

Segurança de barragens: estudo de caso de rompimentos de estruturas de rejeitos em Minas Gerais

Dam safety: a case study of tailings structure failures in Minas Gerais

Liliana Gardênia Magalhães Barbosa¹

Diego Roger Borba Amaral²

358

Resumo: O trabalho constitui, inicialmente, de um estudo acerca do desastre do rompimento das barragens de mineração em Minas Gerais, ressaltando principalmente as barragens da Samarco, localizada no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana e da Vale S.A. localizada no ribeirão Ferro-Carvão, na região de Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, a 65 km de Belo Horizonte. Os acidentes foram explorados a fim de evidenciar os principais motivos que levaram ao rompimento das barragens, utilizando-se artigos e laudos já publicados. O objetivo desse trabalho foi analisar o conjunto de fatores que podem ter contribuído para o acidente. Os incidentes foram abordados visando evidenciar todos os impactos ambientais, bem como os impactos socioeconômicos na região. Este estudo serve também para o levantamento de ações corretivas e mitigadoras, desenvolvidas posteriormente. A metodologia abordada através de estudos bibliográficos, que possibilitou o levantamento das possíveis causas dos acidentes ocorridos, ajudando a determinar as ações capazes de prevenir o rompimento de uma barragem, ou ao menos minimizar seus impactos socioambientais, no caso da ruptura. Os resultados foram: relatar os parâmetros que contribuem para o rompimento dessas estruturas, e os fatores necessários para a segurança delas, bem como as causas do rompimento das barragens estudadas. Concluiu-se que falhas na fiscalização e no monitoramento contribuem para a ocorrência desses eventos, para evitar que esses acidentes ocorram, essas barragens devem estar cadastradas de acordo com PNSB, classificadas de acordo seguindo os padrões de segurança, com essencial instrumentação e periodicidade constante.

Palavras-chave: Barragens. Rompimento. Segurança.

Abstract: Initially, the work is a study about the disaster of the mining dams rupture in Minas Gerais, highlighting mainly the Samarco dams, located in Bento Rodrigues district, Mariana

¹ Engenheira Civil pela Faculdade FINOM de Patos de Minas. E-mail: lilianamagalhaes350@gmail.com

² Engenheiro Civil pela Universidade de Uberaba. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia. Professor e Coordenador do Curso de Engenharia Civil da Faculdade FINOM de Patos de Minas. Possui experiência na área de execução de obras residenciais, de infraestrutura e fiscalização de obras públicas. E-mail: diegoamaral.eng@hotmail.com

Recebido em 27/12/2021

Aprovado em 12/03 /2022

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*



municipality and Vale SA located in the Ferro-Carvão stream, in the region of Córrego do Feijão, in the municipality of Brumadinho, 65 km from Belo Horizonte. The accidents were explored in order to highlight the main reasons that led to the rupture of the dams, using articles and reports already published. The objective of this paper was to analyze the set of factors that may have contributed to the accident. The incidents were addressed to highlight all environmental impacts as well as socio-economic impacts in the region. This study also serves to survey corrective and mitigating actions, developed later. The methodology approached through bibliographic studies, which made possible the survey of the possible causes of the accidents occurred, helping to determine the actions capable of preventing the rupture of a dam, or at least minimizing its social and environmental impacts, in case of rupture. The results were: report the parameters that contribute to the rupture of these structures, and the factors necessary for their safety, as well as the causes of the rupture of the studied dams. It was concluded that failures in inspection and monitoring contribute to the occurrence of these events, to prevent these accidents from occurring, these dams must be registered according to PNSB, classified according to safety standards, with essential instrumentation and constant periodicity.

Key words: Dams. Disruption. Safety.

1 INTRODUÇÃO

A mineração consiste em um conjunto de etapas que visam à obtenção de substâncias úteis, encontradas em seu estado natural, para que sejam processadas e adequadas à sua destinação final. Desse modo, este tipo de processo se faz indispensável em operações como: britagem, moagem, filtragem e secagem, sendo a sequência dessas operações o limiar dos rejeitos e, portanto, a origem das barreiras de contenção de rejeitos.

O conceito de rejeitos é especificado pela norma ABNT NBR 13206 (ABNT, 2006) como todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o procedimento de beneficiamento de minérios. A disposição dos rejeitos em barragens é o tipo de colocação mais amplamente utilizada. Na grande maioria dos casos, o material tipo “polpa” é disposto hidráulicamente dentro do reservatório, e os rejeitos que possuem granulometrias maiores, estes são usados como material de construção da barragem ou para o seu alteamento (RIBEIRO, 2015).

Barragens são construídas pela humanidade há milênios para diversos fins. Juntamente com pilhas de estéril, as barragens são as maiores estruturas geotécnicas construídas pelo homem. No Brasil, existem inúmeros barramentos de diversas dimensões (MENESCAL, 2001). O uso dessas contenções reflete também nas condições de manutenção constante das estruturas. Algumas são perfeitamente mantidas, atendendo e respeitando normas de segurança compatíveis com os padrões mais exigentes, ao mesmo tempo em que outras ficam esquecidas, sujeitas às enchentes ou à superação dos níveis de segurança, podendo suceder o

rompimento da estrutura.

Com a necessidade de conservação socioambiental devido ao grande avanço da exploração mineral, esse assunto vem merecendo grande atenção devido a seu potencial danoso no caso de falhas, pois, são obras geralmente associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade de ruptura.

Apesar das tecnologias existentes, conhecimentos, regulamentos e legislações, esses tipos de barragens continuam apresentando rompimentos e ocasionado danos com consequências catastróficas para as próprias estruturas, para o meio ambiente com destruição da flora e fauna, e principalmente pelas perdas de vidas humanas e prejuízos econômicos, a jusante do barramento.

O contexto deste trabalho foi embasado sobre as barragens de contenção de rejeitos, consideradas de risco, por causar um impacto ambiental considerável. São estruturas construídas durante muitos anos para comportar os materiais oriundos do beneficiamento do minério, sendo realizadas em estágios, na medida em que os rejeitos são produzidos, diluindo custos de operação e construção.

Um motivo comum para a ocorrência dessas fatalidades é que as barragens não são manuseadas segundo os critérios apropriados para operação, construção e projeto. Essas falhas custam vidas e resultam em prejuízos ambientais graves. Acidentes desta natureza, como os ocorridos em Mariana em (2015) e Brumadinho em (2019), são exemplos reais de rompimento, pois o método como foram construídas a montante, foi um dos fatores que levaram ao colapso, sucedeu em quantidades excessivas de volumes de rejeitos à jusante do barramento, que deixou um rasto de destruição.

O objetivo desse trabalho sucedeu através de analisar os diversos tipos de rompimentos de barragens de rejeitos, em Minas Gerais, com o intuito de estabelecer os critérios para melhorar a segurança de operacionalização e fiscalização das mesmas, conforme normas vigentes.

Este trabalho é relevante, pois o principal foco foi avaliar o papel desempenhado pelas barragens de rejeito, abordando os diversos métodos construtivos dos barramentos e, com base nos estudos de inventário de barragens do estado de Minas Gerais, analisar a classificação dessas estruturas nos acidentes ocorridos, com seu potencial de risco e os impactos ambientais, mostrar uma metodologia alternativa para a avaliação de segurança de barragens.

2 FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

Barragens são estruturas projetadas por engenheiros, utilizadas como reservatório para contenção e acumulação de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos provenientes do processo de beneficiamento de minérios, que podem ser utilizadas para diferentes fins, como represamento de água, irrigação, geração de energia elétrica, entre outras finalidades. São estruturas complexas, de risco e potenciais elevados que, em caso de incidentes ou acidentes, resultam em consequências onerosas com danos significativos.

