



Análise da Sustentabilidade Ambiental na Operação de Barragens de Rejeitos

Raffisa Siqueira Monteiro¹; Adacto Benedicto Ottoni¹

✉ adactoottoni@gmail.com

1. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da UERJ.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 06 de agosto de 2022 Aceito em: 30 de novembro de 2022 Publicado em: 31 de agosto de 2022

Resumo: A atividade de mineração contribui significativamente no desenvolvimento de um país, devido a atração por investimentos financeiros nesse setor, altos lucros e geração de empregos. Contudo, o histórico de acidentes graves causados pelo rompimento de barragens de rejeito tem mostrado falhas na operação e no gerenciamento de riscos que se inicia no planejamento do projeto e se estende na escolha do método de alteamento e no monitoramento da barragem através da inspeção e instrumentação. Os acidentes provocados por esse tipo de estrutura causam consequências sociais, econômicas e ambientais desastrosas. Este estudo visa identificar as causas contribuintes para a ocorrência de acidentes com barragens de rejeito de mineração e demonstrar as consequências se as medidas de segurança não forem adotadas para prevenir o rompimento e garantir a funcionalidade. O trabalho tem como objetivo estudar os desafios atuais da mineração no Brasil e otimizar os recursos naturais através do conceito da economia circular, visando minimizar os impactos ambientais que podem ser causados para sociedade. Também será abordado nesse artigo a precariedade e carência dos estudos hidrológicos em projetos de barragens de rejeitos, bem como a necessidade de se implantar políticas públicas com sustentabilidade ambiental na gestão de resíduos, visando reduzir os riscos de acidentes em barragens de rejeitos, bem como de preservar os recursos minerais para as futuras gerações.

Palavras-chave: Acidentes em barragens, Mineração, Rejeitos, Meio Ambiente.

Analysis of Environmental Sustainability in the Operation of Tailings Dams

Abstract: The mining activity contributes significantly to the development of a country, due to the attraction for financial investments in this sector, high profits, and generation of jobs. However, the historic of serious accidents caused by the rupture of tailings dams it has shown failures in operation and risk management that begins in the project planning and extends in the choice of the method of elevation and the monitoring of the dam through the inspection and instrumentation. The accidents caused by this type of structure cause disastrous social, economic and environmental consequences. This study aims to identify the contributing causes for the occurrence of accidents with mining tailings dams and demonstrate the consequences if safety measures are not adopted to prevent disruption and guarantee functionality. The work aims to study the current challenges of mining in Brazil and optimize natural resources through the concept of circular economy, aiming to minimize the environmental impacts that can be caused to society. The precariousness and lack of hydrological studies in tailings dam projects will also be addressed in this article, as well as the need to implement public policies with environmental sustainability in waste management, aiming to reduce the risks of accidents in tailings dams, as well as to preserve mineral resources for future generations.

Keywords: Dam accidents, Mining, Tailings, Environment.

Análisis De Sostenibilidad Ambiental En La Operación De Presas De Relaves

Resumen: La actividad minera contribuye significativamente al desarrollo de un país, debido a la atracción de inversiones financieras en este sector, las altas ganancias y la creación de empleo. Sin embargo, la historia de accidentes graves causados por la ruptura de presas de relaves ha mostrado fallas en la operación y gestión de riesgos que comienza en la planificación del proyecto y se extiende en la elección del método de alteamento y en el monitoreo de la presa a través de la inspección e instrumentación. Los accidentes causados por este tipo de estructuras causan consecuencias sociales, económicas y ambientales desastrosas. Este estudio tiene como objetivo identificar las causas que contribuyen a la ocurrencia de accidentes con presas de relaves mineros y demostrar las consecuencias si no se adoptan medidas de seguridad para evitar interrupciones y garantizar la funcionalidad. El trabajo tiene como objetivo estudiar los desafíos actuales de la minería en Brasil y optimizar los recursos naturales a través del concepto de economía circular, con el objetivo de minimizar los impactos ambientales que se pueden causar a la sociedad. La precariedad y la falta de estudios hidrológicos en los proyectos de presas de relaves también se abordarán en este artículo, así como la necesidad de implementar políticas públicas con sostenibilidad ambiental en la gestión de residuos, con el objetivo de reducir los riesgos de accidentes en las presas de relaves, así como preservar los recursos minerales para las generaciones futuras.

Palabras clave: Accidentes de presas, Minería, Relaves, Medio Ambiente.

INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas funcionais que permitem o acúmulo de resíduos sólidos e água de determinados tipos de processo, tendo em vista suas diferentes utilidades, principalmente no desenvolvimento econômico de um país. As empresas de mineração têm como objetivo principal a produção de minério, o que não há como existir sem que ocorra a geração de rejeitos que serão acondicionados em estruturas armazenadoras conhecidas como barragens de rejeitos (ALMEIDA, 2002; LEITE, 2019).

Para tanto, sua construção deve ser bem planejada, considerando que devem atender a normas ambientais e se estender durante todo o período de atividade da mineração para que ocorra o aprimoramento do projeto e avaliação de possíveis alterações. É necessário que todas as etapas do ciclo de vida sejam contempladas, desde a fase inicial do projeto conceitual até a fase final de procedimentos pós fechamento. Evidencia-se ainda que todas as etapas devem ser realizadas de acordo com as normas ambientais vigentes e os critérios econômicos, geotécnicos, estruturais, sociais e de segurança e risco (MACHADO, 2007; FERNANDES, 2020).

Em contrapartida, se as barragens de resíduos não forem seguras, projetadas, construídas e mantidas de forma adequada, com o tempo surgem problemas de instabilidade, possibilitando a ocorrência de falhas, ocasionando incidentes e acidentes. De acordo com Oliveira (2010) e Ramos *et al.* (2020), tais ocorrências ameaçam a segurança das pessoas e provocam impactos significativos nos ecossistemas. Vale salientar que aconteceram grandes desastres relacionados a falhas de barragens nos últimos anos em todo mundo devido à

negligência nos trabalhos de manutenção e aplicação dos dispositivos de segurança, que resultaram em perdas irreversíveis para todos.

