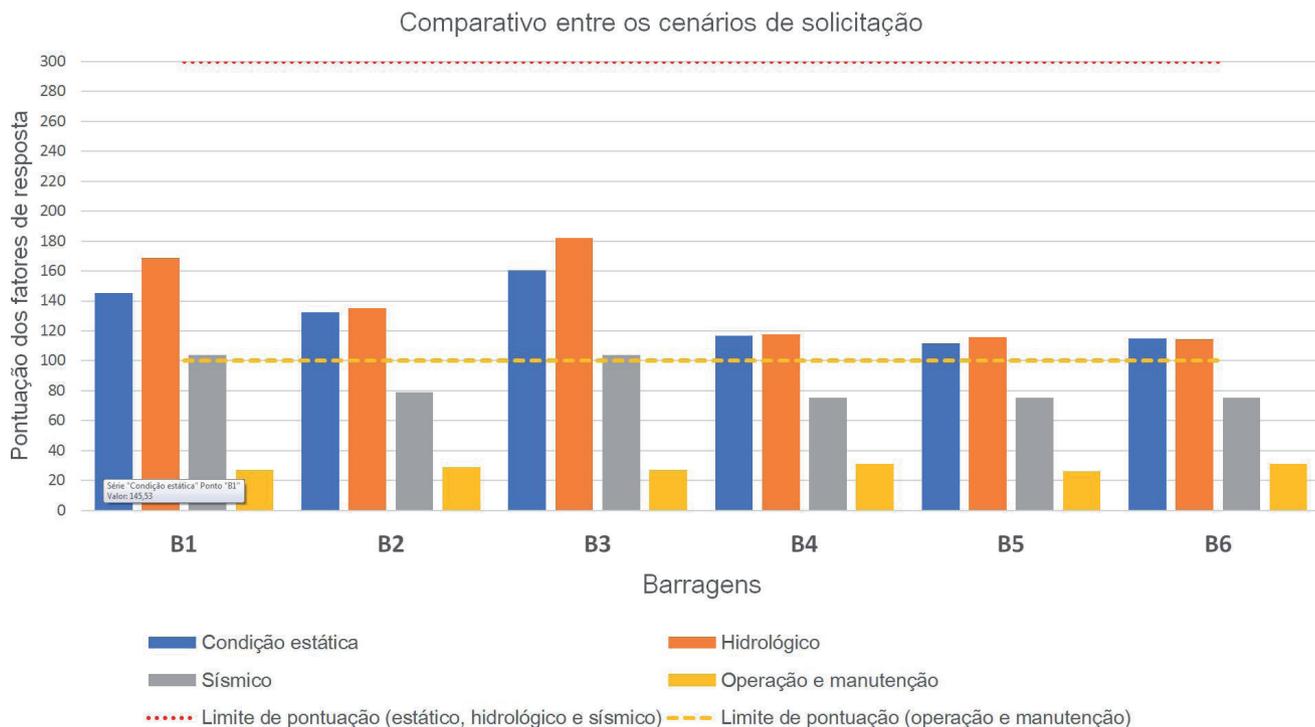


Figura 3. Gráfico comparativo entre os fatores de resposta para os cenários de solicitação das barragens

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 14** 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 et al. 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 et al. 1999).

Tabela 14. Resultado da análise de risco socioambiental caracterizando a área potencialmente atingida a jusante

Barragem	Propriedade dos rejeitos armazenados (NBR 10004 – ABNT, 2004)	Danos possivelmente causados	Classificação
B1	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 3,3 km² 2. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o igarapé Potiritá e seus afluentes; 3. Atingimento pontes, estradas, mineroduto e linhas de transmissão; 4. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 5. Impactos nas instalações da mineradora. 	5 Muito alto
B2	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 57,0 km² 2. Atingimento de 3,6 km² (6%) do núcleo urbano de Parauapebas, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água e de distribuição elétrica; 3. Atingimento da borda leste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,1 e 0,2% da sua área total; 4. Atingimento de 4,5 km² (0,6%) da recém-criado Parque Nacional dos Campos Ferruginosos (Decreto s/nº de 5 de junho de 2017); 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.; 6. Ruptura poderá causar danos sobre o rio Parauapebas e seus afluentes; 7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas. 8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 9. Impactos nas instalações da mineradora. 	11 Extremo
B3	Não inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 25,0 km² 2. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc; 3. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parariquara e seus afluentes; 4. Atingimento pontes, estradas, mineroduto e linhas de transmissão; 5. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 10. Impactos nas instalações da mineradora. 	7 Extremo
B4	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 101,0 km² 2. Atingimento de 2,5 km² (4%) do núcleo urbano de Parauapebas, afetando possivelmente o sistema de abastecimento de água. 3. Atingimento da porção nordeste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,06 e 0,07% da sua área total; 4. Atingimento do limite norte da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, afetando aproximadamente 12,7 km² (5,45%) de área; 5. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc; 6. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parauapebas, ao igarapé Gelado e seus afluentes; 7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas. 8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 9. Impactos nas instalações da mineradora. 	6 Extremo
B5	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 40,0 km² 2. Atingimento de menos de 0,5% do núcleo urbano de Parauapebas, especificamente na confluência entre o igarapé Gelado e o rio Parauapebas; 3. Atingimento da porção nordeste da Floresta Nacional de Carajás, afetando entre 0,06 e 0,07% da sua área total; 4. Atingimento do limite norte da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado, afetando aproximadamente 3,36 km² (1,44%) de área; 5. Atingimento de propriedades rurais a jusante, com danos a moradias, plantações, pastos, açudes, etc; 6. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) sobre o rio Parauapebas, ao igarapé Gelado e seus afluentes; 7. Atingimento pontes, estradas, rodovia PA-160 e ferrovia Estrada de Ferro Carajás, ambas em trechos localizados a norte de cidade de Parauapebas. 8. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 9. Impactos nas instalações da mineradora. 	6 Extremo
B6	Inerte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Área potencialmente afetada: 1,0 km² 2. Atingimento de 0,02% da área da Floresta Nacional de Carajás 3. Ruptura poderá causar danos (assoreamento, alteração da calha, etc.) ao igarapé Geladinho; 4. Interrupção da Estrada de Ferro Carajás, nas proximidades da barragem 5. Destruição do <i>habitat</i> de espécies animais, vegetais e da biota aquática, remoção da cobertura do solo e deposição de rejeito; 6. Impactos nas instalações da mineradora. 	2 Alto

