



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

## ESTUDO ACERCA DOS MÉTODOS DE CATEGORIZAÇÃO DE RISCO ASSOCIADOS A GESTÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS

*Dioney Antonio Romeiro<sup>1</sup>, Ludimila de Andrade Silva<sup>2</sup>*

### RESUMO

O presente trabalho busca apresentar a definição e conceitos associados a utilização de barragens, focado na comparação dos métodos de construção destas estruturas para contenção de rejeitos e apresenta uma discussão acerca dos métodos de categorização de riscos aos quais as obras estão sujeitas. A metodologia utilizada foi uma revisão bibliográfica sistemática com foco de pesquisa em artigos e teses recentes acerca do tema para a fundamentação teórica deste artigo científico, avaliando e comparando os métodos de construção de barragens de acordo com sua função, material e fundação. Fez-se uma revisão literária acerca dos métodos disponíveis na bibliografia para classificação das barragens quanto ao risco a fim de compará-los e discutir as vantagens e desvantagens dessas ferramentas utilizadas no processo de gestão de risco de barragens. Dentre os itens discutidos, pode-se avaliar por meio de análises de viabilidade estrutural que o barramento à jusante é o mais indicado para contenção de rejeitos de mineração, no entanto, o mais utilizado em território nacional é o método à montante, com cerca de 88 barragens registradas. Além disso, segundo o método de classificação de risco adotado em território nacional, descrito na Resolução nº 143 (CNRH, 2012), 43 destas barragens são classificadas como de alto dano potencial associado. O estudo revelou ainda, que a maioria (72) barragens são classificadas na categoria de baixo risco, assim como a barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, que se rompeu.

**PALAVRAS-CHAVE:** barragens de rejeitos; métodos de construção; métodos de categorização de risco.

### ABSTRACT

This piece of work intends to present the definition and concepts associated to the usage of dams, focused in the comparison of the methods applied to build these structures in order to contain tailings, and brings a discussion on the methods to categorize the risks that the constructions are subject to. The methodology adopted was a systematic bibliographic review focusing on recent articles and thesis research on the subject to this scientific article's theoretical foundation, evaluating and comparing dam construction methods according to its function, materials and foundation. A literary review has been done on the available methods in bibliography related to dam classification regarding their risks in order to compare them and discuss the advantages and disadvantages of these tools used in the dam risk management process. Amongst the items discussed, it's possible to evaluate by structural viability analysis that the downstream dam method is more indicated to mining tailings contention, however, upstream method is more used in national territory, with around 88 registered dams. Besides that, according to the risk classification method adopted in the national territory, described in Resolution number 143 (CNRH, 2012), 43 of these dams are classified as high associated potential risk. The study yet reveals that the majority (72) of these dams are classified in the low risk category, as the Córrego de Feijão dam, in Brumadinho (MG), that has collapsed.

**KEY WORDS:** tailings dam; construction methods; construction methods.

### INTRODUÇÃO

<sup>1</sup> Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG. E-mail: engenheirodioney@hotmail.com

<sup>2</sup> Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG. E-mail: ludimiladeandrade@hotmail.com



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

A técnica de aplicação de barragens não é uma atividade recente. Sabe-se que a prática de construção de barragens está presente desde a antiguidade, quando os povos faziam uso das mesmas para a criação de reservatórios de água para abastecimento, irrigação e desvio de cursos d'água. Em âmbito global é perceptível, diante a ampla divulgação do tema, um avanço quanto aos tipos de barramentos de acordo com os respectivos usos, podendo ser eles para fins energéticos, suporte de aterros, reservatórios de água, para retenção de rejeitos e outros, considerando fatores de acordo com sua infraestrutura e resistência. (MOREIRA, 2012).

Neste contexto, é importante se ter em mente os critérios gerais para a classificação de barragens, com base em seu conceito e categoria de risco, conforme o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) por meio da lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010, em seu artigo 2º, dispõe em seu inciso I, que barragem é “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquido e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

Indiscutivelmente, as barragens possuem um considerável potencial de risco, incluindo seus reservatórios, que devem ser tratados com atenção, considerando que seus possíveis efeitos, quando existentes, são danosos para o setor ambiental, social e econômico. Esses episódios podem ser provocados tanto por inadequações operacionais quanto por falha na execução, manutenção e fiscalização, em que incidentes incumbem em prejuízos consideráveis (DUARTE, 2008).

Piasentin (2015) ressaltou em sua discussão quanto à segurança das barragens, que as mesmas devem receber atenção, desde a concepção geral do projeto, onde o arranjo e o dimensionamento das estruturas são essenciais para a eficiência da obra, levantando dados geológicos/geotécnicos que contribuem para a determinação do tipo de barragem no que se refere às fundações e aos materiais de construção, até a manutenção das mesmas.