2.1 Barragens de contenção de rejeitos

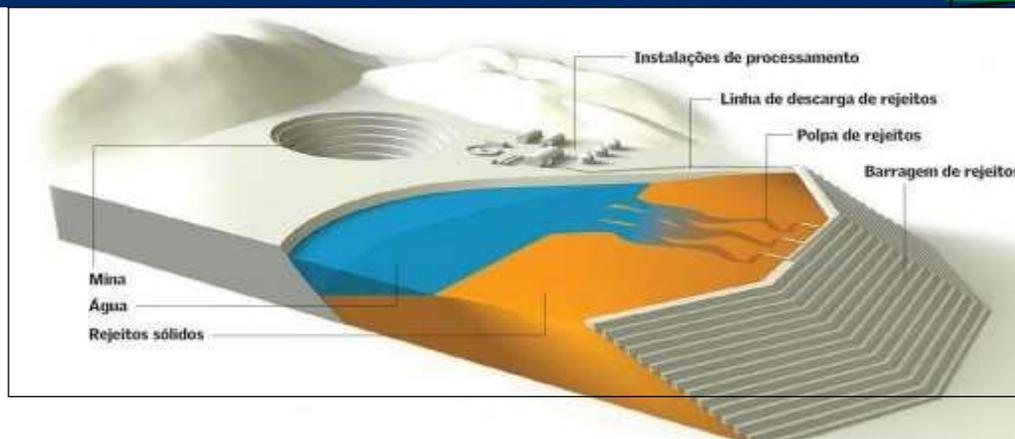
As barragens de contenção têm como função deter a água de forma provisória ou armazenar sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração. As barragens de retenção de carga sólida ou mista tem finalidade de impedir que os materiais retidos deteriorassem o leito dos cursos d'água a jusante, tanto fisicamente, por meio de assoreamento, quanto quimicamente, quando estes materiais possuem carga tóxica poluente. “Com isso, as barragens de rejeito de mineração começaram a ser construídas a partir da década de 1930, com a finalidade de evitar que os rejeitos oriundos da mineração fossem lançados diretamente nos cursos de água.” (CBDB, 2011, p.1).

Quando as barragens são executadas com o próprio rejeito, elas comportam-se como aterros hidráulicos, que são estruturas construídas pelo transporte e deposição de solo em local aquoso. A grande desvantagem deste método é que o lançamento hidráulico de rejeitos causa segregação hidráulica, processo fundamental na construção de aterros hidráulicos, afetando diretamente a distribuição granulométrica e as condições de fluxo ao longo da praia. Outra adversidade é a formação de potenciais focos de liquefação, provocada por vibrações no terreno causado pelo desmonte com explosivos próximo das barragens, alteamentos muito rápidos, etc., aumentando o risco de ruptura (ESPÓSITO, 2010).

Na Figura 1 é mostrado um esquema estrutural de uma barragem de rejeito.

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, p.16).

Figura 1 – Exemplo de barragem de contenção de rejeito.



Fonte: Kiernan (2016).

Os resíduos de mineração diferem-se dos resíduos produzidos em outros setores por serem estéreis (sólidos resultantes da extração) e rejeitos (polpa resultante do beneficiamento). Os rejeitos de mineração são compreendidos como subprodutos de origem mineral, sem valor agregado que são, portanto, separados do mineral de valor econômico e descartados. A maior parte desses rejeitos produzidos pelo mundo é disposta em reservatórios denominados barragens de rejeitos (IBRAM, 2016). Estimativas ainda apontam que existam cerca de 3.500 barragens em todo o mundo (FEBRABAN, 2016).

As barragens de rejeitos apresentam particularidades em relação às barragens utilizadas para armazenamento somente de água, pois são utilizadas para reter água e partículas sólidas. Essa vulnerabilidade ocorre devido a aterros formados por enchimentos de origem local (solo, resíduos grosseiros, sobrecarga das operações de mineração e rejeitos); várias fases de elevação de barragem para lidar com o aumento do material sólido armazenado e do efluente (mais escoamento oriundo de precipitação) lançado; falta de regulamento sobre critérios específicos de projeto; estabilidade das barragens que exigem controle e monitoramento contínuos durante a implantação, construção e operação da barragem e altos custos dos trabalhos de remediação após o fechamento das atividades de mineração (ARAÚJO, 2006).

Ao longo da vida útil essa técnica propicia à diluição dos custos da construção e operação da barragem ao longo do tempo. Diferentemente, em uma barragem para geração de energia, é necessária a capacidade máxima do reservatório desde o início da atividade. Nesse caso, normalmente o maciço da barragem é construído em uma única etapa (PASSOS, 2009).

2.1.1 Construção da barragem de rejeito aterro hidráulico

Estruturas construídas com terra, enrocamento, rejeitos e até mesmo concreto, para

armazenar rejeitos de processos industriais. As técnicas para este tipo de estrutura baseiam-se, de forma geral regulamentada, no desenvolvimento da construção de um dique com capacidade de represamento de rejeito da usina de beneficiamento. De maneira impropria é despejado um elemento chamado polpa em um desses diques (ESPÓSITO, 2010). Geralmente o modelo adotado para a construção das Barragens de Rejeitos possui as seguintes estruturas:

- Fundação - estrutura responsável por suportar e transferir para o solo os carregamentos provenientes da barragem. É o local onde a barragem se assenta;
- Aterro/Maciço - denominação da própria estrutura da barragem, responsável por conter o material dentro do reservatório;
- Ombreiras - as superfícies laterais de contato com as margens do vale onde ela foi implantada;
- Drenagem Interna - sistema interno à barragem, constituído por materiais que conduzem de forma ordenada o fluxo das águas no interior da estrutura;
- Crista: superfície plana e horizontal que delimita superiormente o corpo da barragem;
- Vertedouro - sistema externo responsável pela descarga de água durante e após a ocorrência de chuvas, para manter a cota operacional de nível de água do reservatório;
- Reservatório - área delimitada pela cota da barragem, onde fica acumulado o material que se quer guardar.

Na medida em que são descartadas no reservatório, as partículas presentes no rejeito acabam por afundar na represa, conservando-se no fundo da mesma. Ocorre a decantação dos sólidos devido à suspensão decorrente de uma variação na velocidade. Com isso, os que possuem uma maior taxa de granulometria tendem a se concentrar nos arredores do local de descarregamento, formando praias, enquanto, que os finos acabam por ser levados pelo escoamento da água (PEIXOTO, 2012).

As barragens destinadas à contenção de rejeitos são tipos de estruturas que necessitam do uso de manuais de operação, de inspeções e da dedicação de uma equipe de operação. É indispensável que as estruturas que apresentem um nível de risco elevado sejam operadas por engenheiros civis qualificados nesta atividade ou por engenheiros geotécnicos.

2.1.2 Métodos de alteamentos

Essas contenções de rejeitos têm com propósito principal a redução dos gastos na

atividade de extração mineral, através de sucessivos alteamentos. Deste modo, constrói-se inicialmente um dique de partida e a estrutura de contenção passa por alteamentos no decorrer de sua vida útil, podendo sua construção ser executadas com próprio rejeito, atendendo a três métodos: linha de centro, jusante ou montante, ou ainda material compactado procedente de áreas de empréstimo.

As contenções de material proveniente do minério, que são fundamentadas no método de aterro, vêm proporcionando atitudes gradativas nos órgãos ambientais e nos grupos de pessoas afetadas, em consequência das crescentes ameaças ambientais, referentes ao processo e as trágicas consequências de uma possível ruptura. Em particular, as barragens alteadas para montante tendem a serem gradualmente críticas e a liberação sem o devido controle das massas retidas, em uma eventual ruptura, acarreta em grandes consequências, não apenas nas proximidades do empreendimento como também em zonas distantes a montante. Com relação aos acontecimentos históricos, de rompimento das barragens de contenção dos rejeitos, produzidos através do método de aterro hidráulico, a liquefação estática, tem sido o aspecto decisivo (PEIXOTO, 2012).

O procedimento a montante consiste no método de construção de barragens mais antigo, simples e econômico. A fase inicial da execução deste modelo de barragem resume-se na construção de um dique de partida, normalmente de material compactado sendo enrocamento ou argiloso. Depois da realização desta etapa, à montante da linha simétrica do dique, o rejeito é depositado por canhões, constituindo assim a praia de deposição, com material disposto, que se tornará a estrutura de suporte e casualmente será o próprio material de construção para o alteamento seguinte. Segue sucessivamente este procedimento até que seja atingida, a cota final estipulada em projeto (ARAÚJO, 2006).

Segundo Martin e McRobert (1999), esse procedimento de alteamento à montante representa um desafio no âmbito geotécnico devido às tensões induzidas, potencial de liquefação e a utilização do material não consolidado como fundação.

Conforme Bruce (1998), no método à jusante, a última etapa está relacionada à edificação de um dique de partida, comumente constituído por material de solo ou de compactação de enrocamento, desloca o eixo de construção na direção oposta ao do lago de decantação, ou seja, para jusante do dique de partida são realizados alteamentos subsequentes. Continua sucessivamente o desenvolvimento deste processo até que a cota final prevista em projeto seja atingida. Nesse caso, o talude a montante é impermeabilizado com argila ou materiais sintéticos, e o dique deve ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante – filtro horizontal).

Entretanto, o método de jusante tem como vantagem a sua resistência a carregamentos dinâmicos. Isto se deve ao fato de suportar a construção sem interferir na segurança, dessa forma facilita a drenagem, e possui baixa susceptibilidade de liquefação e simplicidade na operação (PASSOS, 2009).

