

Mestrado Profissional
Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais

ONIWENDEL FELIPE DE MORAIS PEREIRA

**ANÁLISE DA CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE
CONTENÇÃO DE REJEITOS NO BRASIL, QUANTO AO
CRITÉRIO DE CATEGORIA DE RISCO**

Artigo científico apresentado como requisito parcial do seminário II do Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Orientador:

Ph.D. Vidal Félix Navarro Torres

Belém – PA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P436a

Pereira, Oniwendel Felipe de Moraes

Análise da metodologia atual para classificação de barragens de contenção de rejeitos no Brasil, quanto ao critério de categoria de risco. / Oniwendel Felipe de Moraes Pereira -- Belém-PA, 2016.

52 f.: il.

Dissertação (mestrado) -- Instituto Tecnológico Vale, 2016.

Orientador: Ph.D. Vidal Félix Navarro Torres

1. Barragem. 2. Risco. 3. Segurança. I. Título.

CDD 23. ed. 627.8

ONIWENDEL FELIPE DE MORAIS PEREIRA

**ANÁLISE DA CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE
CONTENÇÃO DE REJEITOS NO BRASIL, QUANTO AO
CRITÉRIO DE CATEGORIA DE RISCO.**

Artigo Científico apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Desenvolvimento Sustentável do Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

Ph.D. Vidal Félix Navarro Torres
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Ph.D. German Marcelo Martins Vinueza Freire
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Pedro Walfir Martins E Souza Filho
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, a minha esposa Taina Correa Viana Pereira, minha mãe Clotilde Rosa Dutra de Moraes e pai Onias Marques Pereira.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS), seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes. Em especial aos professores Dr. Everaldo B. De Souza e Dr. Valente Matlaba, que me apoiaram e ajudaram a superar o momento de dificuldade que poderia inviabilizar a conclusão exitosa desse mestrado.

Ao meu orientador Ph.D. Vidal Félix Navarro Torres, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Nos últimos dois anos, duas barragens de contenção de rejeito se romperam no Brasil causando diversos impactos sócio-ambientais-econômicos. Diante disso, no presente trabalho, se realiza uma análise de caráter teórico da classificação de barragens de mineração (DNPM, 2014A). E em face da preocupação com a temática de segurança de barragens de mineração, esse trabalho foi concebido com objetivo de fomentar a discussão sadia sobre a atual metodologia de classificação de barragens de mineração por categoria de risco. Para esse fim, foi realizado uma revisão teórica com o intuito de aprofundar essa discussão.

Palavras-chave: Barragem. Risco. Segurança.

ABSTRACT

In the last two years, two waste containment dams have broken in Brazil causing several socio-environmental and economic impacts. Therefore, in the present work, a theoretical analysis of the classification of mining dams (DNPM, 2014A) is carried out. And in view of the concern with a security theme of mining dams, this work was designed to foment a debate on a current methodology of classification of mining dams by category of risk. For this purpose, a theoretical review was carried out in order to deepen this discussion.

Keywords: Dam. Risk. Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de barragem de contenção de rejeito. (Adaptado de KIERNAN, 2016)...	16
Figura 2: Relação entre a Análise de risco, Avaliação do risco e Gestão de risco. (Adaptado de USBR, 2015).....	19
Figura 3: Impacto causado pela ruptura da barragem B1. Observam-se grandes áreas afetadas e maquinários cobertos pelo rejeito. (Fonte: G1 MG, 2014).....	28
Figura 4: Impacto causado pela ruptura da barragem do Fundão. (Fonte: D'AGOSTINO, 2015).....	29
Figura 5: Cartograma da classificação por categoria de risco do estado do Pará, segundo dados do DNPM. (Adaptado de IBGE, 2016 e DNPM, 2014a).....	31
Figura 6: Relação quantitativa entre as principais causas de acidentes. (Fonte: ICOLD, 2001).	33
Figura 7: Relação de acidentes em barragens com a altura. (Fonte: ICOLD, 2001).....	34
Figura 8: Relação do quantitativo de acidentes por tipo de material empregado na construção da barragem. (Adaptado de ICOLD, 2001).....	36
Figura 9: Falhas por Idade de ruptura da barragem. (Adaptado de ICOLD, 1995).....	37
Figura 10: Relação do número de casos de ruptura com causas das falhas. (Adaptado de AZAM & LI, 2010).....	39
Figura 11: Fluxograma do processo de classificação de barragens de mineração por categoria de risco. (Adaptado do CNRH, 2012).....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Regulamentação de segurança de barragens na Austrália. (Adaptado de GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, 2015).....	22
Tabela 2. Instrumentos da PNSB (Adaptado de BRASIL. Lei 12.334, 2010).....	26
Tabela 3. Critérios gerais para classificação de barragens quanto a categoria de risco (Adaptado de CNRH, 2012).....	40
Tabela 4. Matriz utilizada para a classificação quanto à categoria de risco, considerando as características técnicas. (Adaptado do CNRH, 2012).....	41
Tabela 5. Matriz utilizada para a classificação quanto à categoria de risco, considerando o estado de conservação (Adaptado do CNRH, 2012).	42
Tabela 6. Matriz utilizada para a classificação quanto à categoria de risco, considerando o plano de segurança da barragem. (Adaptado do CNRH, 2012).....	43
Tabela 7. Metodologia de classificação quanto a categoria, com base na pontuação. (Adaptado do CNRH, 2012).....	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

Art. – Artigo

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens

CNBM – Classificação Nacional de Barragens de Mineração

CNPGB - Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DS – Desenvolvimento Sustentável

ETA – Event Tree Analysis

EUA – Estados Unidos da América

FEMA – Federal Emergency Management Agency

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

FMECA – Failure Mode, Effect and Criticality Analysis

FTA – Fault Tree Analysis

HAZOP – Hazard and Operability Analysis

ICOLD – Comissão Internacional de Grandes Barragens

ITV – Instituto Tecnológico Vale

MAC – Associação de Mineração do Canadá

PAE – Plano de Ação de Emergência

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PSB – Plano de Segurança de Barragens

RAL – Relatório Anual de Lavra

SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

USBR – United States Bureau of Reclamation

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA	15
3.1 Barragens de contenção de rejeitos	15
3.2 Conceito de risco.....	16
3.3 Métodos de Análise de risco aplicados a barragens	19
3.4 Legislações e Diretrizes sobre análise de risco em barragens de rejeito: breve visão internacional	21
3.4.1 Austrália.....	22
3.4.2 Canadá	23
3.4.3 Estados Unidos	24
3.5 Legislação brasileira sobre segurança de barragens, lei 12.334 (BRASIL, 2010)	25
4 METODOLOGIA DE ESTUDO	28
4.1 Experiências internacionais e nacionais de falhas que causaram acidentes	28
4.1.1 Acidentes ocorridos com barragens de contenção de rejeito no Brasil, após publicação Classificação Nacional de Barragens de Mineração.....	28
4.1.2 Principais modos de malhas para barragens de rejeito: Causas de ruptura de barragens de contenção de rejeito	31
4.1.3 Relação da ruptura de barragens com a altura e comprimento	33

4.1.4	Relação da ruptura de barragens com o tipo de material de construção	35
4.1.5	Relação da ruptura de barragens com o tipo fundação	36
4.1.6	Relação da ruptura de barragens com a idade de barragem	37
4.1.7	Relação da ruptura de barragens com o tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro.	38
4.2	Metodologia atual prescrita pela resolução nº 143 (CNRH, 2012) para a classificação de barragens de contenção de rejeitos quanto a categoria de risco	40
5	RESULTADOS E DISCUSÃO	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

As barragens de contenção de rejeitos são estruturas comuns na mineração, segundo o último Relatório de Segurança de Barragens da ANA (2015) com dados computados até setembro de 2014, o Brasil possui cerca de 663 barragens de contenção de rejeitos.

É um quantitativo relevante e acentua ainda mais a preocupação da sociedade com a segurança das barragens de contenção de rejeito, visto que os acidentes ocorridos nos últimos anos com esses tipos de estruturas têm se destacado nos meios de propagação de informação e tem causado possíveis impactos sócio-econômicos-ambientais nas áreas afetadas, como ocorrido com o acidente da barragem do Fundão amplamente difundido.

Outra barragem que se rompeu no Brasil foi a B1, em Itabirito, na região central do estado de Minas Gerais, em setembro de 2014. O rompimento dessa barragem causou significativos impactos sociais, ambientais e econômicos.

Essas barragens que se romperam com uma diferença temporal pouco superior a um ano, apresentam um fato semelhante entre elas, a classificação por categoria de risco baixo. Ou seja, baixa possibilidade de ruptura segundo a CNBM inseridas na PNSB que foi emitido em 2014 pelo Departamento Nacional de Produção Mineral.

Dessa forma, entende-se que o conceito de risco, norteador desse critério, pode não ter uma concepção e categorização adequada, já que, a classificação por categoria de risco deveria informar quais barragens possuem maior probabilidade de ruptura e ponderar os possíveis danos sociais, ambientais e econômicos. Segundo a portaria nº 416 (DNPM, 2012) o risco é definido como a probabilidade da ocorrência de um acidente. Além disso, cabe destacar que o conceito de risco aplicado por diferentes empresas, pesquisadores e entidades governamentais em várias partes do mundo é o produto entre a probabilidade da ocorrência de um evento e as consequências advindas desta ocorrência, resultando numa abordagem bifocal do risco, probabilidade de ocorrência e consequências.

Enfim, as barragens que se romperam, provavelmente não estavam atendendo plenamente a essa definição.

Frente a esta situação, este trabalho é composto da realização de uma análise da metodologia de classificação de barragens de contenção de rejeitos quanto ao critério de categoria de risco, estabelecido pela resolução nº 143 (CNRH, 2012).

Essa metodologia de classificação por categoria de risco, que será alvo desse trabalho, é parte dos sete instrumentos da lei 12.334 (BRASIL, 2010) que foi marco histórico para o progresso da temática de segurança de barragens no Brasil, e de acordo com BAIMA et al. (2016), juntamente com a classificação por dano potencial associado são os mais importantes dos instrumentos dessa política, já que é um dosador das medidas e procedimentos de monitoramento a serem adotados, de forma a tornar mais seguras as barragens, determinando a periodicidade e o conteúdo mínimo das inspeções regulares e especiais, da revisão periódica de segurança, e a obrigatoriedade ou não de elaboração do plano de ação de emergência (PAE) da barragem.

Além disso, segundo KIERNAN (2016), em um estudo sobre acidentes de barragens, David Chambers e Lindsay Newland Bowker, projetaram que 11 falhas “muito sérias” — definidas como as que liberam pelo menos um milhão de metros cúbicos de rejeitos e/ou alcançam mais de 20 quilômetros e/ou causam múltiplas mortes — em barragens vão ocorrer entre 2011 e 2020. Até agora, já aconteceram cinco. Ou seja, a discussão sobre esse tema precisa ser aprofundada para que se desenvolvam novas metodologias para aumentar a segurança de barragens.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral que tenderá a ser galgado nesse trabalho será de fazer uma análise da metodologia atual de classificação por categoria de risco em barragens de contenção de rejeito preconizada pela resolução nº 143 (CNRH, 2012).