O objetivo do presente estudo é demonstrar as causas contribuintes para a ocorrência de desastres com barragens de rejeito de mineração e demonstrar as consequências ambientais se as medidas de segurança não forem adotadas para prevenir o rompimento e garantir a funcionalidade. Obter os danos ambientais e enumerar controle e fiscalização ambiental que devem ser contemplados na operação das barragens de rejeitos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho foi elaborado utilizando-se de revisão bibliográfica, extraída de livros, artigos científicos publicados, dissertações, sites disponíveis acerca do presente tema. Teve como base leis e normas vigentes as quais são determinantes para analisar os problemas relacionados às barragens de contenção de rejeitos, como as causas e consequências dos acidentes que ocorreram nesse tipo de construção.

Acerca dessas normas vigentes, é necessário a utilização dos conhecimentos existentes durante as etapas de formulação do projeto, construção e operação nas barragens. Pois o uso adequado dos dispositivos de segurança existentes, associado aos procedimentos estabelecidos pelas normas ambientais de barragem cooperam para segurança.

É importante ressaltar que as empresas mineradoras usam as barragens para fins econômicos além de trazer desenvolvimento para o país, porém falta ética profissional, tendo em vista a falta de inspeções e constante monitoramento, levando a possíveis acidentes. Agregasse a isso, as possíveis deficiências nos processos de licenciamento e fiscalização ambientais desses empreendimentos (CARNEIRO, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Legislação federal brasileira em segurança de barragens

É necessário entender que o cumprimento de uma lei deve ser monitorado; para tanto os principais aspectos técnicos devem ser apresentados e discutidos desde o planejamento da construção até a possível desativação (NEVES, 2018).

Ainda segundo Neves (2018), a Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010), estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, criando assim

o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) que tem como finalidade garantir que os padrões de segurança sejam observados, assim como promover, regulamentar e acompanhar as ações de segurança utilizadas pelos empreendedores, visando a redução de acidentes e suas consequências, junto à população vizinha.

A PNSB estabelece algumas diretrizes para o planejamento de segurança de barragens desde as etapas de projeto até sua operação e desativação e o envio de informações ao público para participar de ações preventivas e emergenciais. Além disso, considera o empreendedor como responsável legal pela segurança da barragem (PINTO, 2010; RAMOS *et al.*, 2020).

De acordo com a lei 12.334 (BRASIL, 2010), a fiscalização da segurança de barragens caberá à entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico, à entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos ou à entidade que forneceu licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais.

O órgão responsável pela fiscalização das barragens de mineração é o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (PINTO, 2010; RAMOS *et al.*, 2020).

À Agência Nacional de Águas (ANA) é atribuída a função de promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores na implementação da PNSB, organizar, implantar e gerenciar o Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNISB) e uma vez no ano elaborar o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) que deverá ser enviado ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Após apreciação deste Conselho o Relatório será encaminhado ao Congresso Nacional (NEVES, 2018).

Características geotécnicas dos rejeitos

Os rejeitos podem ser definidos como frações de minério desprovidas de mineral útil, obtidas através do beneficiamento do minério e sem nenhum valor econômico (SOARES, 2010; THOMÉ & PASSINI, 2018).

Os minérios são submetidos a processos de beneficiamento com a finalidade de extrair os elementos que sejam de interesse econômico que são os produtos finais. Os rejeitos são os resíduos que resultam desse processo. Esses rejeitos possuem uma fração líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em peso (ESPÓSITO, 2000; ARAÚJO, 2006; ECCO, 2022; GUIMARÃES, 2021).

Os rejeitos podem apresentar características físicas variáveis, podendo variar de solos com granulometria fina e alta plasticidade até solos arenosos. Apresentam forma angular e sua

composição química se altera de acordo com o tipo de minério processado e o tipo de reagente utilizado no processo de beneficiamento (ARAÚJO,2006; KOSSOFF *et al.*, 2014; FAJARDO, 2020; GUIMARÃES, 2021).

Soares (2010) e Thomé & Passini (2018) afirmam que os depósitos de rejeitos resultam em classes distintas de material: lamas depositadas por sedimentação e areias lançadas por mecanismos hidráulicos e que a granulometria consiste em uma das características mais importantes pois determina o comportamento geotécnico do rejeito.

Cardozo *et al.* (2016) e Ferrara (2020) dizem que devido as reações químicas ocorridas durante o processo de beneficiamento mineral, os fluidos de rejeitos, podem apresentar composições iônicas diversas sendo danosas ao homem e ao meio ambiente devido a capacidade de interação e reação química com os materiais utilizados na construção do aterro pois alteram a permeabilidade do solo.

Segundo Chaves (1996) e Luz & Lins (2018), a construção de barragens de rejeitos constitui-se em um processo multidisciplinar, pois envolve profissionais da engenharia civil e geotécnica e suas respectivas equipes, responsáveis pelo projeto e execução da obra e da engenharia de processos, responsáveis pelo beneficiamento de minério e pelas características geotécnicas do material resultante.

É relevante que se deposite o material transportado na barragem de rejeitos minerais, em conformidade com os critérios estabelecidos e abordados neste artigo. Nessa etapa é formado um sedimento saturado em água. O excesso dessa água, deve ser expelido para que haja maior redução de volume e aumento da resistência mecânica do sedimento, atendendo às especificações regulatórias, fazendo assim a deposição segura do rejeito (WANG *et al.*, 2014; CORRÊA & BRASIL, 2021).

Principais métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos

Segundo Soares (2010) e Thomé & Passini (2018), devido ao fato de o setor de mineração estar constantemente gerando resíduos, o método de construção de barragens por alteamento sucessivo é um dos mais utilizados no mundo, pois os rejeitos são aproveitados durante as etapas de construção refletindo em baixo custo e flexibilidade construtiva devido a variação de volume de rejeitos a serem armazenados.

Os métodos mais utilizados durante os processos de alteamento de barragens de contenção de rejeitos são: de montante, de jusante, da linha de centro, conforme demonstrado na Figura 1.