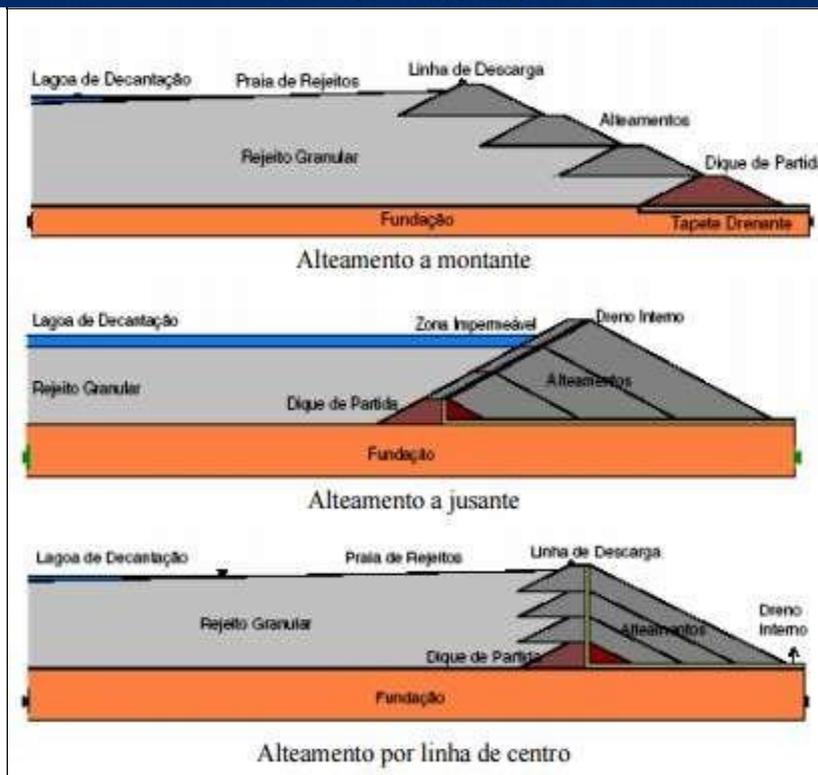
Com tudo, para construção do método de jusante são necessárias grandes quantidades de material, enfatizando maiores custos relacionados ao empréstimo de material ou à atividade de ciclonagem. Ademais, com esse procedimento a região ocupada pelo sistema que contém os rejeitos é grande, graças ao avanço da estrutura para jusante devido ao desenvolvimento da altura (ARAÚJO, 2006).

A técnica de alteamento pela linha de centro utiliza um modelo intermediário, que implica na solução entre os dois procedimentos de execução citados anteriormente, exibindo vantagens dos dois métodos. O método da linha de centro é um método interposto que tenta minimizar as desvantagens entre o método de montante e o de jusante e com isso, relacionar a segurança do método para jusante com o custo e velocidade do alteamento para montante.

Acompanhando um eixo vertical, chamado de linha de centro, vai sendo realizada a construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento à jusante (PASSOS, 2009).

Os métodos comparados acima são os principais tipos executados em barragem de rejeito, pois o alteamento acompanha a produção do minério. Só é feito um novo alteamento quando é necessário dispor o rejeito produzido. A seguir, na Figura 2 são apresentados os três métodos executados pelo modelo com o próprio rejeito.

Figura 2 – Métodos construtivos de alteamentos para barragens de rejeitos.



Fonte: Araújo (2006).

A partir da análise dos três tipos de alteamentos identifica-se que o método de montante é o processo que apresenta em questão de segurança uma maior desvantagem em sua construção. Segundo Araújo (2006), embora seja o mais empregado pela maioria das mineradoras, por possuir um custo de execução mais acessível comparado aos outros métodos, esse procedimento demonstra um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O mais importante a ser observado neste caso, que o agravante desse processo, está relacionado ao motivo dos alteamentos serem feitos acima de materiais depositados previamente e não consolidados.

Portanto, sob o estado de compacidade mole, ou seja, sem consistência e condição saturada, estes rejeitos (granulares) propendem a exibir resistência baixa ao cortante e susceptibilidade à liquefação por carregamentos estáticos e dinâmicos.

Ainda neste método construtivo existe certa dificuldade na implantação de um sistema de drenagem interno eficiente, com capacidade para controlar o nível d'água dentro da estrutura, estabelecendo um problema extra com reflexos na estabilidade da barragem (GAMA, 2019).

2.2 Fatores de risco

Cenários de ruptura de uma barragem de terra de contenção de rejeitos podem ser produzidos pela ação isolada ou combinação de diferentes fatores, tais como: erosão interna (*piping*), galgamento, terremoto, instabilidade de taludes, falhas na fundação e falhas estruturais (ICOLD, 2001), como também pelo efeito de liquefação. A probabilidade de falha de uma barragem de contenção de rejeitos está associada a variáveis causas tais como o tipo de rejeito disposto em seu reservatório e a qualidade material que a compõe (VICK, 1984).

2.2.1 Erosão interna (*piping*)

O *piping* é uma erosão regressiva, que ocorre no interior da estrutura, gerando assim canais no interior da contenção, especificamente na parte interna do maciço, avançando em sentido a jusante do barramento, por esse motivo é conhecido com erosão regressiva.

Os fatores condicionantes ao *piping* e que podem ocasionar o surgimento de fendas ou aberturas no maciço em maciços de seção homogênea são descritos por Massad (2003):

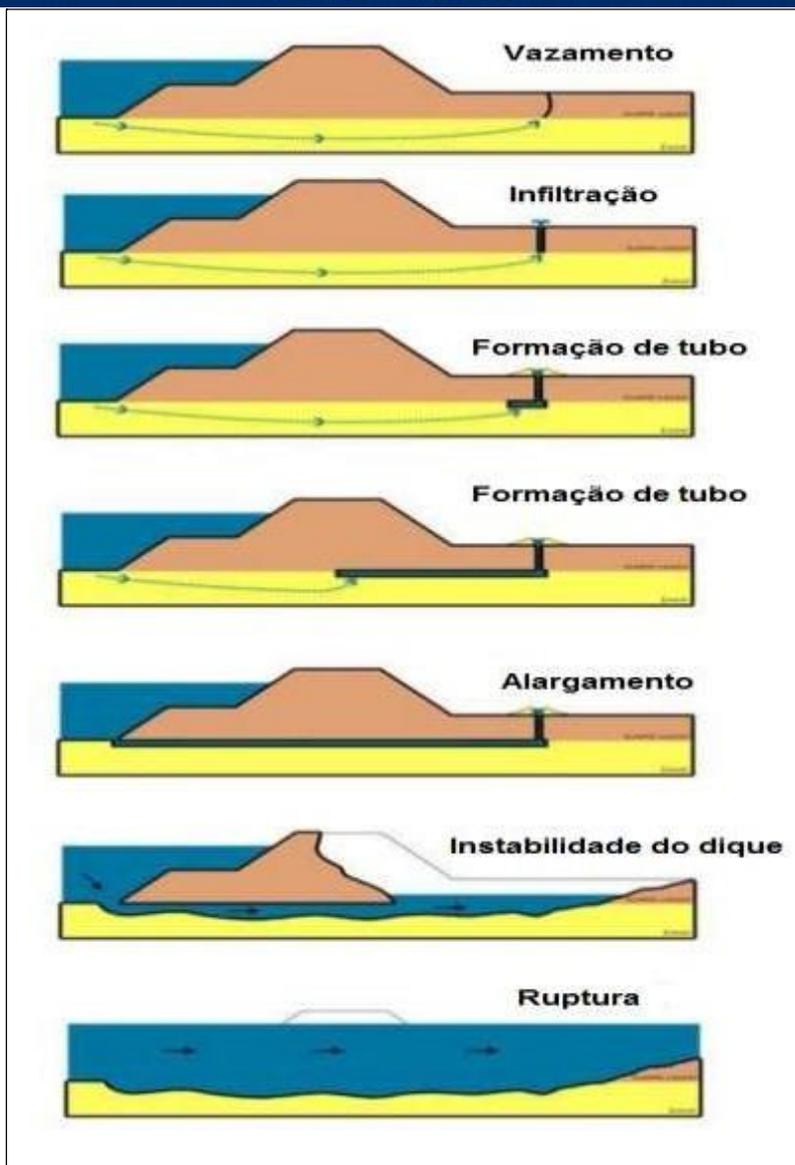
- Presença de fundações arenosas;
- Ausência de filtros horizontais tipo sanduiche;
- Construídos com matérias francamente permeáveis;
- As condições de compactação do maciço;
- Ausência de transições adequadas entre os materiais granulares.