2.2 Objetivos Específicos

Mais especificamente, pretende-se:

- Realizar uma pesquisa teórica e definir a respeito: de barragens de contenção; conceito de risco; métodos de análise de risco para barragens de contenção de rejeito e traçar um breve panorama sobre legislações e/ou diretrizes que tratam sobre metodologias de análise de risco em barragens de contenção de rejeito.
- Informar sobre acidentes graves em barragens de rejeito que ocorreram recentemente no Brasil, após a divulgação da primeira classificação de barragens de rejeito por categoria de risco emitido pelo DNPM;
- Elaborar uma revisão teórica sobre os principais modos de falha em barragens de rejeitos, considerando cenário nacional e internacional;
- Explicar como ocorre a classificação de barragens de rejeitos por categoria de risco, de acordo com a resolução nº 143 (CNRH, 2012);

3 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

3.1 Barragens de contenção de rejeitos

Barragens são estruturas que podem ser utilizadas para diversos fins como represamento de água, irrigação, geração de energia elétrica entre outras finalidades. Há na literatura uma pesquisa de SCHNITTER (1994) que trabalha a história das barragens. Nessa pesquisa, ele cita a barragem de Sadd El-Kafara, localizado no antigo Egito, como a mais antiga do mundo que se tem registro, com quase cinco mil anos de idade.

Da mesma forma que a concepção da utilização de barragens para múltiplos usos é antiga, assim também é a atividade de mineração. E ao longo do tempo, os métodos de mineração foram sendo aperfeiçoados, permitindo uma maior retirada de volume de material e possibilitando paulatinamente a exploração de áreas com teor mineral cada vez mais baixo. Contudo, acompanhado a esse processo surgiram mais rejeitos e esses resíduos vieram a impactar o meio ambiente. Como destacado por MELLO & PIASENTIN (2011) os resíduos gerados, foram por muito tempo descartados na natureza, em cursos d'água ou lançados em terrenos adjacentes, formando depósitos sem nenhuma preocupação de organização ou impacto ambiental.

Ainda segundo MELLO & PIASENTIN (2011), foi a partir dos idos de 1930 que as indústrias investiram na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos, focando na manutenção da mineração e mitigação dos impactos ambientais.

Desse modo, mediante a evolução da mineração e de suas técnicas para disposição de rejeito, torna-se necessário definir um conceito claro e objetivo de barragens de contenção de rejeito. Adotaremos para esse fim, o conceito de barragens de mineração proposto pelo DNPM, expresso na portaria nº 416 (DNPM, 2012). Essa definição é generalista, porém reflete os tipos de estrutura que existem na atualidade brasileira para fins de contenção de rejeito e que são alvo das ações dos órgãos fiscalizadores.

Barragens de mineração: são barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas localizados no interior da área concedida ou área de servidão, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração, descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas. (DNPM, 2012)

Na figura 1, observa-se um exemplo genérico de uma barragem de contenção de rejeitos. Contudo, nem todas as estruturas para contenção de rejeito são construídas com a configuração apresentada.

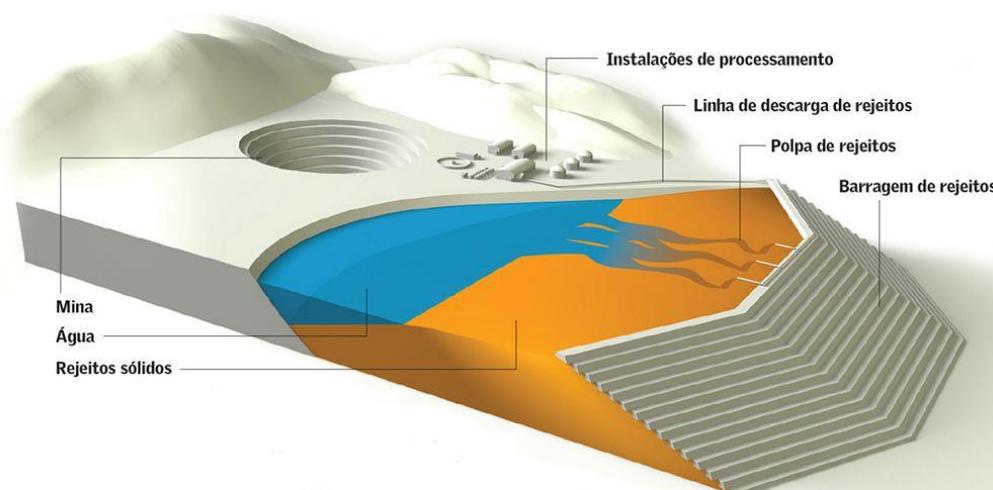


Figura 1: Exemplo de barragem de contenção de rejeito. (Adaptado de KIERNAN, 2016).

3.2 Conceito de risco.

Diante de um cenário de mineração atual que utiliza frequentemente barragens de contenção de rejeito por diversos motivos, e vislumbrando no próximo tópico o entendimento pleno do que é uma análise de risco e seus principais métodos, torna-se importante definir o que é risco. Segundo o ICOLD (2011), o risco é definido como sendo a possibilidade de algo acontecer, é produto da possibilidade/probabilidade vezes a consequência.

Na NBR ISO 31000 (2009), que trata sobre o princípio e diretrizes para a gestão de risco, esse termo é definido como o efeito da incerteza nos objetivos. Por “efeito” se entende como um desvio em relação ao esperado (pode ser positivo e/ou negativo) e em relação aos “objetivos”, podem ter diferentes aspectos (tais como metas financeiras, de saúde e segurança e ambientais) e podem se aplicar em

diferentes níveis (tais como estratégico, em toda a organização, de projeto, de produto e de processo).

Alguns autores que trabalham com essa temática, não adotam uma definição de risco que tenha um teor diferenciado em relação ao expresso por entidades, como a ISO ou a ICOLD. Como definido por HILSON (2010) apud KEMP et al (2016) o risco é um possível evento futuro que seria significativo se ocorresse e nesse conceito, o autor inclui as ameaças que podem se materializar e que tenderiam a causar problemas se o fizessem. Segundo VAUGHAN & VAUGHAN (2014), o risco é uma condição do mundo real em que existe uma exposição à adversidade, especificamente, é a existência de uma possibilidade de adversidade variada de um resultado desejado que se tinha expectativa ou esperança. Por fim, PARDO (2009) considera como a probabilidade de ocorrência de um evento inesperado e de sua consequência associada, sendo composto por três elementos fundamentais: evento; probabilidade e consequência.

No Canadá o risco é tratado por diversas organizações, tanto governamentais quanto privadas. Destaca-se, a Associação de Mineração do Canadá (MAC), que desde 1935, tem sido a voz nacional da indústria de mineração canadense, proporcionando um trabalho unificado dos seus membros com o governo, dessa forma, garantindo que ocorra uma promoção da indústria nacional e internacionalmente. Segundo a MAC (2011), o risco determina um potencial impacto negativo, prejudicial para as operações, o ambiente, a saúde e/ou a segurança pública, que pode surgir de algum processo presente ou evento futuro.

Nos EUA, desde 1902, o Departamento de Recuperação, é um órgão governamental que ligado ao Departamento de Interior tem como especialidade a construção de grandes estruturas, sendo responsável pela construção de diversas barragens, como a famigerada barragem Hoover, no rio Colorado. Em seu documento sobre as melhores práticas em barragens e níveis de segurança (USBR, 2015), o risco é definido como o produto da probabilidade de uma estrutura que está sendo carregada sofrer um desempenho estrutural adverso, (por exemplo, falha da represa), pela magnitude das suas consequências.

Na lei 12.334 (BRASIL, 2010), que trata sobre a política nacional de segurança de barragens, não há uma definição de risco. Na resolução nº 143 (CNRH, 2012), que versa sobre critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, também não há definição de risco. Porém, o DNPM, órgão do governo responsável pela realização da classificação por categoria de risco, através da portaria nº 416 (DNPM, 2012), que prescreve a respeito do cadastro nacional de barragens de mineração, define o risco como probabilidade da ocorrência de um acidente.

Dessa forma, o risco para fins de classificação de barragens de contenção de rejeitos por categoria de risco aplicado pelo DNPM é definido, somente, segundo a dimensão probabilística. Esse entendimento a respeito do risco, não está em harmonia com os critérios internacionais, já que vários autores, entidades públicas e privadas que versam sobre a matéria, o consideram em ao menos duas dimensões, probabilística e consequencial.

Porém, destaca-se que segundo MELO & FUSARO (2015) o risco, propriamente dito como probabilidade de falha pela consequência, não é explicitado na lei da política de segurança ou resolução da classificação. No entanto a grandeza do risco pode ser inferida partindo do pressuposto que os dois fatores (categoria de risco e dano potencial associado), de certa forma, traduzem o par de valores probabilidade e consequência.

Contudo, essa é uma visão que se apoia em deduções/hipóteses que surgem da ausência de uma clara definição de risco. Esse aspecto demonstra uma fragilidade da classificação por categoria de risco, já que o resultado do risco emitido pela classificação (Baixo, Médio ou Alto) não se fundamenta na dimensão das consequências.

Por fim, adotaremos para esse trabalho o conceito de risco prescrito na portaria nº 416 (DNPM, 2012), entendendo que o risco está limitado a dimensão probabilística.

3.3 Métodos de Análise de risco aplicados a barragens

Segundo USBR (2015), a análise de risco é o primeiro componente da gestão de risco. É a porção do processo em que os possíveis modos de falha, desempenho estrutural, e as consequências adversas são identificadas. É também o processo durante o qual uma estimativa quantitativa ou qualitativa da probabilidade de ocorrência e a magnitude das consequências destes potenciais acontecimentos são produzidas. Cabe destacar como a análise de risco está inserido dentro da cadeia de gestão de risco, nesse sentido, ilustra-se com a figura 2.