Método de Montante

O método de alteamento à montante inicia-se com a estruturação de um dique feito com material argiloso ou enrocamento compactado. Em seguida, o rejeito é lançado utilizando-se canhões no sentido do montante conforme a linha de simetria do dique. Depois é formada a praia onde estão depositados os rejeitos, que se tornarão a fundação. É um processo que se dá até atingir a altura final planejada no projeto (ARAÚJO, 2006; GUIMARÃES, 2021).

Apesar de ser o mais antigo e utilizado nas mineradoras, Araújo (2006) e Guimarães (2021) afirmam que este método apresenta um baixo controle construtivo, de modo especial em relação à segurança. Os alteamentos realizados sobre materiais depositados previamente e não consolidados, são motivos agravantes. Devido ao insuficiente nível de compactação os rejeitos podem apresentar baixa resistência ao cisalhamento e se tornar mais suscetíveis à liquefação devido aos carregamentos dinâmicos e estáticos. Além disso existe ainda certa dificuldade de se implantar um sistema eficiente de drenagem interno para controlar o nível d'água no interior da barragem, gerando um problema adicional que reflete na estabilidade da estrutura.

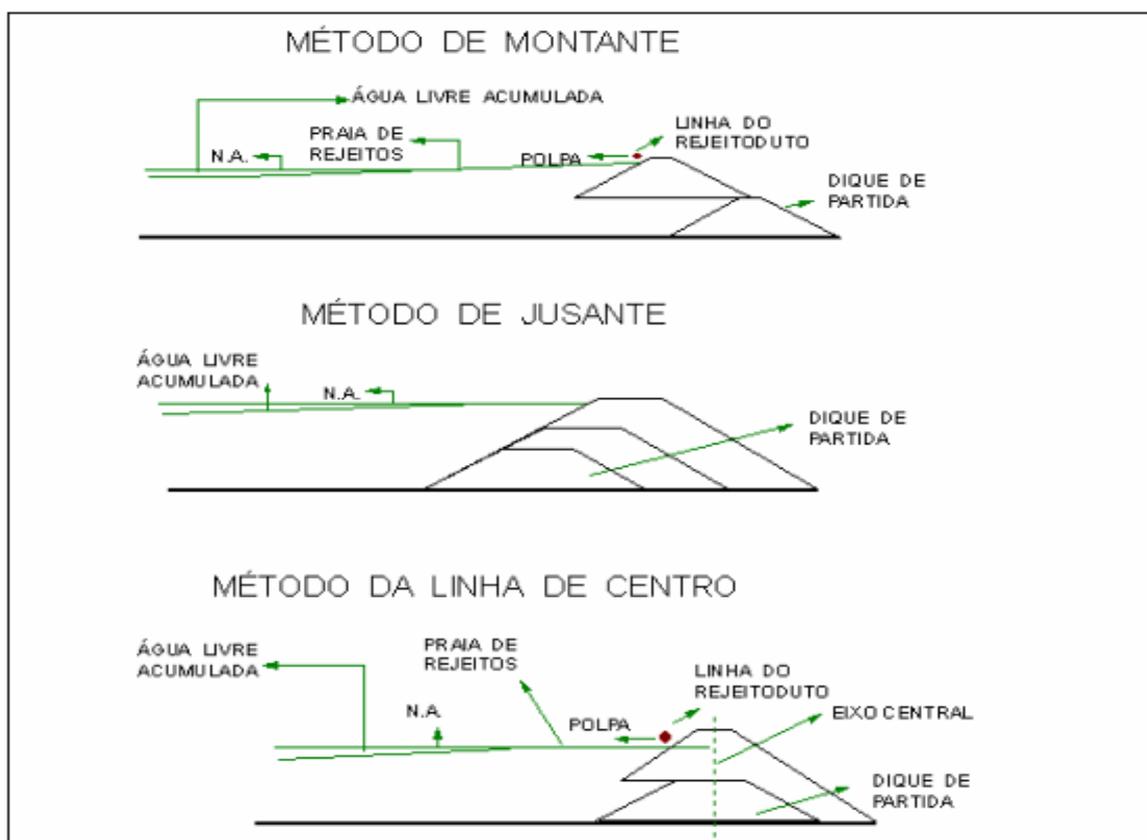


Figura 1. Métodos de alteamento em barragens

Fonte: Espósito (2000).

O Método de Montante tem sido o mais utilizado dentre os três métodos, possui baixo custo devido ao pouco uso dos equipamentos de terraplanagem e rapidez na execução do alteamento, porém é o mais instável e apresenta menor coeficiente de segurança, comparativamente com os outros métodos de alteamento de barragens (TRONCOSO, 1997; QUEIROZ, 2018).

Método de Jusante

Quanto ao método de jusante, o alteamento da barragem também se inicia a partir de um dique de partida e é sempre feito a jusante, ou seja, o eixo da barragem se desloca fazendo com que a estrutura cresça proporcionalmente na largura e na altura, e a cada alteamento a estrutura ganha uma base maior o que conseqüentemente garante maior estabilidade. Esse é o tipo mais estável e seguro e minimiza a ocorrência de ruptura por liquefação, possui resistência a vibrações, mas como a cada alteamento o processo fica mais difícil, necessita-se de mais espaço o que implica em custo e tempo de execução mais elevados que nos outros métodos (SOARES, 2010; THOMÉ & PASSINI, 2018).

Método da Linha de Centro

Em relação ao método de linha de centro, o alteamento também se inicia através de um dique de partida e segue o mesmo eixo, seu comportamento estrutural é próximo ao método à jusante e possui custo e tempo de execução menores que o referido método. A escolha pelo método de execução a ser utilizado deve analisar fatores como topografia do terreno, geotecnia, hidrologia, concentração e velocidade de deposição dos rejeitos, capacidade de armazenamento do reservatório, compactação e equipes de controle e disponibilidade de equipamentos de terraplanagem no local (SOARES, 2010; THOMÉ & PASSINI, 2018).

Operação das barragens de rejeitos

A implantação dessas estruturas deve ser precedida de um estudo minucioso analisando diversos fatores como: o local adequado à sua implantação; um projeto de instalação de acordo com normas ambientais e de segurança; a utilização de técnicas construtivas seguras e materiais adequados; o emprego de dispositivos de segurança calibrados durante o processo de operação, proporcionando uma instrumentação confiável e eficiente; e também um plano de desativação e reabilitação do local (SOARES, 2010; THOMÉ & PASSINI, 2018).