Dentre as diversas finalidades da aplicação de barragens, a contenção de rejeitos de mineração se destaca, uma vez que são conhecidas por seu impacto ambiental alarmante. Cardozo, Pimenta e Zingano (2016) explanam em sua obra três métodos



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

básicos para a construção para barragens de rejeitos: o método da jusante, o método de montante e o método da linha de centro. Estes autores explanam a respeito dos efeitos desses métodos sobre as obras, ressaltando que, embora se cumpra as determinações contidas na legislação e se aplique as técnicas atreladas ao desenvolvimento de tecnologias, barragens sobre esses regimes ainda apresentam problemas que acarretam em rompimentos e prejuízos ambientais e socioeconômicos.

O Brasil é considerado um país com abundância hídrica e a preservação desta riqueza natural é uma das pautas mais discutidas no cenário nacional por ambientalistas. Neste contexto, a mineração, setor de grande influência na economia brasileira, confere um grande risco potencial de contaminação das águas, fato este fortemente discutido recentemente pela recorrência de rompimentos da barragem de rejeitos de Fundão da empresa Samarco, em 2015, na cidade de Mariana-MG e a barragem controlada pela Vale S.A na região de Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, no início do ano de 2019, nos quais, além dos prejuízos ambientais, houve um alto número de vidas perdidas.

Visto a importância do estudo das barragens, por meio de análise de risco, o presente trabalho buscou, a partir de revisão bibliográfica sistemática, compreender como é feita a análise de risco de barragens de contenção de rejeitos, especialmente em âmbito nacional, comparando os métodos aplicados à gestão de segurança de barragens e identificando as divergências, bem como as vantagens e desvantagens de cada um.

## REFERENCIAL TEÓRICO

As barragens possuem diversos métodos de construção, que estão diretamente ligados a sua função, que consideram a geologia local, assim como a topografia, a hidrologia e hidráulica. Ademais, é importante analisar o que o barramento pretende sustentar e o ambiente o qual será construída. Antes de se iniciar a construção destas estruturas se deve realizar um estudo quanto a viabilidade técnica que aborda diversas características do local, como a permeabilidade do terreno, a estabilidade estrutural e a resistência ao corte/deformação (COSTA, 2016).

Moreira (2012) ressalta que as barragens podem ser classificadas de acordo com o material em que são construídas, suas dimensões, sua estrutura (podendo ser em forma



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

de arco, de gravidade ou contrafortes) e capacidade de armazenamento. Assim como Costa (2016), o autor também ressalta que a importância de se conhecer o material ao qual o barramento será submetido, pois este pode ser de princípio hídrico, rejeitos com efluentes químicos, resíduos com solo ou materiais que contribuem para a deterioração do material que será empregado na construção.

Comumente, as barragens são classificadas, para estudo e gestão, em barragens convencionais e barragens de contenção de rejeitos. Mesmo havendo muitas práticas e metodologias de manejo que se aplicam para ambos os tipos de barramentos, existem alguns fatores que os tornam expressivamente distintos, havendo exceções de algumas práticas para determinados tipos de barragem.

Duarte (2008) cita que Szymanski (1999) aborda barragens para contenção de rejeitos como caracteristicamente instaladas por estágios, diferentemente das convencionais, as quais são construídas em um único estágio, sendo de rápida conclusão. Por esse motivo, as barragens de contenção de rejeitos sofrem constantes alterações, que modificam seu acréscimo em um vetor de ordem crescente de acordo com o aditivo dos rejeitos no alicerce do reservatório ao decorrer do período de construção. Assim, necessita constantemente de reavaliações de sua resistência para segurança, não se obtendo estabilidade fixa até o findar da obra.

Outro ponto destacado são que as barragens convencionais são, geralmente, aplicadas para geração de energia em hidrelétricas, abastecimento de água, entre outras aplicações que envolvem mais recursos hídricos. Sob essa perspectiva, a implementação da mesma recebe um elevado padrão de cuidado, com métodos de manutenção que dispõem de atenção por parte dos envolvidos, comumente recebendo cuidados de uma equipe própria. Em contrapartida, as barragens responsáveis pela contenção de rejeitos, podem acabar sendo tratadas como edificações improdutivas, não recebendo tanta atenção, contribuindo para o risco de patologias nessas obras ocasionando o rompimento das mesmas e, conseqüentemente, drásticos problemas ambientais, sociais e econômicos (SZYMANSKI, 1999 *apud* DUARTE, 2008).

Ainda em relação as distinções de barragens de rejeitos e convencionais, vale destacar que os barramentos de contenção de rejeitos, na maioria maçante de ocasiões,



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

são responsáveis por reterem materiais sólidos e água, por vezes contaminada devido a mistura de materiais recorrentes de processos industriais e de mineração (SZYMANSKI, 1999 *apud* DUARTE, 2008).