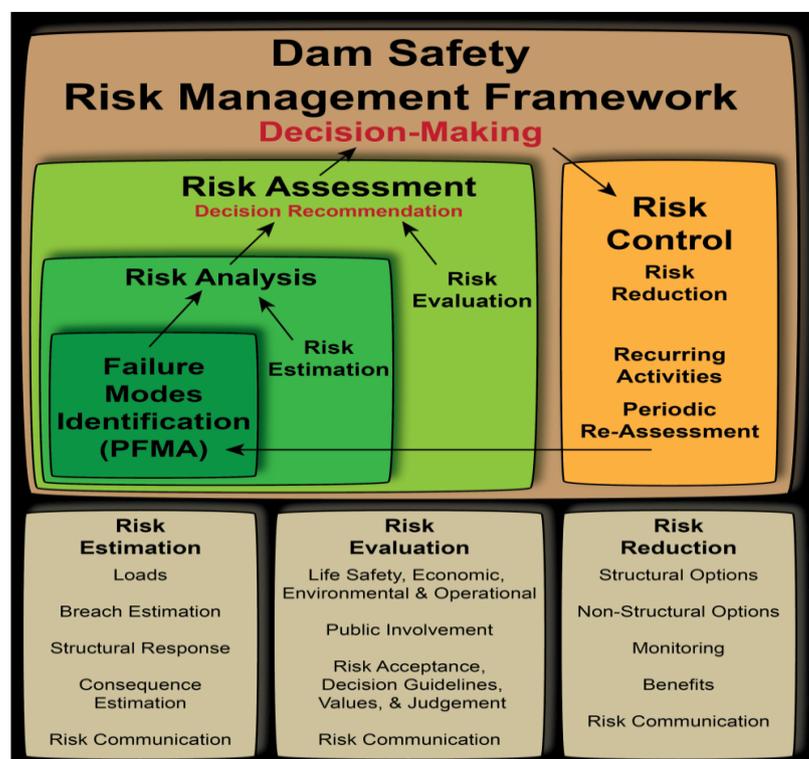


Figura 2: Relação entre a Análise de risco, Avaliação do risco e Gestão de risco. (Adaptado de USBR, 2015).

Em outra visão que não diverge significativamente da USBR, a COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (2007), trata a análise de risco como uma ferramenta que permite a quantificação das opções, da probabilidade, consequências e custos do fracasso.

Há uma variedade de métodos de análise de risco que são utilizados por diferentes empresas da mineração, dependendo da escala do desenvolvimento da mineração e da abordagem adotada pela empresa. ECKHOFF (2016) corrobora

essa afirmação expressando 37 métodos de análises de risco. Contudo, CNPGB (2005) apud COLLE (2008), destaca que são seis os métodos de análise de risco, disponíveis na bibliografia especializada, que melhor se adequam às barragens.

O primeiro é o HAZOP (Análise dos Perigos e da Operacionalidade), que segundo ECKHOFF (2016) é uma técnica essencialmente qualitativa, e tem como objetivo estimular a imaginação dos participantes para identificar potenciais perigos e problemas de operabilidade, permitindo que assim possam ser identificados e avaliados problemas que podem representar riscos para pessoas ou equipamentos, ou impedir uma operação eficiente.

O segundo é o FMEA (Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos). Trata-se de um método de análise que é iniciado pela identificação e perfeita compreensão dos modos possíveis de ruptura de um sistema, e se avaliando, em seguida, o comportamento global do sistema. Dessa forma, uma identificação prévia de todos os modos de ruptura catastróficos e críticos poderão antecipar uma intervenção corretiva de forma a minimizar ou eliminar os riscos. (PEREIRA, 2009)

O terceiro é o FMECA (Análise da criticidade, dos Modos de Falha e dos seus Efeitos). O objetivo do FMECA é identificar sistematicamente todas as possíveis maneiras em que uma planta de processo pode falhar, para que avaliando através de um processo de criticidade possam ser ordenados os modos de ruptura e formuladas recomendações para a tomada de medidas preventivas e mitigadoras. Os resultados são registrados em um formato padrão em que as recomendações para a correção sejam incluídas. (ECKHOFF, 2016).

O quarto é o ETA (Análise por Árvore de Eventos). Segundo PARDO (2009) é uma técnica de análise quantitativa que permite modelar os possíveis resultados de um evento inicial. Ela é iniciada com um evento, sendo identificadas todas as possíveis consequências desse evento, bem como a sua probabilidade de ocorrência. Os eventos, as consequências e as probabilidades são representados na forma de uma árvore de eventos e dessa forma é possível desagregar as sequências de ruptura de um modo lógico e coerente e, assim, com base nos resultados obtidos, calcular a fiabilidade do sistema.

O próximo é o FTA (Análise por Árvore de Falhas), segundo ECKHOFF (2016), o método é aplicado aos sistemas complexos, devido à complexidade da natureza do próprio processo, ou para a instrumentação necessária à sua execução. Inicialmente, os possíveis modos de falha devem ser identificados, por exemplo, por HAZOP. Para estes modos de falha chamamos de "eventos de topo." Exemplos de "eventos de topo" seria um fogo em torno de uma torre de destilação, uma explosão de pó em uma fábrica de moagem ou ruptura de barragem por galgamento. Para cada "evento topo", devem ser identificados todos os eventos ou combinações de eventos que poderiam levar diretamente para o "evento topo". Este processo termina quando todos os fatores causais na parte inferior da árvore são de um tipo simples para que as frequências de ocorrência ou probabilidades possam ser estimadas.

Por fim, o Noeud Papillon (Nó de Borboleta), que segundo COLLE (2008) se trata de junção dos dois métodos anteriores de análise de risco através de um ponto central. O evento central representa a falha do sistema unindo a parte esquerda, que utiliza o método da Árvore de Falhas, à parte direita, que utiliza Árvore de Eventos

3.4 Legislações e Diretrizes sobre análise de risco em barragens de rejeito: breve visão internacional

Abordaremos nesse tópico um panorama sucinto da prática de análise de risco em barragens de contenção de rejeitos para alguns países. Utilizaremos como referência, a Austrália, Canadá e EUA, por se tratarem de grandes produtores mundiais de minérios.

Contudo, destaca-se a dificuldade de se realizar um estudo dos aspectos legislativos em nível mundial. Abaixo seguem alguns pontos citados por DUARTE (2008), que denotam essa realidade:

- A legislação sobre barragens pode estar incluída em legislação referente a contextos mais vastos, como, por exemplo, infraestruturas hidráulicas;
- A legislação sobre barragens pode remeter para outros textos legais;

- A legislação pode ser de tipos diferentes (puramente administrativa ou técnico-administrativa) e apresentar graus de pormenorização muito diversos;
- O "peso" jurídico da legislação pode ser diverso: em Portugal, por exemplo, há regulamentos e normas, enquanto que no Canadá há orientações (guidelines) que não são estritamente obrigatórias;
- Pode haver legislação distinta conforme a dimensão da barragem;
- Acompanhamento das atualizações da legislação e qual nível a legislação está sendo aplicada.

3.4.1 Austrália

A segurança de barragens é uma responsabilidade a nível do estado/território, sendo gerida de diferentes formas na Austrália, conforme é mostrado na tabela 1. Além disso, alguns estados regulam especificamente sobre determinados tipos de barragens. A título de exemplo, o estado de Western Austrália, estabelece a lei de inspeção e segurança de minas criado pelo seu Departamento de Minas e Petróleo, que se aplica as barragens de rejeito, contudo não trata sobre análise de risco. (GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, 2015).

Tabela 1. Regulamentação de segurança de barragens na Austrália. (Adaptado de GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, 2015).

Estado/Território	Regulado por
New South Wales	Comitê de Segurança de Barragens
Queensland	Departamento de Meio Ambiente e Gerenciamento de Recursos
Victoria	Departamento de Sustentabilidade e Meio Ambiente
Tasmania	Departamento da Indústria Primária, Água e Meio Ambiente
Australian Capital Territory	Departamento de Serviços Urbanos
Western Australia	Alto-Regulado pela empresa
South Australia	Alto-Regulado pela empresa
Northern Territory	Alto-Regulado pela empresa

Na indústria da mineração australiana não há obrigatoriedade legal de realizar a análise de risco de ruptura de barragens, possibilitando que cada indústria utilize o método de análise de risco que melhor lhe convém para classificar cada barragem em sua posse. Segundo COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (2007), o método mais comumente utilizado na mineração para analisar o risco de ruptura de uma

barragem é a *Árvore de Falhas*, aonde é importante identificar os principais modos de falhas que podem levar a uma ruptura da estrutura.

3.4.2 Canadá

Assim como é realizado na Austrália, a segurança de barragens não é uma responsabilidade a nível nacional no Canadá, sendo realizada pelas províncias/territórios. Segundo o ICOLD (2005), não há política oficial federal ou provinciana de tolerabilidade de risco de barragens no Canadá. Somente quatro das dez províncias do Canadá já possuem regulamentos para segurança de barragens (Alberta, British Columbia, Ontário e Quebec) e nenhum dos três territórios possuem orientação para essa temática. Contudo, os regulamentos nessas províncias não reconhecem especificamente a avaliação de risco, mas em alguns casos não a excluí. Algumas autoridades consideram os casos de estudo de risco da segurança de barragens quando apresentadas por um proprietário de barragem, porém não são base única para aprovação oficial.

Atualmente, o documento intitulado de *Diretrizes para Gerenciamento de Instalações de Rejeito* (MAC, 2011), é o regramento (sem valor legal, apenas prescritivo) a nível nacional mais importante do Canadá na temática de gestão de rejeitos de mineração. Foi elaborado através da parceria dos membros da indústria da mineração canadense e os especialistas da Associação de Mineração do Canadá. A metodologia descrita para o gerenciamento de rejeitos, é prescrita para ocorrer de forma cíclica. O início se dá pela adoção da empresa da política e compromisso, perpassando posteriormente pelo planejamento, implementação do planejamento, checagem e ações corretivas e por fim, condução das informações através de um relatório anual de gestão de rejeitos. Na fase de planejamento, abordagem da gestão de risco é fundamental para garantir o sucesso do programa, e deve definir o risco aceitável no contexto da instalação, além de identificar os gatilhos e os possíveis modos de falhas e/ou ruptura da barragem. Contudo, esse documento não cita uma recomendação ou padronização do método de análise de risco a ser utilizado, deixando livre para cada empreendedor aplicar sua avaliação de riscos, de acordo com a metodologia mais conveniente.

Segundo, SRIVASTAVA (2008), os principais e mais comumente métodos usados para analisar o risco de rompimento de barragens no Canadá, são respectivamente, Modos de Falha e Análise de Efeitos (FMEA) e métodos variantes, Análise de Árvore de Falhas (FTA), e Análise de Árvore de eventos (ETA).

3.4.3 Estados Unidos

Segundo OLIVEIRA (2010), nos Estados Unidos, existe uma enormidade de leis aplicadas às atividades de mineração. O processo de licenciamento é complexo e envolve diversas agências. Existem leis locais, estaduais e federais no que se refere aos recursos naturais. Além disso, conforme afirma PYTEL & GROTOWSKI (2010), a regulamentação da mineração nos EUA é de responsabilidade individual dos estados, causando uma variação dos processos jurisdicionais de estado para estado, no entanto, observa-se que o foco é direcionado para os resultados ao invés de procedimentos operacionais. Por exemplo, no estado de Nevada, o Departamento de Regulamentação Mineral e Recuperação (em cooperação com outras agências estaduais, federais e locais) regulam as atividades mineiras se baseando em regulamentos adotados desde 1989, demonstrando dessa forma a importância dada ao resultado que a mineração possa apresentar, já que por mais de duas décadas o procedimento permanece inalterado.