O *piping* pode acontecer de quatro diferentes formas, gerando assim falha para a erosão interna das barragens de aterro e suas fundações:

- Através do aterro;
- Através da fundação;
- Aterro-em-fundação;
- Associado a estruturas de penetração.

A Figura 3 ilustra como se desenvolve esse fenômeno na estrutura.

Figura 3 – Colapso da barragem por *piping*.

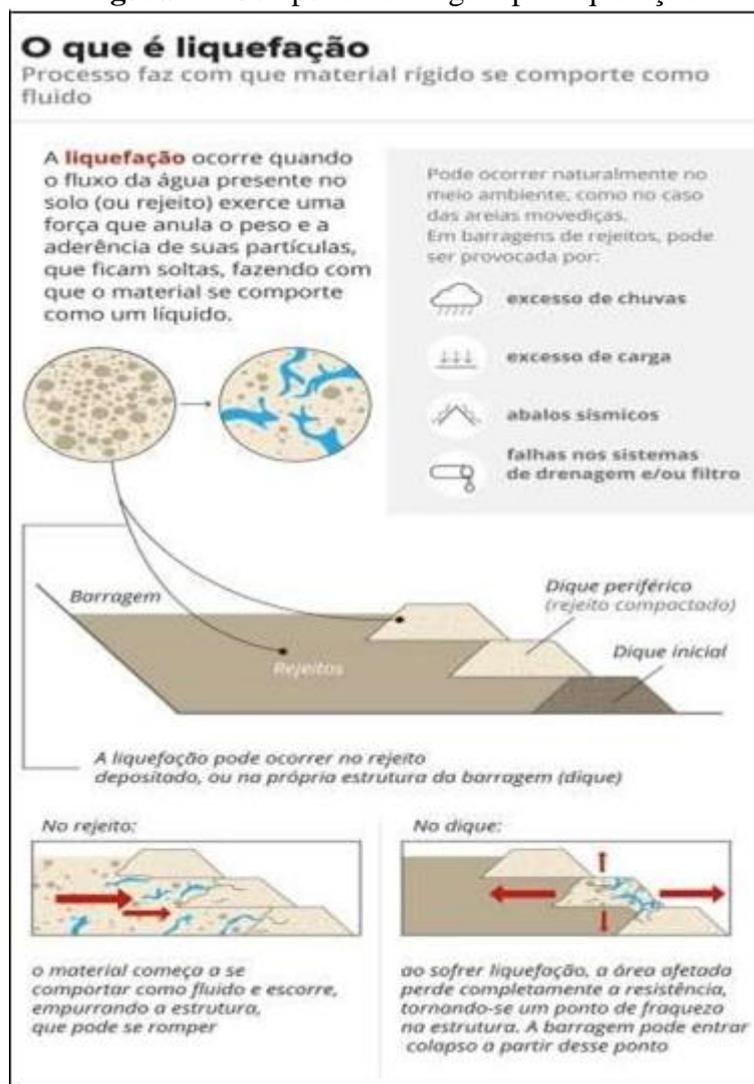


Fonte: Vogel (2013).

2.2.2 Liquefação

O fenômeno da liquefação consiste em um processo no qual o sedimento sólido tem repentina redução na resistência ao cisalhamento, pelo acréscimo da pressão intersticial e passa a comportar-se como se fosse líquido. Na Figura 4 ilustra-se o processo como ocorre a liquefação.

Figura 4 – Colapso da barragem por liquefação.



Fonte: Geo klantendang (2015).

O fluxo de liquefação estática pode ser causado por um conjunto de eventos apresentados abaixo:

- Saturação da areia;
- Expansão da praia e deposição de lamas;
- Recuo de alinhamento;
- Aumento da altura do recuo, devido a atraso.

Em barragens, pode ser provocado por:

- Excesso de chuvas;
- Excesso de carga (depositada rapidamente);
- Abalos sísmicos;
- Problemas no sistema de drenagem.

2.3 Métodos para segurança de barragens

Nas últimas décadas, tem crescido o interesse pelos sistemas de controle de obras de barragens, buscando oferecer segurança em seu período de operação.

Segundo o ICOLD (2001), a maioria das causas de acidentes com barragens, com consequências catastróficas (com perdas de vidas), ocorreu em barragens com altura inferior a trinta metros. Essas barragens passaram a ser motivo de preocupação e de maior interesse de profissionais de segurança de barragens.

Desta forma, no mercado os instrumentos para inspeção precisam ser adequados à necessidade do empreendimento. Podem ser sistemas mais econômicos com leituras manuais e, conseqüentemente, necessitando de operador de leitura. Sistemas automatizados necessitam de investimentos financeiros mais elevados para transmissão de dados de médias e longas distâncias.

Toda barragem deve ser instrumentada, de acordo com seu porte e riscos associados e ter os dados analisados periodicamente com a realização das leituras. Todos os instrumentos devem ser dotados de valores de controle ou limites. (Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, (MSIB, 2002, p. 31).

Para alertar o desenvolvimento de condições inseguras, a instrumentação é um dos métodos utilizados para acompanhar o comportamento de uma barragem e de sua fundação. Alguns desses instrumentos são usados para medir, entre outros fenômenos físicos, tensões, deformações, subpressão, percolação, vazão, sismos e deslocamentos. Com as informações conseguidas através dessas instrumentações, é possível operar barragens otimizando o seu aproveitamento e adequando o projeto da barragem às condições de extração e produção da mineradora (ICOLD, 2001).

Nota-se bibliograficamente uma predisposição a se concatenar a quantidade total de instrumentos empregados (N) e a altura em metros das barragens (H), como um fundamento para avaliar a quantidade de instrumentação adotada. Pode variar esta relação para cada tipo de instrumento usado, contudo, ao se fazer esta correlação em instrumentos tais como células de pressão total, piezômetros, inclinômetros e marcos topográficos, medidores de deslocamentos horizontais e verticais, no contexto nacional, essa instalação de instrumentação ocorre conforme esses métodos: (menor que 20 m) para barragens baixas, adota-se a correlação $H:N=1:1$, (até 100 m) para barragens altas, adere a correlação $H:N=1:1,3$ e (maior que 100 m) para barragens muito altas, adere a correlação $H:N=1:1$ (AFFONSO, 2004). Abaixo a Tabela 1 ilustra em proporção o uso da instrumentação para barragens.

Tabela 1 – Tabela de porcentagens de instrumentos frequentemente utilizados em barragens.

Instrumento	Média	Faixa de Variação
Piezômetros	50%	(20% a 80%)
Marcos Topográficos	30%	(20% a 40%)
Medidores de deslocamento(vert/horiz)	20%	(10% a 30%)
Inclinômetros	5%	(0% a 8%)

Fonte: Figueira (1990); Adaptado por Autores (2019).

Com isso, quando as barragens são instrumentadas, geralmente, seguem a predisposição apresentada na (Tabela 1), ou seja, apresentam os piezômetros como os principais instrumentos utilizados.

Affonso (2004) argumenta que um número mensurável de países, tem aderido à implementação de normativas e valores específicos para o projeto, a obra, a observação, a fiscalização e o acompanhamento do processo de operacionalização desses tipos de estruturas e construções diversas na área da Engenharia Geotécnica, devido interesse progressivo com segurança de barragens.

Portanto neste cenário, o monitoramento hidráulicomecânico de barragens através da instalação de um sistema adequado de instrumentação exerce uma função essencial na ponderação do desempenho destes barramentos, tanto no decorrer do período de construção quanto no regime de plena operação. Período de construção:

- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias no comportamento da barragem;
- Tensões de tração que possam causar fissuras transversais em aterros compactados;
- Possibilitar revisões do projeto durante o período construtivo. Período de enchimento:
- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias que possam colocar em risco a segurança da estrutura;

- Possibilitar avaliação do desempenho estrutural, geotécnico e hidráulico da obra;
- Acompanhar o desenvolvimento de pressões neutras elevadas indicando possíveis problemas com o sistema de drenos.

Período de operação:

- Verificar se a barragem está apresentando um desempenho geral satisfatório, conforme previsto em projeto.

2.3.1 Cadastro para classificação da barragem

Geralmente as rupturas das barragens de rejeitos ocorrem devido deficiência do projeto construção/operação. Muitos colapsos aconteceram decorrentes de resultado de práticas operacionais que foram incompatíveis com os requerimentos de projeto, ou vice-versa. Portanto um projeto que foi mal elaborado não pode ser salvo por práticas operacionais exemplares, nem que um bom projeto possa resistir às práticas operacionais inadequadas. Isso implica que rompimentos podem ocorrer quando um projeto mal feito é combinado com técnicas operacionais incorretas (WAGENER, 1997).