No Brasil, por exemplo, há um grande número de construções de barramentos de rejeitos, resultado do processo de beneficiamento do minério e que contêm alto grau de toxicidade, metais pesados, reagentes e partículas em suspensão. O cenário do país é atrativo, tanto para empresas nacionais quanto multinacionais, em decorrência da riqueza mineral que possui. Lozano (2006) destaca que os resíduos sólidos da mineração representam um dos atores que potencialmente geram maior impacto ambiental, agravado pela falta de controle em relação a legislação ambiental de alguns países, pois esta atividade interfere nos ecossistemas e nas comunidades, exigindo fortemente das empresas investimentos no controle e manutenção destes projetos desde a construção até a mitigação ambiental.

O autor salienta que a vida útil de uma barragem de rejeitos está associada a cinco pontos principais: local, projeto de instalação, construção, operação e o fechamento definitivo. Traz, ainda, a reflexão de que os custos gerados por um eventual acidente são muito maiores do que os custos para minimizar o problema, como os estudos preliminares, supervisão e engenharia de projeto. A gestão destes barramentos é, portanto, de extrema importância (LOZANO, 2006).

Em relação a funcionalidade, as barragens de contenção de rejeitos são construções instaladas para refrear os materiais resultantes do processo de beneficiamento do minério, apresentando em geral resíduos agressivos ao meio ambiente. A construção dessas barragens depende de metodologias que se dispõem em estágios. Tendo em vista esses conceitos, Cardozo, Pimenta e Zingano (2016) esclarecem e explanam a respeito de três métodos básicos para a construção para barragens de rejeitos: métodos de montante, da jusante e o da linha de centro.

O método da montante consiste em uma construção e um alteamento da barragem de modo a estar sempre à montante (parte superior) sobre o rejeito já solidificado. Desse modo, se forma uma espécie de dique inicial e uma parte determinada como praia de rejeito, não consolidando a fundação do terreno. Esse método é abordado pela maior parte das



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

mineradoras no Brasil e atesta um baixo controle construtivo, deixando uma lacuna no quesito segurança (ARAÚJO, 2006). Esse método ainda possui algumas limitações, entre elas o fato de não ser recomendado para armazenamento de grandes volumes de água, alteamento com menos de 10 m/ano, possuindo baixa resistência a abalos sísmicos, baixa segurança e sendo muito propenso para o efeito de “*piping*” e liquefação de acordo com sua drenagem. Sua viabilidade se estima no baixo custo de construção, sendo aplicável em áreas com restrições, com descarga de rejeitos e modo periférico e baixa densidade, dificultando a segregação dos resíduos ali contidos (CARDOZO, PIMENTA E ZINGANO, 2016).

O método da jusante se refere à formação de construções e alteamentos posteriores (sem restrições) da barragem estando à jusante (direção em que correm as águas da corrente fluvial). É um método de barragem de rejeitos que escalona a obra de modo a não comprometer sua resistência, apresentando baixa tendência a liquefação e é considerado de operação simples. O mesmo suporta qualquer tipo de rejeito, o que o torna muito recomendado, com boa capacidade de armazenar água, maior segurança incluindo a alta resistência a abalos sísmicos. Sua maior desvantagem, entretanto, é o elevado custo de execução por necessitar de muito material para subsídio do talude (CARDOZO, PIMENTA E ZINGANO, 2016).

Quanto ao método da jusante, Amorim (2007), destaca que com a utilização do referido método, o eixo da barragem se desloca para jusante à medida que esta sofre alteamentos, impossibilitando alteamentos sobre a praia de rejeitos e tornando o barramento mais seguro.

No método linha de centro, a construção e o alteamento da barragem está disposta tanto à posição montante quanto à jusante, de modo a compor um eixo vertical que leva o nome do método. Nesse caso o rejeito é depositado perante a montante e disposto de modo a se impor sobre a própria barragem, localizado à posição jusante. Dessa forma, essa metodologia é caracterizada por mitigar algumas desvantagens que surgem ao comparar os métodos anteriormente propostos. Nele, o rejeito pode ter textura arenosa ou lamacenta com baixa plasticidade, incluindo ainda um armazenamento de água e resistência a abalos sísmicos aceitáveis e seus alteamentos com poucas restrições e flexibilidade na



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

construção. Entretanto, um impasse desse método é o fato que ele depende diretamente de uma boa drenagem, para que o sistema de linha de centro funcione adequadamente, por conta do seu eixo vertical (CARDOZO, PIMENTA E ZINGANO, 2016).

Neste sentido, o método linha de centro é uma alternativa entre o método da montante e o método da jusante, sendo àquele uma variação deste, em que o eixo da barragem se descola verticalmente à medida que sofre alteamentos e apresenta custo intermediário, necessitando de menores volumes (AMORIM, 2007).

Cardozo, Pimenta e Zingano (2016) relatam, ainda, a influência direta dos drenos nas três metodologias construtivas apontadas. Estas estruturas são responsáveis por evitar sobrecarga de poros nas barragens. As forças de poropressão são forças que seguem rumo ao movimento, acompanhando o mesmo. Se por ventura houver falhas neste sistema de drenagem quanto ao direcionamento do fluxo de efluente que se choca com a barragem pode-se ter o fenômeno denominado como "*piping*", sendo esse o efeito que tem origem a erosão interna, acarretando na formação de veredas tubulares internas ao solo, além de assoreamentos em algumas áreas e erosão grave em outras, comprometendo a obra e a coesão do solo.