Tendo em vista que a mineração é uma atividade industrial de vida útil relativamente curta devido ao esgotamento da reserva mineral e que produz impactos físicos e

socioeconômicos no ambiente em que atua, é essencial que o plano de desativação seja integrado ao projeto de extração mineral onde os impactos ambientais serão avaliados. O plano de desativação deve conter ações que permitam a reabilitação ambiental da área e abranger etapas de manutenção e monitoramento pós desativação (CAMELO, 2006; FREITAS *et al.*, 2019).

De acordo com Silveira (2006) e Guidicini & Sandroni (2022), as barragens precisam ser conservadas e seu desempenho monitorado ao longo do tempo, haja vista a relevância do acompanhamento do desgaste e reavaliação dos riscos. O controle e as ações corretivas também devem proporcionar disponibilidade de serviços e materiais a serem utilizados na manutenção das estruturas. É nesse contexto que percebemos a importância da instrumentação nas barragens, visto que dessa forma será possível maior precisão nos parâmetros corretivos, nos quais devem ser atendidos as necessidades de supervisão e planos de ação preventivos.

Machado (2007) e Fernandes (2020) destacam que a instrumentação adequada é capaz de localizar pontos críticos de segurança na estrutura e no processo operacional de uma barragem e deve ser complementada através de inspeções visuais periódicas. Este processo se bem executado garante a segurança mínima necessária para o bom funcionamento da obra.

Segundo Soares (2010) e Thomé & Passini (2018), a instrumentação que compõe os processos de construção e comportamento da barragem de rejeitos em sua vida útil e desativação, é composta dos seguintes dispositivos: piezômetros instalados para investigar a pressão dos fluidos e a compressão de materiais sujeitos a pressões elevadas. Equipamentos que permitem a verificação da velocidade de assentamento de materiais finos e grossos, como os medidores de recalque e os inclinômetros que acompanham as zonas de movimentação e os coletores de água para determinar as vazões da barragem.

Com avanço da tecnologia a instrumentação automatizada também vem ganhando espaço nas construções de grande porte, nesse contexto são utilizados os sensores de fibra óptica, pois possibilitam a aquisição de dados em tempo real e independe das condições climáticas (ROSOLEM, 2017).

O Manual de Operação consiste em um conjunto de procedimentos que auxiliam no gerenciamento da barragem de rejeitos pois estabelece critérios a serem seguidos com a finalidade de proporcionar segurança durante toda vida útil da estrutura (OLIVEIRA, 2010; RAMOS *et al.*, 2020).

Oliveira (2010) e Ramos *et al.* (2020) afirmam que o Manual de Operação das Barragens de Rejeitos deve expor de maneira clara as informações necessárias à operação, manutenção e monitoramento da barragem. É necessário também que haja conhecimento sobre os critérios

operacionais e que os procedimentos de manutenção e operação da barragem atendam estas orientações para que um bom nível de segurança seja alcançado. O manual deve conter também procedimentos de emergência que devam ser executados caso durante as operações haja falhas que possam colocar em risco a segurança das pessoas e do meio ambiente.

O Manual de Operação das Barragens de Rejeitos deve também definir responsabilidades para ações críticas que comprometam a segurança da barragem e determina que ocorrências fora do padrão devem ser comunicadas aos responsáveis apropriados (OLIVEIRA, 2010; RAMOS *et al.*, 2020).

Acidentes com barragens de contenção de rejeitos

Os acidentes causados pelo rompimento de barragens geram grandes problemas ambientais e socioeconômicos, além de perdas significativas. Por esse motivo, faz-se necessária sua regulamentação. Entre os anos de 2000 a 2015, foram identificados alguns acidentes e incidentes significativos envolvendo barragens, o que acendeu um sinal de alerta para a sociedade.

A tabela 1 apresenta alguns exemplos de acidentes ocorridos em barragens de rejeitos no Brasil.

Tabela 1. Exemplos de acidentes em barragens de contenção de rejeitos

LOCAL	ANO	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS
NOVA LIMA	2001	BARRAGEM DE MACACOS DA MINERAÇÃO RIO VERDE	BARRAGEM DE REJEITOS MINERÁRIOS	5 ÓBITOS
CATAGUASES	2003	BARRAGEM DE CATAGUASES DA INDÚSTRIA CATAGUASES DE PAPEL	BARRAGEM DE REJEITOS INDUSTRIAIS	CONTAMINAÇÃO DO RIO PARAÍBA DO SUL, MORTANDADE DE ANIMAIS E PEIXES E INTERRUPÇÃO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE 600.000 PESSOAS POR QUASE 1 MÊS.
MIRAI	2007	BARRAGEM DA MINERAÇÃO RIO POMBA /CATAGUASES	BARRAGEM DE REJEITOS MINERÁRIOS	MAIS DE 4000 PESSOAS DESALOJADAS
ITABIRITO	2014	BARRAGEM B1 DA MINERADORA HERCULANO	BARRAGEM DE REJEITOS MINERÁRIOS	3 ÓBITOS
MARIANA	2015	BARRAGEM DO FUNDÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO	BARRAGEM DE REJEITOS MINERÁRIOS	19 ÓBITOS, 8 DESAPARECIDOS, 600 DESABRIGADOS

Fonte: Modificado de NEVES (2018).

A maioria desses eventos acontece devido a práticas operacionais incompatíveis com o que está no projeto. Um projeto mal elaborado não será salvo por práticas operacionais corretas, assim como um bom planejamento não resiste a práticas operacionais inadequadas (WAGENER *et al.*, 1997; LIMA JÚNIOR & PAIVA, 2018).

O rompimento na barragem de Mariana (MG) em 2015, que comportava 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, foi considerada uma enorme tragédia ambiental no país, foi perceptível a destruição em toda bacia do rio Doce, em Minas Gerais, e reflexos no estado do ES e no oceano Atlântico.

Outro rompimento do século XXI, foi a barragem de rejeitos do Córrego do Feijão em Brumadinho (MG), em 2019. Cerca de milhões de toneladas de lama e rejeitos de minério de ferro, 8km em poucos dias, poluindo o rio Paraopeba (GUIMARÃES, 2021).