No âmbito nacional o marco mais importante na temática de segurança de barragens, foi a criação da Lei Pública 109-460, após um processo de evolução sobre essa temática que iniciou nos idos de 1972, com a publicação da Lei Pública 92-67, que autorizou a inspeção e realização de um inventário nas barragens dos Estados Unidos, impulsionado pela famigerada falha da barragem de rejeitos de Buffalo Creek, que causou a morte de 125 pessoas. A Lei Pública 109-460, que fora promulgada em 2006, sob o título de Lei de Segurança de Barragens, surgiu com o objetivo de reduzir os riscos para a vida e a propriedade oriundos de falhas em barragens nos Estados Unidos, através da criação e manutenção de um programa nacional eficaz de segurança de barragens para reunir as competências e recursos da União e comunidades não federais na realização nacional de redução de riscos para a segurança de barragens (FEMA, 2013).

Contudo, tanto nessa lei federal quanto em outras legislações a nível estadual ou municipal, não foram identificadas uma metodologia para análise de risco de ruptura de barragens de mineração. Outrora, segundo FEMA (2015), considerando que os métodos para calcular e estimar os riscos estão em constante evolução, essa agência ponderou que no âmbito governamental norte americano a melhor prática para a realização da análise de risco em barragens, independente do tipo, é o que está descrito no documento intitulado por “Best Practices in Dam Safety Risk Analysis”, que se trata de um guia e curso de treinamento desenvolvido pelo Departamento de Recuperação em parceria com o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA.

De acordo com esse documento a análise de risco inicia pela investigação dos possíveis modos de falhas da barragem, esse é o passo crítico para a análise de risco, que deve ser realizado após uma leitura cuidadosa de todas as informações relevantes de uma barragem, incluindo a geologia, análise de projeto, construção, inundação, cargas sísmicas, modos de operações, as avaliações de segurança de barragens, desempenho, documentação de monitoramento etc. Posteriormente, cita-se aplicação de uma metodologia quantitativa para identificar, caracterizar e estimar o risco, a ETA (que fora mencionada no tópico 3.3) que permitirá determinar a probabilidade de ruptura ou falha, e as consequências que daí irão resultar (USBR, 2015).

3.5 Legislação brasileira sobre segurança de barragens, lei 12.334 (BRASIL, 2010)

Para o progresso da segurança de barragens no Brasil, entrou em vigor em 2010 a lei federal 12.334, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Essa lei abrange as barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais.

Para que uma barragem seja inserida nessa política, é necessário que ela apresente pelo menos uma das seguintes características: Altura do maciço, contada

do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros); Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos); Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Um dos elementos de maior destaque nessa regulamentação são os sete instrumentos da PNSB, que estão citados na tabela 2. Esses instrumentos são fundamentais para atingir os diversos objetivos dessa legislação, dentre eles, citam-se: Garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências; e fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

Tabela 2. Instrumentos da PNSB (Adaptado de BRASIL. Lei 12.334, 2010).

Instrumentos da PNSB	
1	Sistema de classificação de barragens por Categoria de Risco e por Dano Potencial Associado;
2	Plano de Segurança de Barragem (PSB);
3	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
4	Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA);
5	Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
6	Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
7	Relatório de Segurança de Barragens.

Essa lei também detalha mais especificamente a respeito de três entre os sete instrumentos, no qual se observa que são os mais importantes para ajudar na redução do número de acidentes e incidentes em barragens, bem como, estimular a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos. São a classificação das barragens por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume; O PSB; e o SNISB.

Com relação a classificação de barragens, ela deve ser realizada pelos agentes fiscalizadores, seguindo os critérios de categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo CNRH.

A classificação por categoria de risco está associada a uma possibilidade de ruptura da barragem. Esse critério deve classifica-la em alto, médio ou baixo risco,

segundo os parâmetros das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao plano de segurança de barragem.

Essa classificação é extremamente relevante por diversos motivos, dentre eles, destaca-se o norteamto dado ao governo e ao empreendedor a respeito de suas barragens que estão com maior probabilidade de ruptura. Além disso, ajuda a cumprir os objetivos dessa legislação relacionados com a redução da possibilidade de acidentes, em coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens e o fomento a cultura de gestão de riscos.

A criação dessa legislação representa um marco relevante para a temática de segurança de barragens no Brasil. Segundo MELLO & PIASENTIN. (2011), essa lei foi fruto de mais de 30 anos de trabalho envolvendo profissionais de notório saber e entidades preocupadas com essa temática, como CBDB, ABMS entre outras.

4 METODOLOGIA DE ESTUDO

4.1 Experiências internacionais e nacionais de falhas que causaram acidentes

4.1.1 Acidentes ocorridos com barragens de contenção de rejeito no Brasil, após publicação Classificação Nacional de Barragens de Mineração

A atual Classificação Nacional de Barragens de Mineração inseridas na PNSB, possui dados computados até abril de 2014. Após a coleta dessas informações, foram registrados oficialmente dois acidentes de grande porte envolvendo barragens de mineração.

O primeiro ocorreu no dia 10 de setembro de 2014, quando se rompeu a barragem de contenção de rejeitos B1, da Herculano Mineração LTDA, em Itabirito, na região central do estado de Minas Gerais. No total três pessoas morreram e o prejuízo ambiental causado pelo rompimento da barragem em Itabirito foi considerado grande. Seis cursos d'água foram afetados, além da perda irreversível para flora e prejuízos para a fauna. O estrago só não foi maior pois uma parte considerável dos rejeitos da barragem B1 foram contidos pelas estruturas das barragens B2, B3 e B4. (EMERICH, 2015).



Figura 3: Impacto causado pela ruptura da barragem B1. Observam-se grandes áreas afetadas e maquinários cobertos pelo rejeito. (Fonte: G1 MG, 2014).

O segundo acidente foi registrado no dia 5 de novembro de 2015, quando se rompeu a barragem do Fundão, na cidade de Mariana, no estado brasileiro de Minas Gerais. Essa fatalidade provocou um dos piores desastres ambientais vistos no país. A mineradora responsável pela barragem é a Samarco Mineração S.A, uma joint

venture cujos acionistas proprietários, em partes iguais, são a BHP Billiton Brasil Ltda. e Vale S.A. Na extensa relação de problemas causados pela tragédia, destacam-se: a morte de ao menos 18 pessoas; de milhares de animais (especialmente peixes mortos por asfixia); os impactos socioambientais da ordem de milhões de reais; e a contaminação de toda a bacia do Rio Doce, apenas para elencar os impactos imediatos. (NARDINI, 2016)



Figura 4: Impacto causado pela ruptura da barragem do Fundão. (Fonte: D'AGOSTINO, 2015)

Esses acidentes que ocorreram podem ser considerados de grande proporção, apesar do ocorrido na barragem B1 não ter tido o mesmo impacto sócio-ambiental-econômico do que ocorreu na barragem do Fundão.

Cabe destacar dois pesquisadores norte-americanos que realizaram um estudo muito interessante sobre acidentes em barragens. David Chambers, um geofísico e presidente do Centro para a Ciência na Participação Pública (uma organização sem fins lucrativos que se concentra em prestar assistência técnica em mineração e é sediada no Estado americano de Montana), e Lindsay Newland Bowker, gestora de riscos ambientais no Estado do Maine, EUA, compilaram em um banco de dados todos os acidentes em barragens de rejeitos que puderam identificar entre 1915 e 2010. Baseado em suas descobertas, eles projetaram que 11 falhas “muito sérias” — definidas como as que liberam pelo menos um milhão de metros cúbicos de rejeitos e/ou alcançam mais de 20 quilômetros e/ou causam múltiplas mortes — em barragens vão ocorrer entre 2011 e 2020. Até agora, já aconteceram cinco. (KIERNAN, 2016).

Diante desse cenário, a classificação por categoria de risco criada pela lei 12.334 (BRASIL, 2010) e metodologicamente regulamentada pela resolução nº 143 (CNRH, 2012) é um importante instrumento para contribuir com a redução da probabilidade de ocorrência de acidentes em barragens de contenção de rejeitos, já que tais estruturas que apresentam categoria de risco alto/médio deverão ter mais atenção do que aquelas avaliadas com categoria de risco baixo.

Contudo, as barragens B1 e do Fundão, apresentaram segundo última Classificação Nacional de Barragens de Mineração inseridas na PNSB, categoria de risco baixo. Logo, se apresentaram tal avaliação, será que realmente tinham baixa probabilidade de ruptura? De fato, os dados mostram que elas romperam numa condição classificatória de baixa possibilidade de ruptura, sendo assim, no mínimo é questionável a eficiência da metodologia prescrita nessa resolução para a classificação por categoria de risco.

Outras barragens em outros estados, podem estar sujeitas a essa provável ineficiência da metodologia. Conforme a figura 4, observa-se que o estado do Pará possui cinquenta e sete barragens cadastradas e classificadas por categoria de risco, desse total oito são de risco alto e quarenta e nove são de risco baixo.

Cartograma - Classificação por Categoria de Risco no estado do Pará

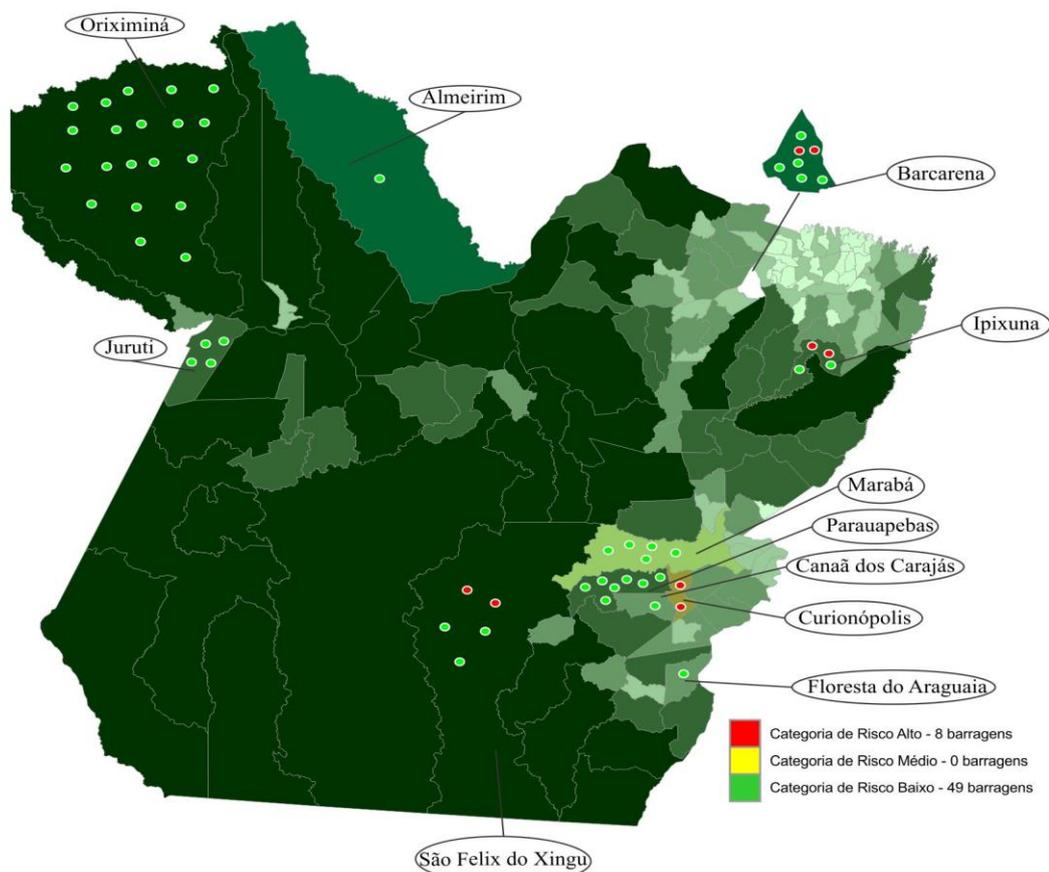


Figura 5: Cartograma da classificação por categoria de risco do estado do Pará, segundo dados do DNPM. (Adaptado de IBGE, 2016 e DNPM, 2014a).