Barragens de rejeitos são suscetíveis a acidentes e incidentes, por enésimos motivos, onde fatores incumbem em ações que degradam o barramento. Assim, Piasentin (2015) determinou como acidente de barragem a ruptura da mesma, de forma direta. Por outro lado, o autor dispõe que pode ser classificado como incidentes quaisquer ocorrências proeminentes de que poderiam incumbir na ruptura do barramento. Desse modo, os incidentes transcorrem pela presença de anomalias ou deterioração repentina na obra. Quando há o rompimento, os danos ambientais, sociais e econômicos são gritantes, por conta da vasta capacidade de destruição e contaminação a qual os rejeitos alcançam.

Diante de um cenário de mineração atual contrastado com o número de acidentes registrados, é importante realizar a gestão de risco para avaliar a situação de operação destas estruturas, a fim de minimizar o impacto socioambiental e prevenir tragédias como as que, infelizmente, assolaram a comunidade brasileira. Segundo Icold (2011) *apud* Pereira (2016), o primeiro passo é compreender a definição de risco, que para o autor é definido como sendo a possibilidade de algo acontecer, sendo produto de uma análise



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

probabilística e consequencial.

Pereira (2016) ainda destaca que para o território nacional, as legislações que amparam a classificação de risco das barragens e determina a fiscalização das mesmas, a lei 12.334 (BRASIL, 2010), que trata sobre a política nacional de segurança de barragens, e a Resolução nº 143 (CNRH, 2012), que versa sobre critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, não há definição de risco. Porém, a 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, sem a avaliação da dimensão probabilística, diferentemente da abordagem realizada em alguns países. Torna-se, portanto, imprescindível compreender as metodologias que são aplicadas para classificação de risco das barragens de contenção de rejeito no país e discutir as diferenças dos métodos trazidos nas bibliografias a fim de verificar a eficiência dos mesmos e identificar as falhas existentes no processo de gestão aplicado à essas barragens, uma vez que acidentes catastróficos ainda acontecem neste setor (PEREIRA, 2016).

## **METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para a realização do presente trabalho foi, inicialmente, uma pesquisa científica sobre o tema em sites especializados, artigos, teses de mestrado e doutorado e livros da área, abordando as diferentes técnicas de construção das barragens, classificação dos tipos de barragem quanto a estrutura e aos materiais de construção e retenção.

Em seguida, realizou-se um estudo acerca da análise de risco dos barramentos de contenção de rejeitos, de acordo com as informações trazidas nas obras de dissertação de Duarte (2008), Espósito e Duarte (2010), na tese de mestrado desenvolvida por Pereira (2016) e Melo e Fusaro (2015). Além disso, foram levantados dados recentes acerca da classificação das barragens em território nacional quanto ao método de construção e risco proeminente.

Estas bibliografias permitiram avaliar, com base na análise de risco efetuada pelos autores, os possíveis impactos socioambientais gerados pelo rompimento de barramentos



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

à contenção de rejeitos no país, considerando, ainda, como parâmetro de análise a legislação vigente quanto às barragens do Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação ao método de construção das barragens de rejeitos no Brasil, segundo levantamento recente da Agência Nacional de Mineração (ANM), dentre as 717 barragens de rejeitos de mineração do país, 88 barragens são listadas com o método à montante ou desconhecido, mesma estrutura das barragens de Mariana-MG e Brumadinho-MG, que caracterizaram umas das maiores tragédias brasileiras. Este método, conforme observado no referencial teórico apresentado, embora seja bastante comum e mais barato é o mais obsoleto e inseguro. Dentre as 88 barragens citadas, 43 são classificadas como barragens de alto dano potencial associado, ou seja, estruturas consideradas arriscadas no que se refere ao que pode acontecer em caso de rompimento ou mau funcionamento de uma barragem. Essa classificação leva em conta as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

Além de classificar o dano potencial, a ANM também categoriza as barragens de acordo com o risco de ocorrência de acidente. Entre as 88 barragens que têm método de construção de "alçamento à montante ou desconhecido", 12 são consideradas de médio risco. A maioria (72) é categorizada como estrutura de baixo risco, a mesma classificação da barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, que se rompeu.