4.4 Comparação entre a análise RBPS e a análise de risco utilizada no Brasil para barragens de mineração

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 15**), notando-se que houveram semelhanças nas classificações. Porém, enquanto a análise RBPS, categorizou as barragens B1, B2, B3, B4 e B6 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 4**, foram divididos em: i) baixo: ≤ 333 ; ii) $333 < \text{médio} \leq 666$; 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 análise oficial, para a metodologia 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 baixa 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 indicam 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 1.000 pessoas.

Tabela 15. 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	População em risco		
B1	Baixa	Alto	B	0 - 100*	428,63	Médio	0	0	5	Muito alto	0
B2	Baixa	Alto	B	501 - 1.000	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 - 1.000	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

* No SIGBM não consta o limiar de população atingida, mas informa que não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante.

5 CONCLUSÃO

A análise RPBS é, em termos práticos, um instrumento qualitativo de tomadas de decisões baseada no risco. A sua aplicação em barragens de rejeito de mineração do estado do Pará mostrou-se

com 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 a 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 (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 receberá 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.

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

Metodologicamente, 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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) por disponibilizar dados digitais do Plano de Ação Emergencial da Barragem do Sossego. 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.

REFERENCIAS

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

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.

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. 3rd Internacional workshop advances in cleaner production, p. 10, 2011.

Baptista, M. DE L. P. Abordagens de risco em barragens de aterro. [s.l.] Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

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

BRASIL. 2010. 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, 181:1-2.

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.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. 2012. 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>. Acessado em 31 mar 2017.

Colle G.A. 2008. Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 124 p.

Cunge J.A., Holly J.F.M., Verwey A. 1980. Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman Edition, Boston.

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

DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO. Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército, 2. 195pp.

Escuder I., Membrillera M. G., Moreno P., Pérez O., Ardiles I., Jenaro E. 2007 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, Territorio y Medio Ambiente, Sevilha, Espanha, p. 15.
- Forstner, U. Introduction. In: Azcue J.M. (eds) Environmental Impacts of Mining Activities. Berlin, Heidelberg: Environmental Science, Springer, 1999.
- 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. XIV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, p. 1-22, 2004.
- Graham W. 1999. A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office, set, 43pp.
- Harrald J.R. 2004. Review of risk based prioritization/decision making methodologies for dams. U.S. Army Crpos for Engineers, Washington DC, 29. Disponível em: <http://www.gwu.edu/~icdrm/publications/USACE_ICDRM_RepApr29.pdf>. Acessado em 30 jun 2017.
- Hind, A. R.; Bhargava, S. K.; Grocott, 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. A. et al. The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Ríos Agrio-Guadiamar, Aznalcóllar, Spain. Applied Geochemistry, v. 18, n. 2, p. 221-239, fev. 2003.
- HYDRO. 2017a. Plano de ações emergenciais de barragens de mineração - PAEBM: Sistema de disposição de rejeitos área do Vale (B3). 99pp.
- HYDRO. 2017b. Plano de ações emergenciais de barragens de mineração - PAEBM: Sistema de disposição de rejeitos área do Patlô 1 (RP-1). 99pp.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. Censo Demográfico. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acessado em 25 mai 2016.
- IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MUSEUS. 2014. Perspectivas da Mineração no Mundo e no Brasil. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 76pp.
- Kossoff, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry, v. 51, p. 229-245, 2014.
- Mattson H., Hellström J.G.I., Lundström T.S. 2008. On Internal Erosion in Embankment Dams: a literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically. Research Report. 52pp.
- Mcgrath S. 2000. To Study International Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/churchillreport.pdf>>. Acessado em 14 mai 2017.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 2016. Acordo de Cooperação Técnica n° 001/2016. Ministério de Minas e Energia, Serviço Geológico do Brasil, Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Projeto Segurança de Barragens de Mineração. 5pp.
- Monte-Mor, R. C. A. Mapeamento de áreas inundáveis associadas à ruptura de barragens - Estudo de caso: Barragem de Ninho da Águia - MG. Belo: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004
- Morris M., Hassan M., Kortenhuis A., Visser P.J. 2009. Breaching Processes: A state of the art review. Floodsite Project Report, 5, 2:1-70.
- Rico, M. et al. 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.

USACE - US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2016. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Hydrologic Engineering Center (HEC), fev, 960pp.

USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. 2015. Subjective Probability and Expert Risk Management. In: USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. Risk Management - Best Practices and Risk Methodology. Disponível em: <<https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/I-6-20150608.pdf>>. Acessado em 30 jan. 2018.

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

VALE. 2016b. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Gelado. Parauapebas, 97pp.

VALE. 2016c. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Geladinho. Parauapebas, 95pp.

VALE. 2016d. Plano de Ações Emergências de Barragens de Mineração - PAEBM: Barragem do Pera Jusante. Parauapebas, 100pp.

Valerius M. B. 2014. Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 121p.