Causas de Rupturas de Barragens de Rejeitos

Para diminuir o risco associado ao funcionamento das barragens de rejeitos é necessário que se conheça as principais falhas relacionadas a problemas de segurança, pois identificando os pontos que necessitam de maior atenção diminui-se as ameaças associadas a estabilidade dessas estruturas (OLIVEIRA, 2010; RAMOS *et al.*, 2020).

Segundo Cardozo *et al.* (2016) e Ferrara (2020), a ocorrência de falhas nas barragens de rejeitos dá-se através da associação de deficiências ocorridas entre as etapas de planejamento, construção e operação, podendo ser previstas e evitadas através da utilização correta dos conhecimentos geotécnicos disponíveis na atualidade.

De acordo com o boletim 121 do ICOLD (2001) e Ferreira (2022), foi realizado um estudo sobre as causas de falhas em 221 barragens de contenção de rejeitos ao redor do mundo e foi constatado que a maioria das falhas se deu por gerenciamento inadequado, pois houve negligência na utilização de técnicas de instrumentação, inspeção visual e na verificação rotineira de extravasores e dispositivos auxiliares. Constatou-se também que a maioria dos desastres ocorreram por galgamento, instabilidade nos taludes, percolações e erosões, e estão diretamente relacionados a água devido ao controle inadequado das cheias dos reservatórios.

De acordo com Oliveira (2010) e Ramos *et al.*, 2020, muitos fatores podem influenciar no processo de deformação das barragens, entre eles: baixa resistência ao cisalhamento dos materiais utilizados na barragem; valores elevados de poropressão; variação do nível de água do reservatório, compactação das camadas e atividade sísmica.

A ruptura de barragens de rejeitos pode ocorrer por diferentes motivos como: capacidade de suporte da fundação insuficiente; liquefação do corpo da barragem devido a umidade excessiva associada a vibrações intensas que não permitem drenagem e podem ocorrer de forma induzida ou decorrente de instabilidade nas fundações; ocorrência de galgamento, quando o nível de água ultrapassa a crista da barragem; “pipping” devido a erosão interna da barragem, levando à ruptura geral; velocidade de construção elevada, aumentando as pressões no corpo da barragem e escavações no pé do talude (USP, 2018).

Consequências de Rupturas de Barragens de Rejeitos

A ruptura de uma barragem de contenção de rejeitos pode levar a uma liberação descontrolada de rejeitos ocasionando sérias consequências ao meio ambiente, à segurança pública, ao operador do empreendimento, e às comunidades situadas na sua circunvizinhança. Os danos ambientais podem ser irreversíveis e causar consequências como: prejuízo a saúde da população circunvizinha, a contaminação do lençol freático, drenagem ácida, deslizamento e instabilidade do terreno (DUARTE, 2008; GIGIOTTI *et al.*, 2022).

O acúmulo de sedimentos devido a sua toxicidade altera o pH da água e do solo causando infertilidade da área e prejuízo na biodiversidade da fauna e da flora. A compactação desses detritos associada à baixa porosidade e a presença de elementos químicos utilizados nos processos de beneficiamento gera um ressecamento do terreno criando uma barreira física ao crescimento da vegetação. A hidrologia também é afetada, pois o depósito de resíduos instáveis nas margens dos rios favorece um intenso processo de erosão e lixiviação (CARNEIRO, 2018).

Os impactos causados pelo rompimento de uma barragem de rejeitos podem causar danos irreversíveis à população vizinha. As famílias afetadas sofrem com a perda de entes queridos; dificuldades como a falta de água devido a contaminação dos rios tornando a água imprópria para o consumo; prejuízos a saúde; alteração em seu padrão de vida e são vítimas das mineradoras que prestam um auxílio insuficiente. Muitas localidades foram devastadas, ocasionando a desagregação dos vínculos sociais das comunidades, e constantes impactos na economia local, além da falta de perspectiva para o futuro, restando apenas memórias de tudo que viveram. Os moradores das cidades atingidas e das redondezas que possuem atividade de mineração são dependentes desses serviços para economia, visto que depois do rompimento de barragens, muitos ficam desempregados (CALDAS, 2018).

Considerando os efeitos das falhas dessas estruturas, a responsabilidade do empreendedor e dos profissionais envolvidos é pertinente classificarmos as ocorrências como desastres, pois pessoas foram afetadas, atingidas, prejudicadas ou até mesmo morreram, em

consequência de negligência, falta de precauções, irresponsabilidades que poderiam ser previstos, por isso não podem ser classificadas como acidentes, mas crimes ambientais desastrosos (CALDAS, 2018).

Planos de respostas e de ações emergenciais

É necessário que o Manual de Operação de Barragens contenha um Plano de Ação de Emergência (PAE) caso haja a identificação de algum risco iminente em relação à estrutura. O empreendedor deve elaborar e atualizar anualmente o PAE (CARNEIRO, 2018).

O PAE deve conter uma lista com os sistemas de alerta a serem usados em caso de emergência e uma lista de entidades a serem notificadas em situações envolvendo riscos de vazamento ou rompimento (CARDIA *et al.*, 2015).

Em caso de derramamento ou vazamento algumas medidas de controle devem ser tomadas como a implementação de um sistema eficaz de comunicação a população; a preparação de um plano de evacuação das populações em risco; o estabelecimento de um zoneamento crítico de áreas potencialmente inundáveis ao longo do vale e um plano eficaz de assistência as vítimas (ALMEIDA, 2002; LEITE, 2019).

Gerenciamento de Riscos

Segundo Duarte (2008) e GIGOLOTTI *et al.* (2022), para realizar um gerenciamento de riscos eficiente é primordial analisar as possíveis falhas em que a estrutura está suscetível. Para isso, devem ser identificados todos os pontos críticos e se estimar a potencialidade dos defeitos e prever gastos.