Em relação a Gestão de Risco de barragens de contenção de rejeitos, Melo e Fusaro (2015) e Pereira (2016) relatam ferramentas não muito distantes. Para Melo e Fusaro (2015) a gestão de risco consiste na aplicação sistemática, coordenada e integrada de três atividades principais:

1. Identificação de riscos (*Risk identification*): consiste no processo de busca, reconhecimento e descrição de riscos. Esta etapa envolve a identificação das fontes de risco, eventos, suas causas e suas consequências potenciais, seja pelo estudo de dados históricos, análises teóricas, ou até mesmo coleta de opiniões de pessoas informadas e especialistas no assunto, bem como as necessidades das partes interessadas;

2. Análise de riscos (*Risk analysis*): consiste no processo de compreender a natureza



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

do risco e determinar a magnitude de um risco expressa em termos da combinação, na maioria dos métodos, das consequências e de suas probabilidades;

3. Avaliação de riscos (*Risk evaluation*): este último processo compreende a fase de comparação dos resultados da análise de riscos com os critérios de riscos para determinar se o risco e/ou sua magnitude é aceitável ou tolerável.

Contudo, para Pereira (2016), a análise de risco é a porção do processo em que é feita não somente uma estimativa quantitativa ou qualitativa da probabilidade de ocorrência e a magnitude das consequências destes potenciais acontecimentos, mas compreende também a fase em que os possíveis modos de falha, desempenho estrutural, e as consequências adversas são identificadas.

De modo geral, no âmbito internacional, as bibliografias levantadas destacam a falta de uma legislação de barragens de contenção de rejeitos em diversos países. Os autores destacam ainda, que não há uma padronização no que diz respeito aos métodos de classificação e fiscalização, o que força a cada país criar seus próprios critérios de acordo com seu histórico de desenvolvimento e características locais.

Duarte (2008) reflete sobre um cenário encontrado no Brasil, em que as barragens de contenção de rejeitos, em sua maioria, são operadas pela própria companhia de mineração e supervisionada pelas autoridades de mineração do Estado. Por isso, a segurança destas barragens muitas vezes fica em segundo plano, já que estas autoridades têm outras tarefas a cumprir, como avaliar a produção, o meio ambiente e a segurança no trabalho, dentre outras.

Neste contexto, considerando a falha processual tanto nas competências do Estado como referente a responsabilidade socioambiental da mineradora, é importante discutir que a falta de legislação padronizada, realidade de diversos países, é um agravante. No entanto, a regulamentação referente a contenção e armazenamento de rejeitos deve ser adaptável a cada local de acordo com as variações físicas, técnicas e sociais. O modelo deve ser flexível às mudanças futuras, além de apresentar eficácia na identificação dos riscos e das mudanças de classificação dos potenciais riscos e perigos, considerando que as barragens de rejeitos sofrem alterações com o passar do tempo de vida útil e até mesmo depois de encerradas as atividades de deposição.



Em suma, nas bibliografias estudadas, a ferramenta de análise de riscos, integrante do processo de gestão, é pautada em alguns critérios básicos, tais como: a altura (com relação ao nível da terra ou da fundação), o nível de água, o volume do reservatório, o mapa de inundação e o comprimento da crista, podendo ser de abordagem quantitativa ou qualitativa. Neste sentido, existem vários métodos passíveis de serem utilizados para análise de riscos. Pereira (2016), por exemplo, traz que em outro estudo realizado por Eckhoff (2016) o autor apresenta 37 métodos diferentes.

Conforme citado por Pereira (2016), há 6 métodos principais, considerados pelo autor como os que melhor se adequam a barragens, indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Métodos de análise de risco para contenção de barragens de rejeitos

| <b>MÉTODO</b>  | <b>TIPO DE ABORDAGEM</b>                   | <b>DEFINIÇÃO</b>  |
|--|--|---|
| <b>HAZOP (Análise dos Perigos e da Operacionalidade)</b>                     | Análise qualitativa                        | Instiga os participantes a identificar possíveis riscos e contratempos de operabilidade, permitindo a identificação e avaliação de possíveis riscos ou falhas em operações.   |
| <b>FMEA (Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos)</b>                  | Análise qualitativa                        | Compreende os possíveis modos de ruptura de um sistema e avalia o comportamento global do mesmo. Possibilidade de intervenção prévia para correção das falhas determinadas, a fim de minimizar ou eliminar os riscos. |
| <b>FMECA (Análise da criticidade, dos Modos de Falha e dos seus Efeitos)</b> | Análise qualitativa quanto a criticidade   | Identifica de modo sistemático as possíveis maneiras que uma planta de processo falhar. Ordena os modos de ruptura e recomenda para a tomada de medidas preventivas e mitigadoras.                                    |
| <b>ETA (Análise por Árvore de Eventos)</b>                                   | Análise quantitativa                       | Modela os possíveis resultados de um evento inicial, por uma árvore de eventos. Identificam todas as possíveis consequências e probabilidades.  |
| <b>FTA (Análise por Árvore de Falhas)</b>                                    | Análise quantitativa de sistemas complexos | Identifica, inicialmente, os possíveis modos de falhas. Denominam de “eventos de topo” falhas que potencializam uma ação, incluindo fatores causais da  |



|   |   |   |
|---|---|---|
|   |   | parte inferior da árvore, sendo simples para que as frequências de ocorrência possam ser estimadas.   |
| <b>Noeud Papillon (Nó de Borboleta)</b> | Análise quantitativa (junção dos dois métodos anteriores) | Faz a união de dois métodos através de um ponto central. O caso central demonstra a falha do sistema por meio também do método da Árvore de Falhas à esquerda e à direita, que utiliza Árvore de Eventos. |