Com base nessas análises toda barragem que apresenta risco será classificada pelos agentes fiscalizadores, segundo a Lei n.12.334, no Art. 7, por categoria de risco, pelo volume de armazenamento e pelo dano potencial associado à ruptura, considerando os parâmetros gerais determinados pelo CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2010).

Quanto ao risco, a definição em baixo, médio ou alto, é elaborado a partir das características técnicas, como se encontra o estado de preservação do empreendimento e do atendimento do plano de segurança de barragem definido. Quanto ao dano potencial, é construída em função da ocupação humana à jusante da barragem, bem como dos impactos ambientais e econômicos consequentes da ruptura da barragem.

Os Quadros 1 a 5 retratam sobre os dados para classificação de barragens para disposição de resíduos e rejeitos. No Quadro 1 são apresentadas as características técnicas (CT). A fórmula utilizada para o cálculo parte de análise característica de cada barragem e do seu enquadramento de acordo com sua situação atual.

Fórmula 1 $CT = a + b + c$

Onde:

- CT: características técnicas;
- a, b e c: variam de acordo com enquadramento, onde é feito a análise das características

da barragem (Quadro 1).

Quadro 1 – Características técnicas (CT).

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)
Altura \leq 15m [0]	Comprimento \leq 50m [0]	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar [0]
15m < Altura < 30m [1]	50m < Comprimento < 200m [1]	Milenar [2]
30m \leq Altura \leq 60m [4]	200 \leq Comprimento \leq 600m [2]	TR = 500 anos [5]
Altura > 60m [7]	Comprimento > 600m [3]	TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável [10]

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

O Quadro 2 apresenta o estado de Conservação (EC). A fórmula utilizada para o cálculo parte da análise do estado de conservação de cada barragem e do seu enquadramento de acordo com sua situação em que se encontra.

Fórmula 2
$$EC = d + e + f + g$$

Onde:

- EC: Estado de Conservação;
- d, e, f, g: variam de acordo com o enquadramento, onde é feito a análise do estado de conservação da barragem (Quadro 2).

O Quadro 3 apresenta o plano de segurança da barragem (PS). A fórmula utilizada para o cálculo parte da análise do estado da barragem, qual situação a barragem se encontra e se enquadra no plano de segurança.

Fórmula 3
$$PS = h + i + j + k + l$$

Onde:

- Plano de Segurança da Barragem (PS);
- h, i, j, k, l: variam de acordo com o enquadramento, onde é feito a análise do plano de segurança da barragem (Quadro 3).

Quadro 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 tem existência de 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]	Tem existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação [2]	Tem existência de 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]	Existência de erosões superficiais, ferrugem 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]	Existência de depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. [10]

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

Quadro 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]	Dispõe de unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem [0]	Dispõe de manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação [0]	Possui PAE [0]	Regularmente emite relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança [0]
Projeto executivo ou “como construído” [2]	Dispõe profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem [1]	Tem apenas manual de procedimentos de monitoramento [2]	Não dispõe PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) [2]	Regularmente emite apenas relatórios de Análise de Segurança [2]
Projeto básico [5]	Dispõe de unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem [3]	Tem apenas manual de procedimentos de inspeção [4]	PAE em elaboração [4]	Regularmente emite apenas relatórios de inspeção e monitoramento [4]
Projeto conceitual [8]	Não tem unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem [6]	Não dispõe de manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções [8]	Não tem PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) [8]	Regularmente emite apenas relatórios de inspeção visual [6]

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

O Quadro 4 apresenta o dano potencial associado (DPA). A fórmula utilizada para o cálculo parte da análise do dano potencial associado a cada barragem e do seu enquadramento de acordo com sua situação em que se encontra.

Fórmula 4 $DPA = a + b + c + d$

Onde:

- Dano Potencial Associado (DPA);
- a, b, c, d: variam de acordo com o enquadramento, onde é feito a análise do dano potencial associado da barragem (Quadro 4).

376

Quadro 4 – Dano Potencial Associado (DPA).

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Muito Pequeno < = 500 mil m ³ [1]	INEXISTENTE (não tem existência de pessoas permanentes/residentes ou temporárias/percorrendo na área afetada a jusante da barragem) [0]	INSIGNIFICANTE (área atingida a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas situações naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) [0]	INEXISTENTE (não tem existência de quaisquer instalações na área atingida a jusante da barragem) [0]
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ [2]	POUCO FREQUENTE (não tem existência de pessoas ocupando permanentemente a área atingida a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) [3]	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) [2]	BAIXO (Tem existência de pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) [1]

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ [3]	FREQUENTE (não tem existência de pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas tem existência de rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) [5]	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) [6]	MEDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) [3]
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ [4]	EXISTENTE (Tem existência de pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) [10]	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) [8]	ALTO (Tem existência de alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de magnitude sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) [5]
Muito Grande > = 50 milhões m ³ [5]		MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) [10]	

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

O Quadro 5 apresenta o resultado risco e DPA, e as demais formulas, para obter o resultado do nível de risco que essa barragem se encontra.

2.3.2 Classificação da barragem

É um importante instrumento para colaborar com a redução das possibilidades de

ocorrência de acidentes em barragens de rejeitos, já que tais estruturas que possuem categoria de risco alto ou médio deverão ter mais atenção do que aquelas avaliadas com categoria de risco baixo.

Quadro 5 - Dano Potencial Associado (DPA).

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		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 60 ou $EC^*=10$ (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	≤ 35
(*) 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.		
DANO POTENCIAL ASSOCIADO		PONTOS
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$7 < DP < 13$
	BAIXO	≤ 7
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO		
	CATEGORIA DE RISCO	
	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

Com isso, de acordo com esta classificação, serão estabelecidos os prazos, para

eventual realização de auditorias técnicas periódicas, que geralmente são realizados dentro de (um, dois ou três anos). Esses relatórios auditorias devem conter levantamento das reais condições estruturais e físicas das barragens e atestar se as mesmas apresentam condições seguras de estabilidade. Caso essas não apresentem instabilidades, deve ser elaborado um relatório que contem um plano de ações, que tem finalidade de estimar um prazo para implantação de melhorias, com o principal objetivo de melhorar a qualidade da estrutura com funções de corrigir falhas e garantir a estabilidade das estruturas.

Esse modelo tem o propósito de estabelecer o risco potencial de ruptura, com isso definir necessidades de intervenção, recuperação e destinação de recursos de manutenção, equipamentos melhores e mais modernos, monitoramento por instrumentação, e desse mesmo modo agir como padrão de referência para ações de segurança, priorizar os investimentos em reparos, periodicidade de inspeções, planos de ação emergenciais, dentre outros. As barragens que deverão adquirir essas ações serão as que apresentam maior risco.

O propósito dos programas de segurança de barragens é reconhecer os perigos potenciais oferecidos pelas estruturas e reduzi-los a níveis aceitáveis. Barragens seguras podem ser construídas e potenciais de deficiências na segurança geralmente podem ser corrigidas a tempo, antes que causem perdas e desastres.

Guerra (2007), define a segurança de barragens como sendo sua capacidade máxima de resistir à variação das características operacionais e funcionais, oferecendo determinado grau de confiabilidade, o qual projeta a durabilidade do empreendimento segundo parâmetros técnicos, físicos e econômicos. Já o controle de segurança de barragens é entendido como o conjunto de atividades de observação, cálculo, análise e diagnóstico das condições de existência e de funcionamento, o que equivale a acompanhar o seu desempenho, desde o processo de projeto, passando pelo período construtivo até o fim de sua vida útil, detendo-se no cumprimento satisfatório das respectivas finalidades, das novas características do empreendimento, como um todo, e da região em que está edificado.

O enquadramento das barragens em classes de potencial de risco (Quadro 6) permite definir a frequência de inspeções (Quadro 7) para cada barragem e antecipar ações evitando, falhas e rupturas.

Quadro 6 - Classificação de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado (DPA).

	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
CATEGORIA DE RISCO	ALT O	MÉDI O	BAIX O

ALTO	A	B	C
MEDIO	B	C	D
BAIXO	C	D	E

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

Quadro 7 - Frequência de Inspeções.

Tipo de inspeção	Classificação da Barragem				
	A	B	C	D	E
Rotina		Mensal	Trimestral	Semestral	Anual
Periódica		Anual (relatório completo)	Anual (relatório simplificado)	Relatório simplificado a cada 2 anos	Relatório simplificado a cada 4 anos
Formal		A cada cinco anos	A cada dez anos	A cada quinze anos	A cada quinze anos
Especial	Definir intervenção e reclassificação	Em oportunidades tais como cheias excepcionais, rebaixamento rápido do reservatório, sismos, etc.			