4.1.2 Principais modos de malhas para barragens de rejeito: Causas de ruptura de barragens de contenção de rejeito

Conforme observado na pesquisa, a análise de risco em países como o EUA, Canadá e Austrália é responsabilidade da empresa ou órgão que opera a barragem. Contudo, há um ponto em comum nas metodologias de análise de risco adotadas nesses países, a importância na fase de identificação dos possíveis modos de falha da barragem. Nos EUA, essa fase é considerada crítica e fundamental para uma análise de risco com fiabilidade. Dessa forma, nos tópicos de 4.1.2 até o 4.1.7, analisaremos os principais modos de falhas e buscaremos associá-los com a metodologia de classificação por categoria de risco, com o intuito de avaliar a credibilidade do sistema.

A ICOLD é uma organização não-governamental que fomenta a troca de conhecimentos e experiências relacionados com as barragens de engenharia, foi fundada em Paris, em 1928 e atualmente reúne 95 comitês nacionais. Esta organização tem por função guiar o profissional na construção de barragens de forma segura, eficiente, econômica e sem efeitos negativos sobre o meio ambiente.

As suas obras publicadas são basilares para analisar as principais causas de ruptura de barragens, além de embasar legislações governamentais, programa de operação e monitoramento, a gestão de risco entre outros mecanismos relacionados as boas práticas de construção, operação e desativação de barragens em várias partes do mundo.

O boletim 121 da ICOLD (2001) é uma importante contribuição ao estudo das barragens de contenção de rejeitos, nele são elencadas 221 ocorrências de falhas em estruturas para esse fim. A maioria dos casos podem ser resumidos à falta de atenção aos detalhes, causado por vários fatores, como: a construção paulatina dessas estruturas que podem sofrer influência negativas das mudanças na equipe, e às vezes mudanças de proprietário, além disso, as alturas originais de construção são frequentemente ultrapassadas e as propriedades dos rejeitos podem mudar e por fim, uma falta de controle do equilíbrio do nível da água do barramento pode levar a "galgamento" (assim chamado porque é observado um transbordamento do nível da água sobre a estrutura da barragem, mas pode ser devido ao aumento dos níveis freáticos causando falhas locais que produzem recalque na fundação e rebaixa a crista).

Outras causas incluem, conforme ilustra a figura 5, os problemas de fundações devido a ineficiência das investigações geotécnicas, terremotos, instabilidade de taludes, o processo erosivo, e inadequações estruturais como uma carga adicional. (ICOLD, 2001).

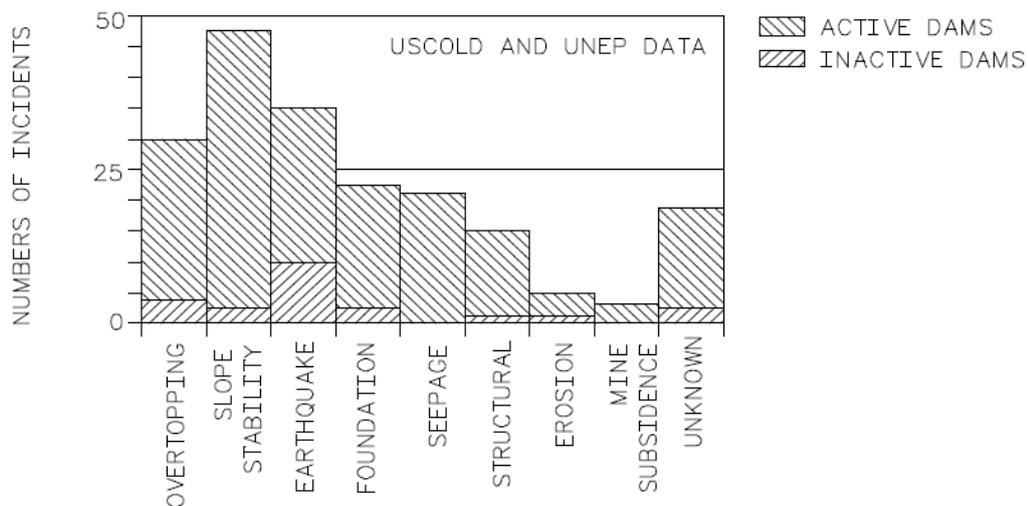


Figura 6: Relação quantitativa entre as principais causas de acidentes. (Fonte: ICOLD, 2001).

Segundo KOSSOFF (2014), considerando uma extensa análise de dados europeia sobre falhas barragens de rejeitos, concluiu-se que 83% das falhas ocorreram quando as barragens estavam ativas, 15% ocorreram em barragens inativas e abandonadas e apenas 2% ocorreram em barragens inativas, mas mantidas pelo proprietário. Para represamentos inativos, o galgamento foi citado como o modo de falha primária em quase metade dos incidentes. Contudo, as causas de insucesso em barragens ativas são mais diversificadas do que aquelas para represamentos inativos, mas algumas conclusões gerais podem ser tiradas, tais como a seguinte divisão em onze grandes grupos: Fundação, Instabilidade de taludes, Galgamento, Aprofundamento da mina, Chuva Incomum, Derretimento da Neve, Infiltração, Liquefação Sísmica, Estrutural, de Manutenção e de Causas Desconhecidas. Dentre essas causas, a principal causa de falha está relacionada a falta de equilíbrio hídrico na contenção, que representa 35% do total.

4.1.3 Relação da ruptura de barragens com a altura e comprimento

A altura da barragem tende a influenciar diretamente na sua estabilidade, já que uma maior altura na barragem implica maiores pressões na fundação e na base dela. Dessa forma, segundo VÉROL (2010), as barragens maiores geram mais

preocupações e despertam mais atenção com relação aos danos que podem causar em caso de ruptura e por isso recebem mais cuidados. Esse fato, pode ajudar a justificar a maioria dos acidentes que se tem registro, já que ocorreram em estruturas consideradas de tamanho pequeno, de até 30 metros de altura. Na figura 6, é possível identificar que cerca de 60% dos casos de ruptura aconteceram nessa configuração.

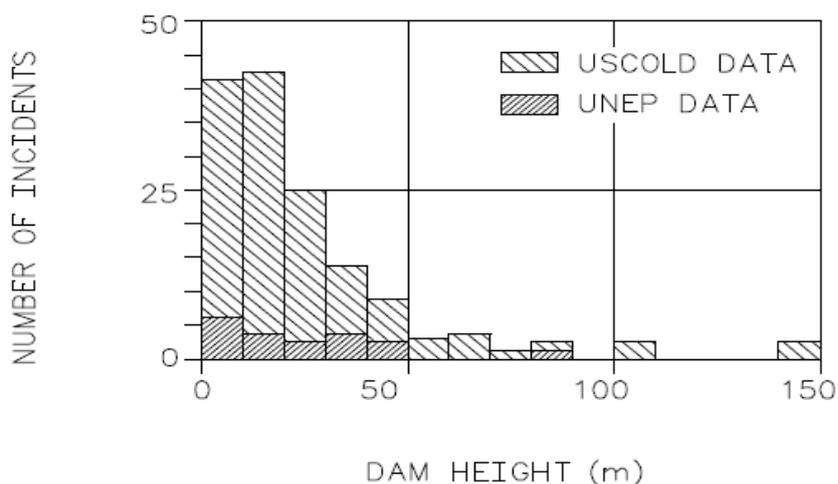


Figura 7: Relação de acidentes em barragens com a altura. (Fonte: ICOLD, 2001).

Além disso, o comprimento da barragem medido entre as ombreiras, pode ser considerado juntamente com sua altura, como elementos que estão diretamente relacionados com a energia potencial que o reservatório guarda em relação a sua capacidade máxima. Assim, quanto maiores as dimensões do barramento, maiores podem ser os danos ocasionados por sua ruptura (AGUIAR, 2014). Essa relação lógica e diretamente proporcional entre as dimensões da barragem e os danos ocasionados, ajuda a reforçar a importância que deve ser dada ao tratamento que as estruturas com grandes dimensões devem receber, em face do grande potencial de impacto em caso de ruptura.

4.1.4 Relação da ruptura de barragens com o tipo de material de construção

De acordo com ICOLD (1996), os materiais mais comuns para a construção das barragens de contenção de rejeito provêm, na maioria dos casos, da própria mina. São comuns para a construção dessas estruturas o uso de rejeito compactado, porções do solo próximas da mina com a finalidade de aterro ou ainda utilização de rochas.

De acordo com DAVIES et al. (2000) apud DUARTE (2008), o grande volume de rejeitos gerados, condicionados aos custos da disposição, faz com que seja atrativa a utilização destes materiais como material de construção das próprias barragens de contenção, desde que sejam obedecidas algumas premissas, tais como: separação da fração grossa e fina (as propriedades geotécnicas são diferentes entre as frações), controle dos processos de separação (granulometria), utilização de sistemas de drenagens eficientes, compactação dos rejeitos (aumento da densidade e da resistência), proteção superficial da barragem, dentre outras.

Conforme observado na figura 7, cerca de 46 % dos acidentes ocorreram em barragens construídas com rejeito usado no processo de mineração e 24 % ocorreram com solo retirado para aterro. Ou seja, cerca de 70 % dos acidentes ocorreram com esses dois tipos de materiais. Provavelmente, essa alta incidência seja por causa da maioria das barragens de contenção de rejeito serem construídas usando esses tipos de materiais.