Fonte: Pereira (2016) - Adaptado

Diante o levantamento bibliográfico realizado, é possível observar que existem mais análises qualitativas, baseadas na descrição e ordenação número a fim de representar a magnitude da possibilidade de ocorrência e magnitude das potenciais consequências, do que análises quantitativas, caracterizadas por tratar incertezas dos modelos e parâmetros de forma explícita, utilizando-se distribuições de probabilidade para descrição do sistema. Ademais, segundo Melo e Fusaro (2015) os métodos quantitativos são mais elaborados e consistentes, normalmente derivados de outros métodos já existentes aplicados a outros setores, sendo adaptados para o estudo de barragens de rejeitos.

Uma outra metodologia, desenvolvida por Menescal et al (2001), foi detalhada por Duarte (2008), e aplicada na avaliação de 124 relatórios de auditoria técnica de barragens por Espósito e Duarte (2010). Esta avaliação qualitativa do potencial de risco é pautada em três fatores: Periculosidade (P): descrição relativa a parâmetros intrínsecos da barragem ou características técnicas do projeto; Vulnerabilidade (V): descrição associados ao estado atual da barragem; e Importância (I): descrição referente à consequência de uma eventual ruptura da barragem.

No Brasil, segundo Duarte (2008), o Ministério da Integração Nacional, juntamente com a Agência Nacional de Águas (ANA) e com a Secretaria de Infraestrutura Hídrica (SIH), estavam em um processo de ascensão na busca por eficientes ações para prevenir e minimizar os riscos de acidentes com barragens em todo o país. Para o autor é perceptível os esforços dos estados, municípios e proprietários, juntamente com o Governo Federal, na realização de levantamentos para acompanhar permanente e sistematicamente a situação dessas obras, já concluídas ou em andamento. Assim como a cooperação de órgãos da administração federal, governos estaduais e agentes da iniciativa privada no processo de cadastramento e avaliação da situação das construções (DUARTE, 2008).



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

Duarte (2008) destaca, ainda, que os acidentes ocorridos até o ano de 2008 fomentaram discussões a respeito da segurança das barragens de contenção de rejeitos, provocando a criação de diversos projetos de leis como o Projeto de Lei no 1.181 (BRASIL, 2003), a Deliberação Normativa nº 62 (COPAM, 2002) criada em Minas Gerais, estado que concentra grande número de mineradoras, com intuito de minimizar os riscos e, posteriormente, a Resolução nº 143 (CNRH, 2012) que contém o método utilizado no Brasil atualmente para classificação das barragens quanto ao risco.

No entanto, como visto na história do país, o processo de gestão apesar de estar evoluindo em relação aos amparos legislativos que norteiam a fiscalização destas barragens, ainda há falhas que estão acarretando grandes tragédias ambientais e sociais.

Pereira (2016) salienta que 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. Contudo, a barragem do Fundão, anteriormente citada, apresentou, segundo a Classificação Nacional de Barragens de Mineração, categoria de risco baixo o que coloca em questão a eficiência da metodologia.

Esse método, tratado também por Melo e Fusaro (2015), está previsto na Resolução nº143 (CNRH, 2012) em consonância com a Lei 12.334 (BRASIL, 2010), no qual foi estabelecido que o critério de categoria de risco esteja alicerçado em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Desse modo, a classificação é feita pelo órgão fiscalizador que, no Brasil, é o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, considerando a altura do barramento, comprimento do coroamento da barragem, tipo de barragem quanto ao material de construção, procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento, tipo de fundação da barragem, idade da barragem e o tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro.

Para isso, a Resolução traz três matrizes que facilitam o processo de gestão e classificação de barragens de rejeitos. Na primeira matriz de classificação estão relacionadas as características técnicas da barragem: altura, comprimento e vazão de



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

projeto. Os dados coletados neste critério equivalem a vinte por cento (20%) da pontuação máxima que é utilizada para classificar a barragem.

Na segunda matriz, que possui um peso de quarenta por cento (40%) da pontuação máxima, estão relacionados os quesitos associados ao estado de conservação da barragem: confiabilidade das estruturas extravasoras, percolação, deformações e recalques e deterioração dos taludes.

Por fim, a terceira matriz, que também possui peso de quarenta por cento (40%) da pontuação máxima, tem os pontos avaliados referentes ao atendimento do plano de segurança da barragem. Os critérios avaliados são: documentação de projeto, estrutura organizacional e qualificação dos profissionais na equipe de segurança da barragem, manuais de procedimentos para inspeções de segurança e monitoramento, Plano de Ação Emergencial (PAE), relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e análise de segurança.