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

Segundo a (FEAM, 2014), as barragens são divididas em três classes, que são definidas, considerando-se o somatório dos valores (V) dos parâmetros de classificação definidos, verificar o Quadro 8 a seguir:

- Classe I - de baixo potencial de dano ambiental, devem ser auditadas a cada três anos;
- Classe II - de médio potencial de dano ambiental, devem ser auditadas a cada dois anos;
- Classe III - de alto potencial de dano ambiental, devem ser auditadas anualmente.

Quadro 8 - Critérios para classificação potencial de dano ambiental das barragens.

Altura da barragem H (m)	Volume do Reservatório ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Ocupação humana a jusante	Interesse ambiental a jusante	Instalações na área de jusante
$H < 15$ $V=0$	$V_r < 0,5$ $V=0$	Inexistente $V=0$	Pouco significativo $V=0$	Inexistente $V=0$

$15 \leq H < 30$ $V=1$	$0,5 \leq V_r \leq 5$ $V=1$	Eventual $V=2$	Significativo $V=1$	Baixa concentração $V=1$
$H > 30$ $V=2$	$V_r > 5$ $V=2$	Existente $V=3$	Elevado $V=3$	Alta concentração $V=2$
-	-	Grande $V=4$	-	-

Fonte: PNSB, 2018; Adaptado por Autores (2019).

- Baixo potencial de dano ambiental - Classe I: quando o somatório dos valores for menor ou igual a dois ($V \leq 2$);
- Médio potencial de dano ambiental - Classe II: quando o somatório dos valores for maior que dois e for menor ou igual a cinco ($2 < V \leq 5$);
- Alto potencial de dano ambiental - Classe III: quando o somatório dos valores for maior que cinco ($V > 5$).

2.4 Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)

No Brasil, a lei nº 12.334, em vigor desde 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, quanto a acidentes e seus impactos, para adotar meios de prevenção em todas as fases (planejamento, projeto, construção, operação e desativação), e monitorar as medidas de segurança adotadas pelos responsáveis das barragens (BRASIL, 2010).

São características necessárias que uma barragem precisa para se enquadrar nessa política: é ter um reservatório que possui resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; essa estrutura deve obter capacidade de reservação que consiga atender a um total maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos); a altura do maciço deve atender, em 26 (vinte e seis), e do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros). Essas contenções de rejeitos devem estar, classificadas e enquadradas na categoria de dano potencial associado, sendo eles representados pelos níveis médio ou alto, que define os impactos que pode ocasionar em caso de rupturas, aos termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas (BRASIL, 2010).

São fundamentos da política, as considerações das fases de planejamento para melhor segurança de uma barragem, como a fase de projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros, é de grande importante que a população a jusante do barramento seja estimulada a ter participação, diretamente ou

indiretamente dos procedimentos emergenciais e preventivos.

Para garantir a segurança da barragem o empreendedor e o responsável legal têm como dever, manter se encarregados das responsabilidades do desenvolvimento de ações para garantir a segurança da barragem; A promoção de mecanismos de participação e controle social tem influencia diretamente na sustentabilidade, que visam á segurança de barragem, e alcançar seus potenciais efeitos sociais e ambientais (BRASIL, 2010).

São instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

- PSB – Plano de Segurança de Barragem;
- SINIMA – Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente;
- SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens;
- O Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- O Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais e o Relatório de Segurança de Barragens;
- O sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado.

2.4.1 Plano de Ação de Emergência (PAE)

O Plano de Ação de Emergência (PAE) é um documento obrigatório em barragens de DPA alto de acordo com a Lei nº 12334:2010, que estabelece a PNSB. É de responsabilidade do empreendedor, elaborar e atualizar o PAE anualmente, sendo incluídas as novas informações e removidos os dados desatualizados e/ou incorretos. As folhas corrigidas deverão ser anotadas adequadamente em seu rodapé e suas cópias distribuídas para todas as entidades que participem do PAE e tenham em seu poder uma cópia para uso.

No PAE deve haver uma lista de pessoas e entidades a serem notificadas em caso de emergência e uma descrição dos sistemas de alerta que serão utilizados no caso de emergência (CARDIA, 2015).

2.5 Incidentes e acidentes com barragens de contenção de rejeitos

De acordo com os incidentes relatados pela ICOLD (2001), á partir dos históricos supervisionados, as principais razões que ocasionam os rompimentos de barragens são: capacidade inadequada dos vertedouros, defeitos na fundação, instabilidade dos taludes, ausência no controle da erosão, deficiências no controle e inspeção pós-fechamento e carência de equipamentos graduais de segurança no decorrer da vida útil da estrutura. Os motivos que

levam a ocorrência desses acidentes podem estar relacionados de diferentes modos, a perda de compreensão dos fatores que dominam a segurança das operações, ou seja, falta ou falhas na instrumentação e monitoramento.

Existem poucos casos relacionados a mudanças climáticas inesperadas, uma vez que o conhecimento de hoje permite a previsão destes eventos. A segurança de uma barragem pode ser afetada por fenômenos naturais como enchentes, deslizamentos, terremotos e deterioração do corpo da barragem e da fundação. Com o passar do tempo, a estrutura da barragem pode se deteriorar devido à idade e, em alguns casos, maiores pressões internas e vazamentos podem se desenvolver. Geralmente, esses processos são lentos e não são prontamente percebidos por meio de um exame de rotina.

O monitoramento contínuo do desempenho da barragem irá assegurar a detecção de qualquer não conformidade seja no projeto ou qualquer problema dentro da barragem que possa causar falha. Contudo, acidentes e incidentes também são resultados de condições inadequadas de investigações de campo, monitoramento, operação, projeto, construção, ou a combinação destes (GUERRA, 2007).

2.5.1 Acidentes recentes com barragens de rejeitos

A seguir, no Quadro 9, são apresentados os principais acidentes, relacionados a rompimentos, ocorridos em Minas Gerais.

Quadro 9 - Acidentes com barragens em Minas Gerais.

LOCAL	ANO	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS
Itabirito	1986	Barragem de Fernandinho. Empresa: Grupo Itaminas.	Barragem de Rejeitos minerários.	7 óbitos.
Nova Lima	2001	Barragem de Macacos. Rio Empresa: Mineração Verde.	Barragem de Rejeitos minerários.	5 óbitos.
Cataguases	2003	Barragem em Cataguases. Empresa: Mineradora Rio Pomba.	Barragem de Rejeitos industriais.	Mortandade de animais e peixes e interrupção do abastecimento de água de

LOCAL	ANO	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS
		Cataguases		600.000 pessoas, contaminação do rio Paraíba do Sul.
Miraí	2007	Barragem da Rio Pomba/Cataguases. Empresa: Mineradora Rio Pomba Cataguases.	Barragem de Rejeitos minerários.	Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Itabirito	2014	Barragem da Herculano. Empresa: Herculano Mineração.	Barragem de Rejeitos minerários.	3 óbitos.
Mariana	2015	Barragem Fundão. Empresa: Samarco.	Barragem de rejeitos minerários	19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas e poluição do rio São Francisco e do mar no ES, interferência na atividade pesqueira, e intervenção ao Turismo em Regência/ES.
Mariana	2015	Barragem Santarém. Empresa: Samarco.	Barragem de rejeitos minerários	19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas e poluição do rio São Francisco e do mar no ES, interferência na atividade pesqueira, e intervenção ao Turismo em Regência/ES.
Brumadinho	2019	Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão. Empresa: Vale S.A.	Barragem de rejeitos minerários	Até no momento 150 mortos e 182 desaparecidos, destruiu grande parte da vegetação, causou morte de grande parte

LOCAL	ANO	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS
				de espécies animais, poluindo o rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco.

Fonte: adaptado IBAMA (2015); Adaptado por Autores (2019).

No Brasil o número de barragens rompidas nos últimos anos também é alarmante, principalmente no Estado de Minas Gerais, onde seis barragens se romperam nos últimos quinze anos. A partir de estudos relacionados aos rompimentos ocorridos nos últimos tempos, é possível e importante ressaltar, que todos os acidentes envolvendo estruturas de contenção de rejeitos de minério nos últimos anos, foram marcados pelo emprego do método de alteamento á montante. Essa é uma das justificativas de grande relevância para os pesquisadores que defendem sua proibição nos empreendimentos com barragens.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa fundamentou-se em estudos de casos de rompimento de barragens, para entender melhor o funcionamento e os mecanismos de segurança das mesmas. O trabalho foi dividido em fundamentação teórica e análise conclusiva sobre os parâmetros que influenciam no rompimento desse tipo de estrutura. A pesquisa bibliográfica foi desenvolvida por meio de artigos, trabalhos acadêmicos, revistas, jornais entre outros informativos que retratavam sobre o tema.