De acordo com a ISO 31000 (2018), o propósito da análise de riscos:

É compreender a natureza do risco e suas características, incluindo o nível de risco, onde apropriado. A análise de riscos envolve a consideração detalhada de incertezas, fontes de riscos, consequências, probabilidade, eventos, cenários, controles e sua eficácia. Um evento pode ter múltiplas causas e consequências e pode afetar múltiplos objetivos. (ISO 31000, 2018, p.13)

As barragens de rejeitos necessitam de um plano de ação a ser seguido em caso de um eventual acidente. Pois eventos com vazamentos de rejeitos causam consequências negativas para pessoas assim como para o meio ambiente. Dessa forma, é necessário que se tenha planos de resposta à emergência que envolva as comunidades para que saibam o que fazer em caso de acidente (MCLEOD, 1999; PEREIRA *et al.*, 2022).

Segundo Bruce (1998) e Pierre (2021), para que haja sucesso no gerenciamento de barragens de rejeitos é necessário a implantação de manuais de operação, de inspeções periódicas e da colaboração de uma equipe treinada e dedicada.

Conforme a Norma da ABNT 13.028/2017, é necessário atender os critérios de definição do período de cheia, utilizando métodos adequados para esse cálculo no projeto e estudos preliminares. Cada instalação terá que identificar as bacias de captação e verificar a infraestrutura, o que irá contribuir para análise de riscos. É importante visar a segurança operativa contra risco de acidentes; além dos aspectos já citados do monitoramento dos taludes da barragem contra “piping” (CARDOZO *et al.*, 2016; FERRARA, 2020), baixa resistência ao cisalhamento dos materiais utilizados na barragem (Oliveira, 2010; RAMOS *et al.*, 2020), e outros.

Um dos fatores de segurança operativa em uma barragem de rejeitos seria a implantação de uma galeria interceptora ao longo de toda a bacia hidráulica do reservatório a montante, como mostrado na Figura 2.

Considerando que normalmente os acidentes em barragens de rejeitos, como os ocorridos em Mariana e Brumadinho, ocorrem no período chuvoso, para uma operação segura de uma barragem de rejeitos, deve-se fazer estudos hidrológicos, e se projetar um cinturão de proteção do reservatório contra o aporte das águas naturais no período chuvoso do ano hidrológico. Esse cinturão de proteção corresponde a uma galeria interceptora dos escoamentos de chuva na área externa à bacia hidráulica do reservatório de rejeitos, impedindo ou reduzindo significativamente o aporte dessas águas ao reservatório de rejeitos durante o período chuvoso. O dimensionamento dessa galeria interceptora seria feito através dos estudos e cálculos hidrológicos-hidráulicos para os projetos de drenagem (SILVA, 2015; KOURTIS & TSIHRINTZIS, 2021).

Esse cinturão de drenagem em toda a bacia hidráulica da barragem de rejeitos, como mostrado na Figura 2, irá direcionar todas as águas naturais no entorno da barragem de rejeitos para o rio, garantindo segurança e sustentabilidade para o Empreendimento, e reduzindo sensivelmente os riscos de rompimento da barragem durante os períodos chuvosos. Os estudos hidrológicos são muitas vezes negligenciados nos projetos de barragens de rejeitos, bem como essa drenagem citada no entorno da bacia hidráulica do reservatório.

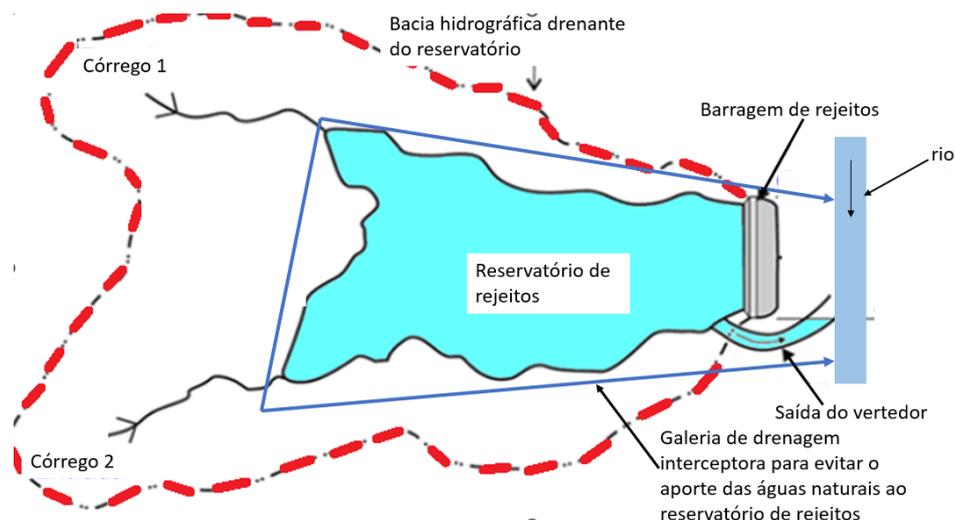


Figura 2. Diagrama esquemático da planta de uma barragem de rejeitos
 Fonte: Modificado de CARDOZO *et al.* (2016).

Um outro aspecto relevante para melhorar a sustentabilidade ambiental na exploração mineral é a adoção de uma política adequada de gestão de resíduos sólidos, levando em conta todo o ciclo de vida do produto. A sociedade e a indústria estão tendo de enfrentar grandes desafios na produção dos bens de consumo e o equilíbrio entre os recursos naturais disponíveis e a preservação desses recursos para a atual e futura gerações. Os recursos globais são finitos e o crescente aumento da exploração mineral vai tornar essa matéria-prima cada vez mais escassa, podendo afetar a sociedade (LUTHRA *et al.*, 2022).

O conceito de economia circular e do ciclo de vida dos bens de consumo são temas muito importantes atualmente, pois incentiva a retenção e recuperação de valores dos recursos nas organizações, fomenta a conscientização da sociedade para maior uso dos recursos, visto que um dos grandes desafios atuais na mineração é o tratamento e a otimização dos recursos naturais (SOARES, 2010; THOMÉ & PASSINI, 2018). Na Figura 3 está mostrado um diagrama esquemático do conceito da economia circular na utilização pela sociedade dos bens de consumo. No caso da exploração mineral, ela seria muito minimizada, pois o conceito da economia circular visa reaproveitar os resíduos em toda a cadeia produtiva, desde a exploração mineral até o consumo final pela população. Dentro deste conceito, vem sendo cada vez mais ampliado os trabalhos de mineração urbana (LUTHRA *et al.*, 2022), reaproveitando todos os resíduos minerais na cadeia produtiva, evitando o seu descarte no meio ambiente, e reduzindo a exploração mineral.