A barragem é classificada de alto risco, se obtiver pontuação maior ou igual a 60 no somatório simples das pontuações obtidas nas três matrizes ou ser avaliada em um dos critérios da segunda matriz com pontuação igual 10. Se analisada essa classificação de um ponto de vista probabilístico e consequencial, as consequências são dadas pela categoria de dano potencial, em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes da ruptura da barragem, além do volume do reservatório.

Melo e Fusaro (2015) discutem um paradoxo interessante no qual, apesar da maior vantagem das análises de riscos ser a possibilidade de sistematizar o processo de identificação dos riscos através das análises de campo e acompanhamento das ações de resposta do sistema avaliado, o controle está pautado apenas em uma ferramenta formal de análise. Os autores reforçam a importância de se compreender que a estimativa do risco é simplesmente uma representação matemática do estado atual conhecido da barragem e da confiança do seu desempenho no futuro, não sendo característica física intrínseca a estrutura.

Neste contexto, o papel do engenheiro se torna fundamental no processo de gestão de barragens de rejeitos, considerando que, nos métodos qualitativos de análise de risco,



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

os fenômenos físicos são entendidos a partir das descrições qualitativas feitas por um responsável técnico baseados no julgamento da engenharia. Os métodos servem como diretrizes que facilitam a descrição do estado de risco destas estruturas direcionando o julgamento do profissional a partir de todo o conhecimento técnico e experiência que este tenha, como relata Melo e Fusaro (2015):

“O julgamento de engenharia (qualitativo), apesar de muitas vezes ser considerado frágil por refletir o conhecimento de que se dispõe sobre os aspectos avaliados, é um método formalmente reconhecido para estimativa das probabilidades de falha nas análises de risco. O risco, nesse caso, é definido sem caracterizar a incerteza em uma forma matemática. Em resumo, o valor numérico obtido para um risco deve ser sempre usado com precaução, face às incertezas existentes e limitações os métodos de análise” (MELO E FUSARO, 2015, p.18).

De maneira geral, todas as bibliografias estudadas acordam no fato de os métodos baseados em índices de riscos e matrizes de classificação, como a utilizada no Brasil pela portaria nº 143 (CNRH, 2012), tendem a uma análise realizada de forma mais global, com os descritores bem generalistas. Mesmo que apresentem uma ferramenta de avaliação preliminar, estas técnicas constituem um importante artifício para classificação de barragens e devem integrar qualquer programa de gestão de segurança.

Embora as probabilidades de ruptura de barragem sejam extremamente baixas, acarretando em valores de risco também baixos, a consequência de um rompimento é catastrófica. Em Mariana, cidade localizada em Minas Gerais, o rompimento da barragem comandada pela Samarco, configurou-se em um “desastre socioambiental de proporções nunca antes vista na história da mineração brasileira e mundial” (LOPES, 2016. p.7) . Os efeitos gerados serão refletidos por décadas e gerações, principalmente às comunidades localizadas na região da bacia hidrográfica do Rio Doce, cujo mais de 600 km de cursos d’água foram afetados e contaminados pela lama de resíduos da mineração, comprometendo a qualidade das águas, a ictiofauna e a biodiversidade aquática, visto que algumas perdas serão irreversíveis diante a possibilidade de extinção de algumas espécies endêmicas.

O distrito próximo ao rompimento, Bento Rodrigues com população estimada em 612 habitantes, foi o primeiro a receber o impacto da onda de rejeitos e devido a violência com que foi atingido pelo mar de lama simplesmente desapareceu. Como resultado, todos os sobreviventes ficaram desabrigados e o número de mortes chegou a dezessete.



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

O impacto social e ambiental deste acidente que teve proporções alarmantes e a mensuração de todos prejuízos levará anos de estudo, acidente este que chocou o Brasil e o mundo. Contudo, cerca de quatro anos após a referida tragédia em Mariana-MG, Brumadinho-MG, sofreu impactos de um evento semelhante.

Neste, considerado por especialistas de menor impacto ambiental se comparado ao rompimento da barragem de Mariana, o número de mortes até o momento é de 216 pessoas identificadas. Ainda continuam desaparecidas 89 pessoas.

O cenário requer atenção, pois decisões de “aceitação do risco” em situações indesejáveis como as citadas, podem acarretar em novas tragédias. Por isso, as análises de risco, sejam elas quantitativas ou qualitativas, devem estar associadas a critérios de aceitabilidade ou tolerabilidade que considerem além do caráter probabilístico, a avaliação do número de pessoas impactadas por uma eventual ruptura da barragem, além das consequências econômicas e ambientais (MELO E FUSARO, 2015).