Visto o potencial danoso das barragens de rejeito, este trabalho propôs a lançar luz ao tema e apontar alguns pontos relevantes quanto às propriedades e aos métodos construtivos de barragem de rejeitos, em virtude da multidisciplinaridade requerida nas fases de projeto, execução, operação e desativação.

A metodologia desenvolvida denominou-se a partir do Índice de Segurança de Barragens considerando, na sua implementação, diferentes critérios que foram avaliados para barragens em nível de rejeitos, obtendo a sua classificação em termos de segurança.

3.1 Caracterização do local de estudo

3.1.1 Barragem de Mariana

A construção da Barragem de Rejeitos de Fundão faz parte do Complexo de Germano da Samarco. Iniciou-se em 2007, entrando em operação em dezembro de 2008, quando recebeu os primeiros rejeitos de minério de ferro, localizada em Mariana, no interior de Minas Gerais, Brasil, de acordo com o mapa apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Localização da cidade de Mariana em Minas Gerais.



Fonte: Abreu (2006).

No dia 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos minerais de Fundão no município de Mariana (MG) e de parte da barragem de Santarém, pertencentes à empresa de mineração Samarco, empresa controlada pela BHP Billiton Brasil Ltda e pela Vale S.A. (Samarco, 2016).

3.1.2 Barragem de Brumadinho

A barragem de rejeitos, construída em 1976, classificada como de "baixo risco" e "alto potencial de danos", estava inativa desde 2015, era controlada pela Vale S.A. e estava localizada no ribeirão Ferro-Carvão, na região de Córrego do Feijão, no município brasileiro de Brumadinho, a 65 km de Belo Horizonte, em Minas Gerais, conforme o mapa apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Localização da cidade de Brumadinho em Minas Gerais.



Fonte: Abreu (2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no referencial teórico e nos casos estudados, pode-se afirmar que há parâmetros que contribuem para o rompimento de barragens de rejeito, como: liquefação, a erosão interna (*piping*), as características do solo local, o tipo de construção a montante, entre outros fatores.

A falta de monitoramento contínuo, a documentação inadequada, incluindo-se os projetos, a ausência da instrumentação e a carência de fiscalização das barragens em todas as fases, desde o projeto até sua operação, são fatores primordiais para a falta de segurança nesse tipo de estrutura.

No Brasil, erosão interna (*piping*) e liquefação são as principais causas associadas ao rompimento de barragens de rejeitos, fenômenos que consistem, respectivamente, na mudança súbita das características físicas da lama, que passa de pastosa a líquida, e na erosão interna á infiltração na estrutura de contenção do material da mineração (IBRAM, 2016).

Segundo Gama (2019), após investigação realizada pelos especialistas contratados apontou três causas que, somadas, desencadearam o início da tragédia, na ombreira esquerda da barragem de Mariana. O primeiro problema relatado foi um defeito no sistema de drenagem, o que resultou na entrada de lama nas galerias e fez com que essa lama se misturasse com o material arenoso da barragem, gerando um processo de liquefação do material. A segunda causa foi que, no processo de alteamento da barragem, o recuo executado na ombreira esquerda

estava ocorrendo sobre uma base de areia e lama e não apenas areia, deixando a base instável. Por último, o processo foi acelerado pela ocorrência de três abalos sísmicos na região, o que foi considerado o gatilho para o início da erosão.

Nas barragens de Mariana e Brumadinho, os resultados obtidos de uma investigação das principais causas do rompimento, constataram que a liquefação e a erosão interna (*piping*) foram os principais motivos.

A perda de estabilidade da barragem de Mariana por uma modificação na propriedade física do rejeito em novembro de 2015, que teria se transformado em menos sólido e mais líquido, um processo conhecido como liquefação. Segundo Gama (2015), a transformação do estágio do rejeito que representa a liquefação se desenvolve em virtude de vibrações no terreno, sismos induzidos que podem ser consequência, que procede de alguma instabilidade no alicerce sobre o qual a barragem está construída.

O outro fator recorrente foi o *piping*, problema que danifica a estrutura da barragem e possibilita rompimentos, constitui-se de surgimento de canais dentro da estrutura, uma representação da característica heterogênea da lama.

São constituídos pequenos funis, por onde a água termina passando. Esse procedimento de erosão interna é diversas vezes agravado por falhas nos processos de drenagem. Isso ocorre, devido ao peso da pressão da lama de rejeitos sobre o fundo da estrutura, resultando com que os filtros sejam amassados e fiquem muitas vezes entupidos.

Mais instável fica a estrutura, quando o acúmulo de água for grande, ocasionando assim maior probabilidade de ruptura da contenção. Embora haja vantagem econômica, o método de alteamento de barragem à montante, associado à técnica 25 de disposição hidráulica sujeita a estrutura a riscos como elevação da linha freática, liquefação, e *piping*, principalmente pelo fato dos alteamentos serem dispostos sobre fundação composta por camadas fofas de rejeito dificultando a implantação de tapetes drenantes para a drenagem interna (GAMA, 2019).

O método, considerado mais econômico, foi utilizado na construção das duas barragens que se romperam em Mariana e Brumadinho. O fenômeno da liquefação torna o solo fluido e, portanto, mais propenso à movimentação. Com isso a estrutura não suportou a mudança de estado do material. Estudos apontam que depósitos de rejeitos como de Brumadinho são altamente suscetíveis à liquefação.

Para monitorar essas estruturas, explicou Gama (2019), é comum o uso de piezômetro, aparelho que auxilia a avaliação do nível de líquido no corpo da barragem, e do inclinômetro, que por sensores mede o movimento interno desse corpo, além de levantamentos topográficos. Dados entregues pela Vale mostram que os piezômetros não detectaram movimentação, do

fluxo da água na estrutura (GAMA, 2019).

Segundo Molion (2015), uma das razões da maior vulnerabilidade de Minas Gerais a esse tipo de desastre advém das características peculiares do solo local. Aquela região contém muitas cavernas; então, na medida em que vai se depositando água, ela cria pressão e o terreno vai acomodando, o que produz pequenos abalos sísmicos, inferiores a 2 na escala Richter. Isso vai mexendo na estrutura. E nessa época do ano, aquela região recebe maior intensidade de chuva. Essa combinação de fatores causa um desastre.

Ainda sob o mesmo autor, sustenta que a ausência de estudos consistentes de sondagem e de inspeção contínua das obras contribui significativamente para o cenário recorrente de colapso de barragens. A vulnerabilidade do Estado de Minas Gerais também é explicada pela maior exploração de atividade minerária, a qual necessita dessas estruturas em seu processo produtivo. Contemporaneamente existem 754 barragens em Minas Gerais, sendo 317 delas de rejeitos minerários. Retrata ainda sobre a existência das cangas que recobrem uma parcela do solo do quadrilátero ferrífero de Minas. As contenções de rejeito construídas no Brasil possuem lamas com propriedades densas, úmidas e bastante heterogêneas; suas características podem variar de um ponto para outro da estrutura, podendo evidenciar grandes diferenças no barramento, quanto à qualidade do material.

Não chovia no momento da tragédia em Brumadinho, mas na barragem, foram acumulados precipitações dos meses anteriores. É como se a massa de rejeitos que está exposta na superfície fosse uma esponja: a água infiltra e vai passando das camadas de cima para as de baixo, que já estão saturadas. Segundo ele, um dos indícios de que isso pode ter acontecido é o fato de que a Vale instalou na estrutura um sistema conhecido como dreno horizontal profundo (DHP). "Só é feito quando é preciso acelerar a drenagem" (GAMA, 2019, p. 1).

O comprometimento do sistema de drenagem e filtro pode causar dois tipos de problemas. Se os drenos e filtros forem obstruídos e a água não puder seguir o seu caminho (percolação), pode haver acúmulo em algumas partes, causando a liquefação. Já se houver uma falha que permita que o rejeito chegue à barragem com partículas muito grandes, a movimentação desses grãos pode gerar canais por onde a água passa a percorrer preferencialmente (o chamado '*piping*'), o que pode provocar infiltrações e erosão na estrutura.

5 CONCLUSÃO

Com fundamento em estudos de diferentes casos de rompimento de barragens de rejeitos, foi possível verificar as prováveis causas das rupturas, através dos dados

analisados das diversas falhas e fatores que contribuíram para o colapso das estruturas.