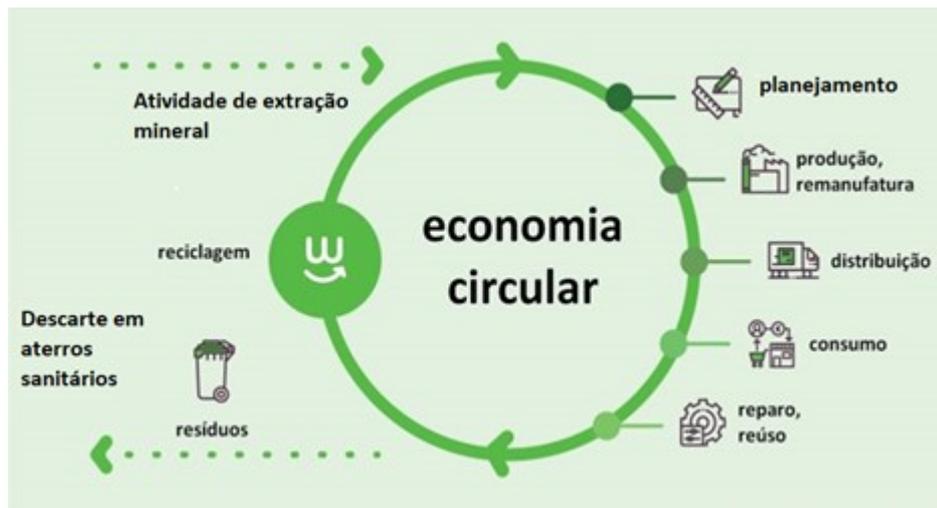


Figura 3: Conceito de economia circular
Fonte: Modificado de CAMELO (2006).

As políticas públicas com sustentabilidade ambiental na gestão de resíduos incluem o consumo consciente, a redução, o reaproveitamento e a reciclagem como atividades prioritárias (WONG, 2022). Desta forma, pode-se reduzir a exploração mineral e o porte das barragens de rejeitos, minimizando os riscos de acidentes por rompimentos dessas barragens, como ocorreu com a poluição do rio Doce com o rompimento da barragem de Mariana.

O primeiro problema identificado foi no sistema de drenagem, que resultou na entrada de lama nas galerias e se misturou na barragem, gerando um processo de liquefação do material. A segunda foi 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, a ocorrência de abalos sísmicos na região, que foi considerado o gatilho para o início da erosão (CARNEIRO, 2018). Com a gestão sustentável dos resíduos pela sociedade, dentro do conceito da economia circular, vai haver uma demanda menor para a extração mineral (LUHTRA, 2022), com a necessidade da construção de barragens de rejeitos menores, e, portanto, menos riscos de acidentes devido a essas obras de retenção de resíduos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização desse estudo foi identificada a importância de um licenciamento ambiental bem elaborado, bem como da necessidade de uma participação mais efetiva dos órgãos fiscalizadores, para que se evite riscos da ruína da estrutura da barragem de rejeitos e possíveis desastres.

É imprescindível uma seleção adequada do local de implantação do empreendimento, visando menores riscos a população circunvizinha e do meio ambiente, pois ainda continuam ocorrendo falhas extraordinárias que provocam desastres severos na vida dos indivíduos que vivem no entorno dessas estruturas, afetando a sociedade e determinada área de abrangência, trazendo danos e prejuízos de forma extensiva e de difícil superação pelas comunidades afetadas. Sendo assim, todo processo de implantação deve ser repensado e bem monitorado, em função da gravidade desses eventos, que causam danos humanos, materiais, ambientais e consequentes perdas sociais e econômicas quando não estão em conformidade com as normas e leis estabelecidas.

Por se tratar, portanto, de uma problemática atual envolvendo riscos graves, é recomendável a realização de processos de licenciamento ambiental mais eficientes para esses empreendimentos, bem como a gestão das demandas de fiscalização de modo que permitam o controle, a segurança e funcionalidade da barragem. Cabem às mineradoras a adoção de medidas preventivas, através da realização de inspeções periódicas e da utilização de dispositivos de segurança calibrados e confiáveis durante a vida útil da estrutura.

Recomenda-se, então, que durante as etapas de estudo da viabilidade do projeto sejam realizados com maior critério: os estudos hidrológicos na bacia hidrográfica, para evitar o aporte de água natural ao reservatório da barragem de rejeitos, que nos períodos de chuvas intensas podem colocar em risco a estrutura da barragem, que não foi dimensionada para receber esse possível aporte indevido dessas águas; a escolha do método de alteamento a ser utilizado, para que se evite a ruptura da estrutura; e também a seleção de um local adequado para implantação do empreendimento, com menores riscos à população e ao meio ambiente.

Recomendamos, também, a necessidade em se ampliar as políticas públicas para uma gestão sustentável de resíduos, dentro do conceito da economia circular, visando reduzir os riscos de acidentes com as barragens de rejeitos, bem como o de preservar esses recursos minerais para as futuras gerações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B. **Risco Associado à Segurança de Barragens**. Curso Análise de Riscos (FUNDEC). Lisboa, 2002. p.1-23.

ABNT. **NBR ISO 31000: Gestão de Riscos - Princípios e Diretrizes**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 20 set 2010.

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

CALDAS, Graça. **Vozes e Silenciamentos em Mariana: crime ou desastre ambiental?** 2 ed. Campinas: BCCL:Unicamp, 2018.

CAMELO, M. S. M. **Fechamento de Mina: análise de casos selecionados sob os focos ambiental, econômico e social**. 2006. Dissertação (Dissertação em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

CARDIA, R. J. R.; ROCHA, H. L.; LARA, P.G. **Contribuição ao Conhecimento sobre o Plano de Emergência – PAE**. 1 ed., Foz do Iguaçu: CBDB, 2015. 13p.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. **HOLOS**. Rio Grande do Norte, vol.8, n.1, p.77-85, 2016.