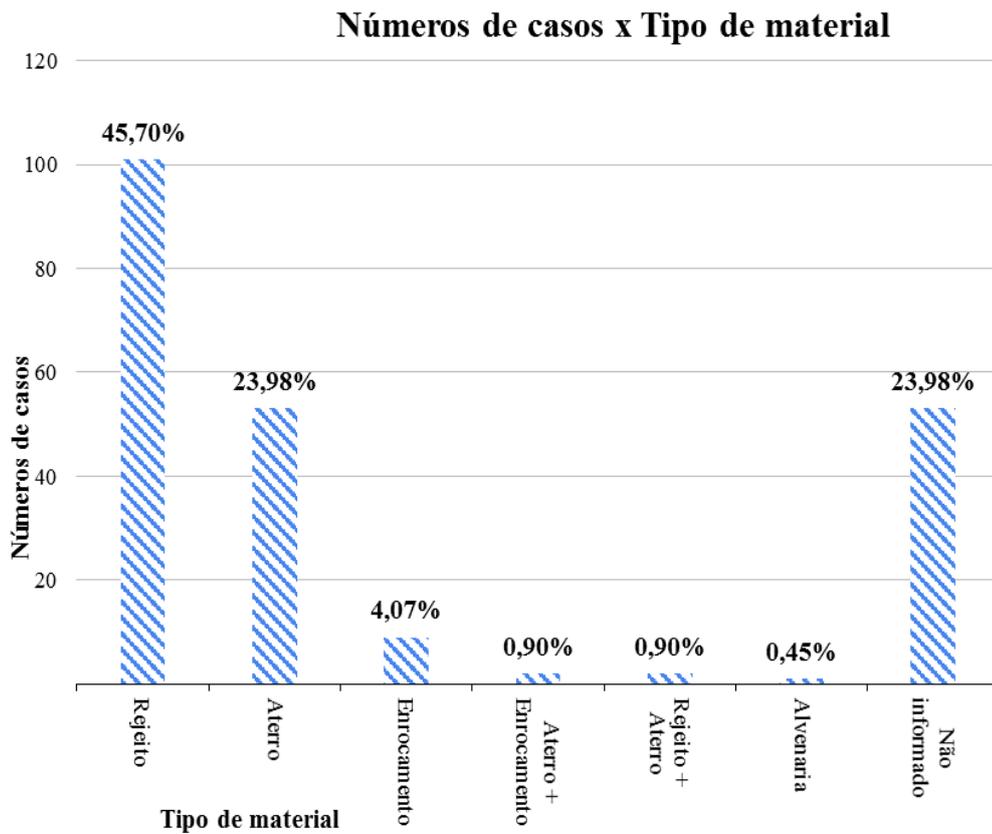


Figura 8: Relação do quantitativo de acidentes por tipo de material empregado na construção da barragem. (Adaptado de ICOLD, 2001).

4.1.5 Relação da ruptura de barragens com o tipo fundação

As fundações são elementos relevantes para a construção de quaisquer estruturas, sejam para atender fins de infraestrutura urbana, residencial, comercial entre outras. Com o intuito de atingir os parâmetros de um bom projeto de fundações é necessário conhecer o solo, que possui múltiplas camadas, algumas mais resistentes e outras nem tanto. Dessa forma, é fundamental escolher a camada mais resistente do solo para a transmissão das cargas da estrutura à fundação e desta para o solo, sem que haja recalques prejudiciais a estrutura.

Conforme se observa na figura 5, a fundação é a quarta principal causa entre as rupturas citadas. Correspondem a cerca de 12 % entre essas falhas em barragens de contenção de rejeito, conforme relatado no estudo divulgado pelo ICOLD (2001).

O Professor Titular da Universidade de Lisboa, Ricardo Oliveira, direciona para um maior grau de importância que deve ser dado as fundações e afirma que 30% dos acidentes com barragens de contenção de rejeito são problema de ruptura das fundações. (PLATONOW, 2015).

4.1.6 Relação da ruptura de barragens com a idade de barragem

A idade de uma barragem influencia na probabilidade de ruptura, em tese quanto mais antiga uma barragem maior a probabilidade de colapso devido aos diversos fatores deteriorantes relacionado com o tempo. Porém, segundo dados do ICOLD (1995) sintetizados na figura 8, cerca de 70 % das falhas ocorreram nos primeiros 10 anos de vida útil dela. Como hipótese para esse alto número de falha nos 10 primeiros anos, levanta-se que possa ser por uma deficiência no projeto ou execução, já que uma estrutura quando corretamente projetada e edificada tende a apresentar alta longevidade, pois resistirá aos efeitos mais intensos do uso da mina, que se concentram nos primeiros anos de sua exploração.

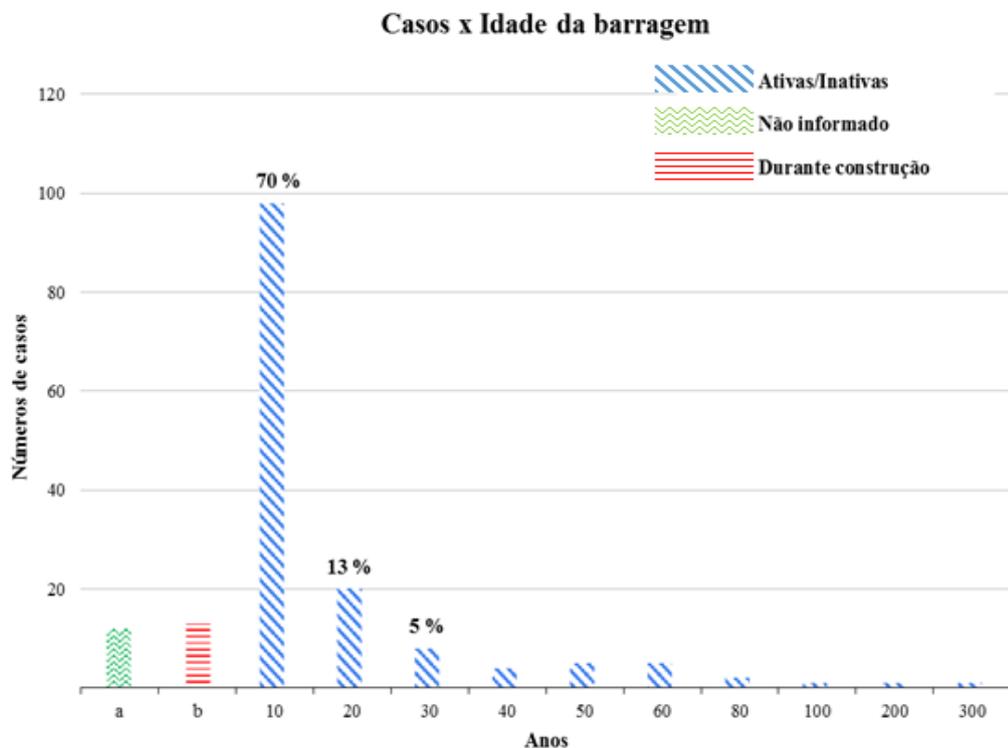


Figura 9: Falhas por Idade de ruptura da barragem. (Adaptado de ICOLD, 1995).

4.1.7 Relação da ruptura de barragens com o tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro.

A água é frequentemente utilizada na moagem e processamento de muitos tipos de processos de mineração para a extração dos metais necessários, de modo que na extremidade do sistema de tratamento, os resíduos são descartados na forma de uma mistura fluida de partículas minerais e água que irão ser conduzidas para um canal ou duto até chegar na contenção da barragem. Nesse material contido na barragem, há uma grande quantidade de água que está inclusa nesses rejeitos minerais. É de suma importância o dimensionamento correto da vazão de projeto, pois a falta de controle do equilíbrio hídrico são uma das causas mais comuns de falha. Dos casos relatados no estudo do ICOLD (2001), a maioria das falhas foram devido a galgamento, instabilidade de taludes, infiltração de água no solo e erosão; todos causados por uma falta do controle do equilíbrio de água dentro dos represamentos. Na figura 5, observa-se que cerca de 47% das falhas estão relacionadas a esses fatores. (ICOLD, 2001).

Em outro boletim da ICOLD (1995), elenca que 46 % das falhas em barragens de terra (as de rejeitos podem ser consideradas nesse grupo) ou enrocamento, são causadas por galgamento e erosão interna no corpo da barragem. Ou seja, falha no equilíbrio hídrico do reservatório.

De acordo com AZAM & LI (2010), há sete tipos de causas de falhas identificadas em barragens que ocorreram entre 1910 e 2009, são o clima incomum, falha de gerenciamento, recalque da fundação, instabilidade de taludes, galgamento, infiltração de água para o solo e defeito estrutural. Conforme se observa na figura 9, 53% das falhas ocorridas de 1910 a 1999, foram por causa de falta de controle do equilíbrio hídrico da barragem de contenção de rejeitos (Clima incomum, galgamento e Infiltração de água para o solo) e na primeira da década do século XXI, esse indicativo já representa 55% do total do número de falhas.

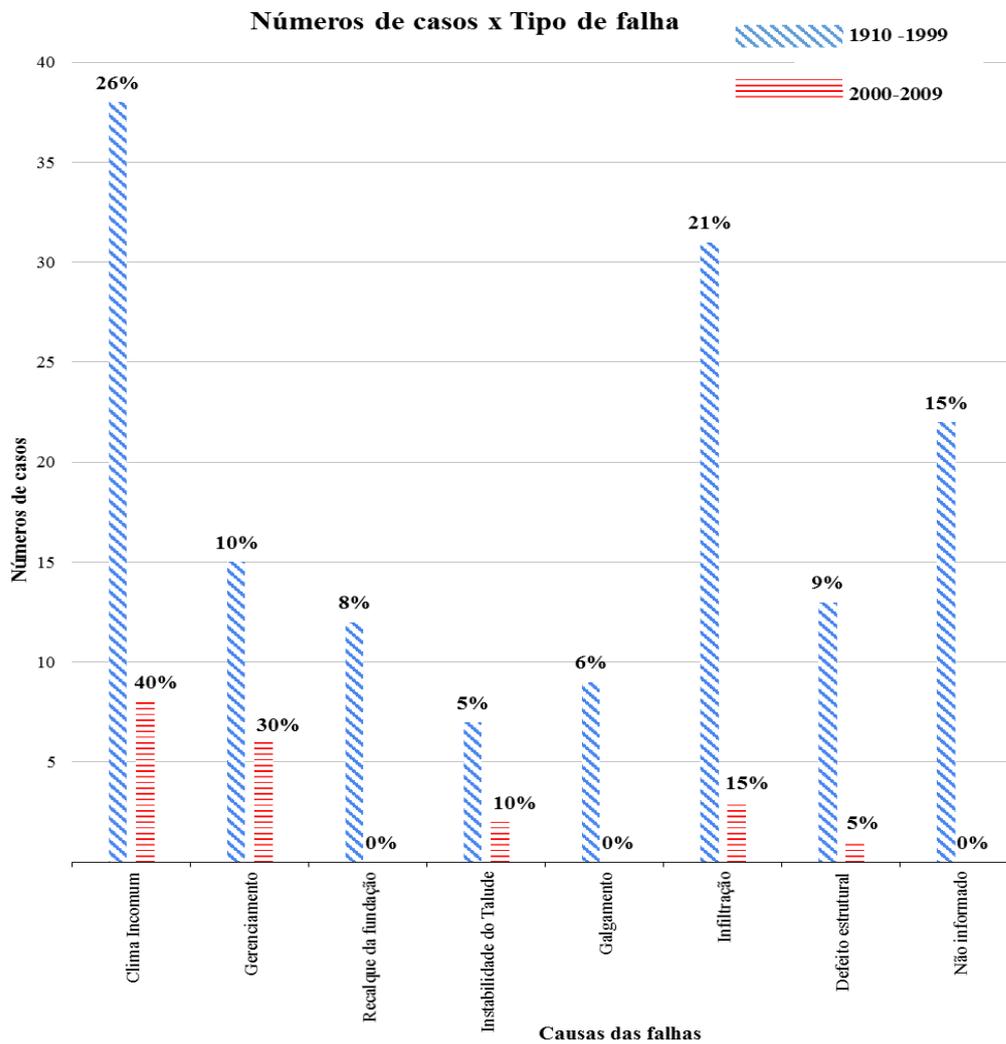


Figura 10: Relação do número de casos de ruptura com causas das falhas. (Adaptado de AZAM & LI, 2010).