Ao se tratar de segurança, sugere-se fiscalização e monitoramento dessas estruturas, pois, não são todos os responsáveis pela operacionalização que respeitam às leis e normas vigentes impostas em relação ao monitoramento constante e adequado, e este motivo tem provocado o colapso desse tipo de estrutura.

Os principais motivos para os rompimentos de barragens são má gestão por parte dos responsáveis e chuva incomuns (em geral, valores de precipitação acima das médias históricas para a região). Tais incidentes podem ser minimizados empregando padrões de engenharia apropriados. Este autor ressalta a importância de se considerar os efeitos das mudanças climáticas, elaborar um completo planejamento de manutenção da barragem e implementar um programa de monitoramento desde a concepção inicial (AZAM, 2010).

Um dos principais cuidados para evitar a tragédia é uma verificação realizada fundamentada em instrumentos específicos, que têm a função de aferir as reais condições das barragens. Esses riscos podem ser sensivelmente reduzidos com a implantação de um sistema de observação através de instrumentos, inspeções visuais periódicas, controles topográficos de deslocamentos, levantamentos batimétricos, etc. Desse modo, permite-se o acompanhamento pronto e permanente do estado de desenvolvimento do empreendimento, na fase de construção, durante o primeiro enchimento e na fase de operação.

O monitoramento do nível de água no interior dessas estruturas deve ser constante, e podem ser realizadas através de medidas pluviométrica, piezométricas, controle de vazão do nível d'água no reservatório, visando assim eliminar riscos como a liquefação e *piping*. No aspecto de segurança, o método alteamento a jusante oferece menores riscos, pois permite o controle da linha de saturação, permitindo o correto desempenho geotécnico da barragem.

A disposição hidráulica de rejeitos em barragens alteadas para montante e seu gerenciamento em função da segurança, sugere preocupações para o aumento da segurança desse tipo de barragem (SILVA, 2010). Segundo Figueiredo (2007), a ocorrência de acidentes aliada à falta de controle do método de lançamento da polpa de rejeito e, conseqüentemente, a dificuldade em se prever o comportamento geotécnico deste tipo de estrutura, resultam em maiores fatores de riscos de acidentes.

O uso do rejeito como principal material de construção de barragens de contenção, exigiria a utilização de princípios geotécnicos na elaboração do projeto e no controle de qualidade da construção, visto que o comportamento geotécnico da barragem será

dependente de parâmetros do rejeito, tais como deformação, resistência e permeabilidade (AZAM, 2010).

Conclui-se que medidas terão que ser adotadas para melhoramento do monitoramento das barragens. A solução para mitigar os riscos desses eventos é a implantação de uma fiscalização periódica mais rigorosa e a adoção de estudos e técnicas estruturais mais eficientes. Quanto à redução dos danos, mostra-se necessária a implantação de medidas preventivas como a instalação de sistemas de alerta precoce e de estruturas hábeis a resistir aos impactos nos locais possivelmente atingidos em caso de rompimento.

REFERÊNCIAS

ABNT -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**Tubo de cobre leve, médio e pesado, sem costura, para condução de fluidos – Requisitos**”. NBR-13206. 2006.

AFFONSO, H. M. M. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. 2004, 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PUC Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, 2004.

ANCOLD (1999). **Guidelines on Tailings Dam Design**, Construction and Operation Australian National Committee on Large Dams. 53 p.

ARAUJO, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

Araújo, C. B. (2006). **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AZAM, S.; LI, Q. *Tailings dam failures: a review of the last one hundred years*. Geotechnical News, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

BRASIL. Portaria no 526 de 03 de dezembro de 2013. **Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens**. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília, 2010.

BRUCE, I.G. (1998). **The Importance of Tailings Stability**. Case Studies on Tailings Management International Council on Metals and the Environment (ICME), p. 13 – 15.

CARDIA, T. D. **Detecting trends using Spearman’s Rank Correlation Coefficient**. *Environmental Forensics*, v. 2, p. 359-362, 2015.

CBDB (2001). Guia Básico de Segurança de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens, 77 p.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB. **Comunicação pessoal, tratando de projeto de lei sobre segurança de barragens**, 2011.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA Resolução Conama no 237, de 19 de novembro de 1997. **Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, Brasília, DF, 22 dez. 1997. Seção 1. p. 30.841-30.843.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. **Deliberação Normativa No 87. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM no 62**, de 17/12/2002. Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais, 18 de junho de 2005. 9 p.
DNPM. Portaria Nº 416, de 03 de setembro de 2012. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF. 2012.

DNPM. **Departamento Nacional de Política de Mineração mineração** . In: SIMPÓSIO SOBRE GEOTÉCNICA DE CAMPO – SINGEO’90, Rio de Janeiro: ABMS, 2013. p. 119-128

ESPOSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. Tese de Doutorado em Geotecnia - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, p. 363. 2010.

FEBRABAN, (2016). *Regulatory Impact Analysis in OECD Countries. Challenges for Developing Countries, OECD, Paris.*

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Lista de Barragens 2014. In lista de barragens_2014_publicacao.xls (Ed.). 2014.

FIGUEIRA, P. C. S. **Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens**. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO – SINGEO’90, Rio de Janeiro: ABMS, 2013. p. 119-128

FIGUEIREDO, M.M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 100 p.,2007.

GAMA, Fabrício. **Minas tem quase 100 barragens sem fiscalização**. Disponível em:<http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/11/17/interna_gerais,708767/min-as-tem-quase-100-barragens-sem-fiscalizacao.shtml>. Acesso em 08 dez. 2019.

GEO KLANTENDANG, T.; MARTINS, R. *Safety risks of small dams*. In: BERGA, L. (Ed.) *Dam Safety*. Rotterdam: Balkema, 2015. p. 283-288.

GUERRA, M . **Estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PUC Rio de Janeiro: Departamento de

Engenharia Civil, 2007.

IBAMA. (2015). **Laudo técnico preliminar impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Minas Gerais**. Novembro de 2009.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira**. IBRAM, 2016. Disponível em: <
<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006389.pdf>>. Acesso em: 15 abril 2019.

ICOLD. **A guide to tailings dams and impoundments**. Paris: ICOLD, 244 p. 1997. (Bulletin, 106). ICOLD. Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences. Paris: ICOLD, 144 p. 2001. (Bulletin, 121).

KIERNAN, P. **Barragens de rejeitos colossais elevam risco de acidentes como o de Mariana**. 2016. Disponível em: . Acesso em: 27 jan. 2019.

MARTIN, T. E., & MCROBERTS, E. C. (1999). **Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams**. In Proceedings of the Sixth International Conference on Tailings and Mine Waste, Vol. 99, 287-302.

MASSAD, M. B. **Tailings dams from the perspective of conventional dam engineering**. In: CANADIAN DAM ASSOCIATION CONFERENCE, Canadá: Sudbury, Ontario, 2003.

MSIB, **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens - 2002** - Ministério da Integração Nacional, Brasília, 2002. Acesso na rede mundial de computadores em 12/04/12:
http://www.mi.gov.br/infrastrukturahidrica/publicacoes/manual_barragens.asp.

MENESCAL, R. A.; CRUZ, P. T.; CARVALHO, R. V.; FONTENELLE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. F. **Uma metodologia para avaliação do potencial de risco em barragens do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 113 semi-árido**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24., 2001. Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2001.

MOLLION., LIMA, S. E. J. **Projeto estudo da vulnerabilidade à contaminação dos mananciais subterrâneos decorrente da extração do carvão mineral**. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM, Vol. 1, Relatório Interno – Porto Alegre, 2015.

PASSOS, N. C. S. T. (2009). **Barragem de Rejeito: Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeito de Minério de Ferro utilizando Ensaios de Campos-Um Estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. Ouro Preto, 2012, 93 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas.

POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS. Lei nº12.334 de 20 de setembro de 2018.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós- Graduação Geotecnia

e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

VICK, S. G. **Considerations for estimating structural response probabilities in dam safety risk analysis.** Denver, Colorado: U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 1984.

VOGEL, A. *Risk classification of dams in relation to a failure-cause-specific break mechanism.* In: BERGA, L. (Ed.) *Dam Safety.* Rotterdam: Balkema, 1998. p. 377- 381.

WAGENER, F. M.; CRAIG, H. J.; BLIGHT, G.; McPHAIL, G.; WILLIAMS, A. A. B.; STRYDOM, J. H. **The Merriespruit tailings dam failure – a review.** In: PROCEEDINGS, TAILINGS AND MINE WASTE, Colorado: Fort Collins, 1997. p. 925-952.