## CONCLUSÃO

Através da pesquisa realizada, foi possível conhecer os conceitos de gestão de risco no que diz respeito a métodos de construção de barragens e os efeitos da aplicação dessas metodologias no sistema, atrelados a demandas sociais presentes na atualidade, de modo a gerir as decisões a serem tomadas com bases em parâmetros e responsabilidades. Foi possível abordar ainda a utilização das análises de risco como ferramentas de grande importância no processo de gestão de segurança de barragens, onde a probabilidade de ocorrer falhas pode ser prevista, assim como a consequência que há de proporcionar.

Por meio de análises dos métodos abordados, percebeu-se que não há um método aplicável de forma única que atue sobre todo e qualquer estudo de risco ao se tratar de barragens, mas as análises qualitativas de portfólio de barragens que se decorrem por índices de risco e matrizes de classificação fornecem subsídio para se classificar as estruturas com base no risco que proporcionam, mesmo sendo considerado um método subjetivo e simples.

Contudo, é nítida a existência de falha no processo de classificação e fiscalização de barragens de rejeitos no Brasil, sendo os rompimentos ocorridos nas cidades de Minas



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

Gerais fortes argumentos desta discussão. Ademais, o conceito de risco aplicado pelo DNPM é definido, somente, segundo a dimensão probabilística e a falta de uma análise do âmbito de consequências potenciais reduz a eficiência do método.

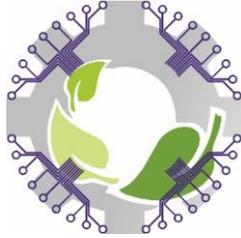
Na metodologia de classificação de barragens de mineração por categoria de risco que é atualmente regulamentada pela Resolução nº 143 (CNRH, 2012), possui uma notória discordância, pois logo no primeiro inciso são definidos seis subcritérios para avaliação de barragens utilizadas no setor de mineração, sendo elas: a altura, comprimento, vazão de projeto, tipo de fundação, tipo de barragem quanto ao material de construção e idade da barragem. No entanto, nos anexos, as matrizes disponíveis para aplicação da metodologia fazem uso apenas dos três primeiros subcritérios. A aplicação dos demais subcritérios citados inciso I, fortaleceriam a categorização de risco, tornando-a mais coerente.

Neste viés, destacou-se ao longo desta pesquisa, de cunho científico, a importância de se fazer uso de métodos de análises de riscos, com destaque para os empreendedores de barragens, com a finalidade de estabelecer previsões de riscos e assim desenvolver ações mitigadoras para esses efeitos. É notável, ainda, que uma metodologia integrada de avaliação, que envolvem desde os métodos mais estruturados aos mais expeditos, acaba por se tornar um parâmetro útil mediante o tempo requerido para se realizar análises de riscos mais complexas, fora os custos envolvidos.

Por fim, o conhecimento dessas metodologias é fundamental para contribuição do exercício profissional do engenheiro que avalia as barragens de rejeitos e determina as condições atuais, bem como os potenciais danos futuros mediante as decisões a serem adotadas. As informações contidas nesse trabalho corroboram para a fundamentação de bases teóricas mais sólidas e concisas, ajudando, ainda, na avaliação de diferentes possibilidades de ações de mitigação de riscos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Enio Fernandes. **Efeitos do Processo de Deposição no Comportamento de Rejeitos da Mineração de Ouro**. 2007. 125p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília-DF.



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

ARAÚJO, Cecília B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Congresso Nacional. **Projeto de Lei no 1.181 de 2003.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, Brasília, DF.

BRASIL. Congresso Nacional. **Projeto de Lei nº 12.334/2010.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, Brasília, DF. 2010.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. **Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão.** HOLOS, v. 8, p. 77-85, 2016.

CNRH. **Resolução nº 143/2012.** Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. **Deliberação Normativa Nº 62.** Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais, 17 de dezembro de 2002. 9 p.

COSTA, Walter Duarte. Geologia de barragens. Oficina de Textos, 2016.

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

DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2008.

ESPÓSITO, Terezinha de Jesus; DUARTE, Anderson Pires. **Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, n. 2, 2010.

LOPES, Luciano M. N. **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais** Sinapse Múltipla, 5 (1), jun 1-14, 2016. Disponível em <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla>>. Acesso em 06 de março de 2019.

LOZANO, F.A.E. (2006). **Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, SP. 128 p.

MELO, Alexandre Vaz de; FUSARO, Teresa Cristina. **Avaliação de Métodos de Análise de Riscos Aplicados a Barragens.** XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, v. 20, 2015.



# ETIS

Journal of Engineering,  
Technology, Innovation  
and Sustainability

MOREIRA, Ana Raquel Palatino. Método de Execução de uma barragem. 2012. Tese de Doutorado.

PEREIRA, Oniwendel Felipe De Moraes. **Análise da Classificação de Barragens de Contenção de Rejeitos no Brasil, Quanto ao Critério de Categoria de Risco.** Mestrado Profissional - Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais. Belém – PA. 2016.

PIASENTIN, Corrado. **Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos E Sócioambientais.** Unidade 2: Aspectos Gerais Da Segurança De Barragens. 2015.