4.2 Metodologia atual prescrita pela resolução nº 143 (CNRH, 2012) para a classificação de barragens de contenção de rejeitos quanto a categoria de risco

A Lei 12.334 (BRASIL, 2010) incumbiu ao CNRH estabelecer os critérios gerais para classificação das barragens por categoria de risco, e para atender essa demanda, o CNRH publicou em 2012 a resolução nº 143.

Na resolução nº 143 (CNRH, 2012) em consonância com a Lei 12.334 (BRASIL, 2010), foi estabelecido que o critério de categoria de risco esteja em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem.

A classificação de barragens de contenção de rejeitos por categoria de risco deve ser realizada pelo órgão fiscalizador. No caso, o órgão responsável por realizar essa tarefa no âmbito da mineração brasileira é o DNPM, considerando os critérios gerais da tabela 3.

Tabela 3. Critérios gerais para classificação de barragens quanto a categoria de risco (Adaptado de CNRH, 2012).

Critérios Gerais para Classificação de Barragens, quanto a Categoria de Risco.			
Nº	Características Técnicas	Estado de Conservação da Barragem:	Plano de Segurança da Barragem:
1	Altura do barramento;	Confiabilidade das estruturas extravasoras;	Existência de documentação de projeto;
2	Comprimento do coroamento da barragem;	Confiabilidade das estruturas de captação;	Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem;
3	Tipo de barragem quanto ao material de construção;	Eclusa;	Procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento;
4	Tipo de fundação da barragem;	Percolação;	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; e
5	Idade da barragem;	Deformações e recalques;	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.
6	Tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro;	Deterioração dos taludes.	

Para auxiliar a avaliação do órgão fiscalizador foi prescrito no anexo I, da resolução nº 143 (CNRH, 2012), a matriz para classificação de barragens para disposição de resíduos e rejeitos e as três matrizes de classificação quanto à categoria de risco.

As três matrizes constantes nessa resolução são uma base metodológica fundamental para a determinação da categoria de risco das barragens de contenção de rejeito utilizadas em processos de mineração, segundo a demanda da lei 12.334 (BRASIL, 2010). Na primeira matriz de classificação estão relacionadas as características técnicas da barragem, conforme a tabela 3. Observa-se que esse critério equivale a vinte por cento (20%) da pontuação máxima que é utilizada para classificar a barragem.

Tabela 4. Matriz utilizada para a classificação quanto à categoria de risco, considerando as características técnicas. (Adaptado do CNRH, 2012).

I.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)		
1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT		
Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)
Altura ≤ 15m (0)	Comprimento ≤ 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)
30m ≤ Altura ≤ 60m (4)	200 ≤ Comprimento ≤ 600m (2)	TR = 500 anos (5)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR Inferior a 500 anos ou desconhecida/ Estudo não confiável (10)
CT = ∑ (a até c)		

Na segunda matriz de classificação está relacionado o estado de conservação da barragem, conforme a tabela 5. Observa-se que esse critério equivale a quarenta por cento (40%) da pontuação máxima que é utilizada para classificar a barragem.

Tabela 5. Matriz utilizada para a classificação quanto à categoria de risco, considerando o estado de conservação (Adaptado do CNRH, 2012).

I.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)			
2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (g)
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 das 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)
EC = \sum (d até g)			

Na terceira matriz de classificação está relacionado o atendimento ao plano de segurança da barragem, conforme o Tabela 6. Observa-se que esse critério equivale a quarenta por cento (40%) da pontuação máxima que é utilizada para classificar a barragem.

Tabela 6. Matriz utilizada para a classificação quanto à categoria de risco, considerando o plano de segurança da barragem. (Adaptado do CNRH, 2012).

I.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)				
3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS				
Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
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)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)
PS = \sum (h até l)				

Conforme os dados da barragem são recebidos pelo DNPM, ela é classificada de acordo com a metodologia de somatório simples das pontuações obtidas nas três matrizes citadas anteriormente. A tabela 7 exhibe esse mecanismo. Para a barragem ser classificada de risco alto, ela precisa obter uma pontuação maior ou igual a 60, ou ser avaliada em alguns dos critérios de estado de conservação com pontuação igual a dez (10).

Tabela 7. Metodologia de classificação quanto a categoria, com base na pontuação. (Adaptado do CNRH, 2012).

I.1 - CATEGORIA DE RISCO		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	> = 60 ou EC*=10 (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	< = 35
<p>(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.</p>		
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:		
CATEGORIA DE RISCO		Alto / Médio / Baixo

Essa metodologia de classificação das barragens de contenção de rejeito é um processo relevante. Esse fluxo inicia com envio dos dados da barragem sob a responsabilidade de preenchimento do empreendedor, através da plataforma eletrônica do Relatório Anual de Lavra. O DNPM recebe esses dados e com o

auxílio da metodologia da resolução nº 143 (CNRH, 2012), realiza o somatório da pontuação recebida pela barragem conforme os critérios estabelecidos nas três matrizes e a classifica como em alto, médio ou baixo risco. Posteriormente, ocorre a divulgação do resultado no sitio eletrônico do DNPM. No entanto, o empreendedor está sujeito a fiscalização no escritório e em campo, principalmente para verificação da veracidade dos dados apresentados. Quanto a atualização, deve ocorrer obrigatoriamente a cada cinco anos ou conforme algum critério específico do DNPM. Segue abaixo um fluxograma do processo metodológico de classificação de barragens quanto a categoria de risco.

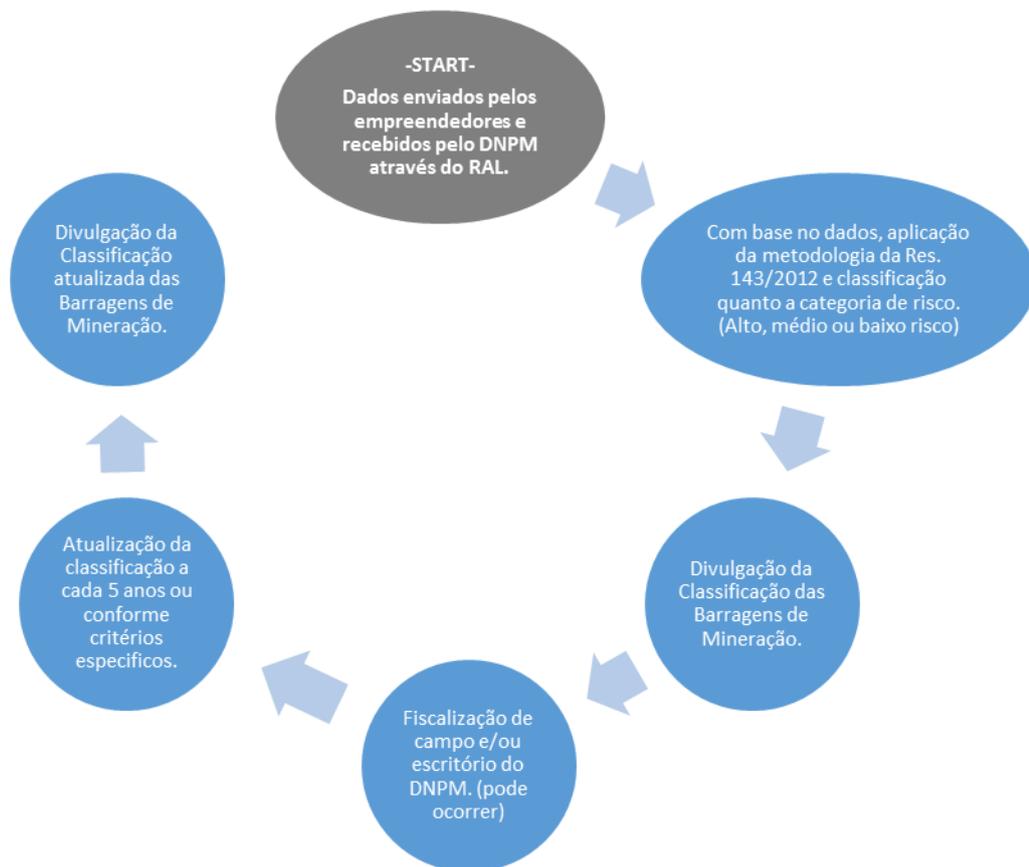


Figura 11: Fluxograma do processo de classificação de barragens de mineração por categoria de risco. (Adaptado do CNRH, 2012).