CARNEIRO, G. S. G. **Estudo das causas, impactos e medidas corretivas do rompimento de uma barragem de rejeitos, usando o caso da barragem de Mariana – MG**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 4 ed. São Paulo: Signus Editora, 1996.

CORRÊA, V. P. F., BRASIL, L. M. (2021). **Rejeitos: Vidas Marcadas pela Lama**. 1. Ed. Brasil: Editora Appris, 2021.

DUARTE, A. P. **Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco**. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

ECCO, R. D. A. **Barragens de rejeito: aspectos construtivos e características gerais**. 2022. Monografia (Faculdade de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeitos Construídas por Aterro Hidráulico**. 2000. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal.

FAJARDO, A. A. **Levantamento das características e formas de reaproveitamento de resíduos de minério de ferro na construção civil**. 2020. Monografia (Engenharia de Materiais e Construção). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

FERNANDES, R.B. **Panorama geotécnico das rupturas de barragens e gestão de risco**. 1 ed., Rio de Janeiro, 2020.

FERRARA, M. **Vade Mecum de barragens**. 1 ed. São Paulo: Lumen Juris Editora, 2020.

FERREIRA, J. A. **Avaliação dos planos de segurança de barragens e sua efetividade em relação à prevenção de acidentes**. 2022. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

FREITAS, C. H. G., DORNELA, F. J., SILVA, M. C., JÚNIOR, V. M. V., & MEDEIROS, C. R. O. (2019). **Representações discursivas da Veja e Carta Capital sobre o rompimento da barragem da Samarco: crime e desastre**. *Revista Ciências Administrativas*, 25(2).

GIGIOTTI, J. C. J., DE FARIA, F. L. F., & Júnior, F. J. G. (2022). **Descaracterização de barragens de contenção de rejeitos de mineração: marcos regulatórios, técnico-normativos e procedimentos**. *Cadernos UniFOA*.

GUIDICINI, G. & SANDRONI S.S. **Barragens de Terra e Enrocamento**. 1 ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2022. 168p.

GUIMARÃES, C. J. D. P. **Aspectos da drenagem de barragens de rejeito com alteamento a montante: caso da barragem I, da mina de córrego do feijão, em Brumadinho-MG**. 2021. Monografia (Pós-Graduação em Defesa e Segurança Civil) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.



ICOLD. International Commission of Large Dams. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences.** Paris: UNEP/ICOLD, 2001. Bulletin 121.

KOSSOFF, D. et al. **Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation.** *Applied Geochemistry*, v.5, n.1, p.229-245, 2014.

KOURTIS, I. M., & TSIHRINTZIS, V. A. (2021). **Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review.** In *Science of the Total Environment* (Vol. 771). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145431>.

LEITE, S.R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com associação de métodos de análise de decisão multicritério e Conjuntos Fuzzy.** 2019. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Universidade de Brasília, Brasília.

LIMA JÚNIOR, R. B. & PAIVA, C. F. E. **Aspectos geotécnicos fundamentais na avaliação da estabilidade de barragens de rejeitos: estudo de caso da barragem de fundão em Mariana, MG.** In: 16 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2018.

LUTHRA, S., MANGLA, S. K., SARKIS, J., & TSENG, M. L. (2022). **Resources melioration and the circular economy: Sustainability potentials for mineral, mining and extraction sector in emerging economies.** *Resources Policy*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102652>

LUZ, A. B. D., & LINS, F. A. F. (2018). Introdução ao tratamento de minérios. CETEM/MCTIC.

MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e de Petróleo) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MCLEOD, H. **Risk Management Analyses.** In: Proceedings Canadian Dam Safety Conference, 1999.

NEVES, L. P. **Segurança de Barragens.** Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada, 2018. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves>. Acessado em 18 abr 2019.

OLIVEIRA, J.B.V.R. **Manual de Operação de Barragens de Contenção de Rejeitos como Requisito Essencial ao Gerenciamento dos Rejeitos e a Segurança de Barragens.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

PEREIRA, F. G., FIRME, P. H. C.; COTTA, J. P. V. (2021). **Plano de Ação de Emergência de barragens de mineração: evolução, conceito e discussões.** *Territorium*, (28 (I)), 53-6.

PIERRE, G. **Desenvolvendo um manual de operação, manutenção e supervisão para instalações de gestão de rejeitos e água.** Ied. São Paulo: Ibram, 2021.

PINTO, A.C.C. **Contribuições para o Estudo de Descomissionamento de Barragens.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia básica para Engenharia Civil.** 3 ed. Brasil: Editora Blucher, 2018.

RAMOS, G. M. P. D., Guerra, M. B. B. F., Santos, R. A. S., Miranda, L., Corrêa, C., & Coelho, H. F. (2020). **Estudo dos requisitos necessários para a segurança em uma barragem de rejeitos.** *Revista Tecer*, 13(24).

ROSOLEM, J.B., GREGATTI, A.C.M., CARVALHO G. M, MELEGARI, L. F P. **Avaliação do Desempenho de Sensores de Fibra Óptica Multiparâmetros nas Barragens das UHES Barra Grande e Foz do Chapecó,** XXXI – Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte – MG, 2017.

SILVA, L. P. **Hidrologia – Engenharia e meio ambiente.** I.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 330 p.

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento.** I ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 416p.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos.** In: Tratamento de minérios. 5 ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 884p.

THOMÉ, R., & PASSINI, M. L. (2018). **Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais.** Ciências Sociais Aplicadas em Revista, 18(34), 49-65.

TRONCOSO, J. H. **Geotechnics of tailings dams and sediments.** In: International Congress of Environmental Geotechnics, 18., Lisboa.1997.

USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Rejeitos de mineração e Barragens de Rejeito.** Geotecnia e Recuperação Ambiental. PEF 3409. São Paulo, 2018. p.106-107.

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.

WANG, C.; HARBOTTLE, D.; LIU, Q.; XU, Z. **Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice.** Mineral Engineering. Alberta, Canada, v.58, p.113 -131, 2014.

WONG, M. H. (2022). **Integrated sustainable waste management in densely populated cities: The case of Hong Kong.** Sustainable Horizons, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2022.100014>