A primeira, e atualmente única, Classificação Nacional de Barragens de Mineração inseridas na PNSB são de dados computados até abril de 2014. Nela é

possível identificar as barragens de mineração por empresa, sua categoria de risco, dano potencial associado, volume do reservatório, localização geográfica, entre outras informações. Contudo, o foco dessa pesquisa será a classificação por categoria de risco.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com essa pesquisa, obteve-se sumariamente três conclusões:

1. O conceito de risco, que para fins de classificação de barragens de contenção de rejeitos por categoria de risco aplicado pelo DNPM é definido, somente, segundo a dimensão probabilística. Esse entendimento a respeito do risco, não está em harmonia aos demais paradigmas internacionais, já que vários autores, entidades públicas e privadas que versam sobre a matéria, o consideram em ao menos duas dimensões, probabilística e consequencial.
2. Observaram-se em países como o EUA, Canadá e Austrália, que o governo não impõe legalmente a realização de uma análise de risco das barragens e nem determina um método para fazê-la, conferindo essa responsabilidade exclusivamente ao empreendedor que tem a função de gerir os riscos de sua atividade e podendo dessa forma, livremente escolher, quais métodos de análise de risco adotar.
3. A metodologia de classificação de barragens de mineração por categoria de risco que é atualmente regulamentada pela resolução nº 143 (CNRH, 2012), e aponta que há uma notória discordância nela, já que no inciso I do artigo 4º são definidos seis subcritérios para avaliação das barragens de mineração (altura, comprimento, vazão de projeto, tipo de fundação, tipo de barragem quanto ao material de construção e idade da barragem), contudo na metodologia que está em anexo na resolução somente são utilizados três subcritérios (altura, comprimento e vazão de projeto). Conforme observado os subcritérios relacionados a fundação, material e idade da barragem não são utilizados, fato que prejudica a determinação de uma categoria de risco mais coerente e aproximada da realidade da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR ISO 31000: Gestão de riscos — Princípios e diretrizes**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<https://gestravp.files.wordpress.com/2013/06/iso31000-gestc3a3o-de-riscos.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2016.

AGUIAR, D. P. O. **Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB**. 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Campinas, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000931969>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

ANA. **Relatório de Segurança de Barragens 2014**. 2015. Brasília-DF. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Seguranca/RSB_2014.pdf>. Acesso em: 09 out. 2015

AZAM, S. & LI, Q. **Tailings Dam Failures: a review of the last one hundred years. waste GeoTechnics**. 2010. Disponível em: <<http://www.infomine.com/library/publications/docs/Azam2010.pdf>> Acesso em: 13 maio 2016.

BAIMA, S. K. O. CAMPOS, J. N. B & SILVA, A. F. **Aplicação de uma metodologia Multicritério construtivista à avaliação da vulnerabilidade de barragens e regiões a jusante**. Revista Geotecnia, n. 136, p. 61-63. 2016. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/revistageotecnia/Revista136.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2016.

BRASIL. Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 set. 2010**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: 10 jan. 2016.

CNRH. **Resolução nº 143/2012**. Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwin6PPt6PDMAhWBG5AKHXIsBcoQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cnrh.gov.br%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D1635&usg=AFQjCNHDqeAqD2VwbZS_5Tv5nPhoCLCZ2w&bvm=bv.122676328,d.Y2I&cad=rja>. Acesso em: 11 jan. 2016.

COLLE, G. A. **Metodologias de análise de risco para classificação de Barragens segundo a segurança**. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade de Federal do Paraná, Paraná, 2008. Disponível em: <http://www.ppgerha.ufpr.br/publicacoes/dissertacoes/files/143Gisele_de_Andrade_Colle.pdf>. Acesso em: 12 maio 2016.

COMMONWEALTH OF AUSTRALIA. **Tailings Management**. 1. ed. Canberra: Minister for Industry, Tourism and Resources, 2007. 88 p. Disponível em: <<http://www.industry.gov.au/resource/Documents/LPSDP/LPSDPTailingsHandbook.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2016.

DNPM. **Portaria Nº 416, de 03 de setembro de 2012**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF. 2012.

DNPM. **Portaria Nº 526, de 09 de dezembro de 2013**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF. 2013.

DNPM. **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração dentro PNSB**. Brasília, DF. 2014a. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assuntos/barragens/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao>>. Acesso em: 11 mar. 2016.

DNPM. **Mapa das barragens de mineração classificadas dentro da Política Nacional de Segurança de Barragens - Database 04/2014**. Brasília, DF. 2014b. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assuntos/barragens/arquivosbarragens/barragens_brasil_inseridas_pnsb_2015>. Acesso em: 27 jan. 2016.

DNPM. **Arquivo em KML das barragens de mineração inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens - Database 04/2014**. Brasília, DF. 2014c. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assuntos/barragens/arquivos-barragens/sig-barragens-de-rejeito-google-earth_brasil_pnsb_2015.kmz>. Acesso em: 27 jan. 2016.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/502M.PDF>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

D'AGOSTINO, R. **Rompimento de barragem em Mariana: perguntas e respostas**. G1, São Paulo. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2015/11/rompimento-de-barragens-em-mariana-perguntas-e-respostas.html>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

ECKHOFF, R. K. **Explosion Hazards in the Process Industries**. 2. ed. Amsterdã: Elsevier Inc., 2016. 501–525 p. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128032732000116>>. Acesso em: 16 set. 2016.

EMERICH, D. **Omissão de mineradora causou rompimento de barragem em Itabirito**. O Tempo - Cidades, Minas Gerais. 2015. Disponível em:

<<http://www.otempo.com.br/cidades/omiss%C3%A3o-de-mineradora-causou-rompimento-de-barragem-em-itabirito-1.1193280>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

FEMA. Department of Homeland Security. **A progress report on the National Dam Safety Program (NDSP) for Fiscal Year 2008 through 2011**. Washington, D.C, 2013. 57 p. Disponível em: <<https://www.fema.gov/media-library-data/1402876995238-1c041ca9a4489ea27152c515ed72e38f/DamSafetyintheUnitedStates.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

FEMA. Department of Homeland Security. **Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management**. Washington, D.C, 2015. 49 p. Disponível em: <<https://www.fema.gov/th/media-library/assets/documents/101958>>. Acesso em: 23 set. 2016.

GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA. State Emergency Management Committee. **State Dam Risk Review - Report**. Western Australia, 2015. 34 p. Disponível em: <<https://www.semc.wa.gov.au/Documents/Resources/Reports%20and%20Reviews/Riziliens%20Dambreak%20Risk%20Assessment%20Report.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2016.

IBGE. **Áreas da Unidade Territorial**. Brasília, 2016. Webcart beta. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/webcart/default.php>>. Acesso em: 22 jun. 2016.

ICOLD. **Dam failures: statistical analysis**. Paris: ICOLD, 76 p. 1995. (Bulletin, 99).

ICOLD. **A guide to tailings dams and impoundments**. Paris: ICOLD, 244 p. 1996. (Bulletin, 106).

ICOLD. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences**. Paris: ICOLD, 144 p. 2001. (Bulletin, 121).

ICOLD. **Risk assessment in dam safety management: A reconnaissance of benefits, methods and current applications**. Paris: ICOLD, 281 p. 2005. (Bulletin, 130).

ICOLD. **Improving tailings dam safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure**. Paris: ICOLD, 180 p. 2011. (Bulletin, 139).

KASHECHEWAN FIRST NATION. **Report - Assessment of Dam Safety Risks and Dam Safety Management Requirements for the Kashechewan Ring Dyke**. Ontario, 2015. 102 p. Disponível em: <<https://assets.documentcloud.org/documents/1698852/dam-safety-assessment-report.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.

KEMP, D. WORDEN, S. & OWEN, J. R. **Differentiated social risk: Rebound dynamics and sustainability performance in mining**. Resources Policy, Michigan, v. 50, p. 19-26, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420716302574>>. Acesso em: 11 set. 2016.

KIERNAN, P. **Barragens de rejeitos colossais elevam risco de acidentes como o de Mariana**. 2016. Disponível em: <<http://br.wsj.com/articles/SB12041042963379023493704581641642142379206>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

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, Mainz, v. 51, p. 229-245, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292714002212>>. Acesso em: 12 set. 2016.

MAC. **A Guide to the Management of Tailing Facilities**. Ottawa: MAC, 68 p. 2011. (Second Edition, 2011). Disponível em: <<http://mining.ca/sites/default/files/documents/GuidetotheManagementofTailingsFacilities2011.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2016.

MELO, A. V. & FUSARO, T. C. **Avaliação de métodos de análise de riscos aplicados a barragens**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XXX., 2015, Foz do Iguaçu-PR. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/xxxsnbg/download/trabalhos_tecnicos/tema113/AVALIA%C3%87%C3%83O%20DE%20M%C3%89TODOS%20DE%20AN%C3%81LISE%20DE%20RISCOS%20APLICADOS%20A%20BARRAGENS.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

MELLO, F. M. & PIASENTIN, C. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. 1. ed., CBDB, Brasil. 2011.

NARDINI, E. **Riscos da atividade mineradora**. Revista Eletrônica Pré Univesp, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://pre.univesp.br/riscos-da-atividade-mineradora#.Vze3MFUrLIU>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

OLIVEIRA, J. C. **Gestão operacional das barragens de terra do complexo minerário das minas de ferro Carajás da Vale**. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2014. Disponível em: <http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/jose-carlos-dissertacao-mp.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2016.

OLIVEIRA, J. B. V. R. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens.** 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2010. Disponível em: <http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/jose-bernardo-v-r-oliveira.pdf>. Acesso em: 21 set. 2016.

PARDO, J. A. R. **Metodologia para análise e gestão de riscos em projetos de Pavimentos ferroviários.** 2009. 208 f. Dissertação. (Mestrado em Geotecnia), Minas Gerais, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2329/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_MetologiaAn%C3%A1liseGest%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

PEREIRA, F. M. S. **Gestão de riscos e plano de ações emergenciais aplicado à barragem de contenção de rejeitos casa de pedra/csn.** 2009. 183 f. Dissertação. (Mestrado em Geotecnia), Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2338>>. Acesso em: 1 fev. 2016.

PLATONOW, V. **Brasil tem 663 barragens de rejeitos de mineração, diz especialista. Agencia Brasil.** Brasília. 2015. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-11/brasil-tem-663-barragens-de-rejeitos-de-mineracao-diz-especialista>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

PYTEL, W. & GROTOWSKI, A. **Current practice in tailings ponds risk assessment.** Cuprum Ore Mining Scientific and Technical Magazine, Poland, v. 55, p. 5-42, 2010. Disponível em: <<http://www.czasopismo.cuprum.wroc.pl/journal-articles/view/9>>. Acesso em: 22 set. 2016.

G1 MG. **Rompimento de barreira em mina soterra trabalhadores em Itabirito.** G1, Minas Gerais. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2014/09/rompimento-de-barreira-soterra-veiculos-na-cidade-de-itabirito.html>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

SCHNITTER, N. J. **A History of Dams: the Useful Pyramids.** Rotterdam: Balkema, 1994.

SRIVASTAVA, A. **Generalized Event Tree Algorithm and Software for Dam Safety Risk Analysis.** 2008. 135 f. Tese. (Master Of Science in Civil and Environmental Engineering), Utah, 2008. Disponível em: <<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1031&context=etd>>. Acesso em: 21 set. 2016.

USBR. **Best practices in dam and levee safety Risk analysis.** Washington DC. 42 p. 2015. Disponível em: <<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html>>. Acesso em: 10 set. 2016.

VAUGHAN, E. J. VAUGHAN, T. M. **Fundamentals of Risk and Insurance**. 11. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 689 p.

VÉROL, A. P. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a Partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. 2010. 217 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/1-mestrado/81-2010?Itemid=>. Acesso em: 29 jun. 2016.