

ANÁLISE DO ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS

Douglas Souza Lima – dslima.pes@gmail.com

Gabriela Lambiazzi - lambiazzigabriela@gmail.com

Gabriela Cidade dos Santos - gabi_cidade@hotmail.com

Mariana Cristina Mendes de Godoy - marianacm_godoy@hotmail.com

Sergio Vicente D Pamboukian (Orientador) – sergio.pamboukian@mackenzie.br

RESUMO

Entre os anos de 2001 e 2019 foram registrados dez casos de rompimento de barragens no Brasil, sendo quatro deles ocorridos no estado de Minas Gerais (MADEIRO, 2019). Os acidentes mais recentes ocorreram nas cidades de Brumadinho e Mariana, tendo ocasionado inúmeras perdas materiais e de vidas humanas, além de um enorme impacto ambiental destruindo todo um ecossistema e poluindo cursos d'água de extrema importância não só para a região afetada, como também para todo o país. O mais alarmante é que existem muitas outras estruturas de armazenamento nas mesmas situações ou piores, tendo maiores armazenamentos de minério, sendo mais próximas de cidades e com alto risco estrutural, e em busca de uma solução para que sejam previstos os impactos e não haja mais perdas. No presente estudo são apresentadas formas de prever o caminho que a lama percorreria e também as possíveis consequências em caso de rompimento, tendo como auxílio o geoprocessamento e novas tecnologias como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), técnicas de processamento de imagens e impressão 3D. Primeiramente foi estudada a barragem já rompida Mina Córrego do Feijão, onde foi possível visualizar o caminho feito pela lama através de imagens de satélite e comprová-lo simulando um escoamento em um modelo 3D. Em seguida foram analisadas as barragens Casa de Pedra e Mina do Engenho, a fim de analisar os possíveis impactos econômicos, sociais e ambientais em caso de rompimento.

Palavra-chave: Rompimento de barragens. Barragens de rejeitos. Geoprocessamento.

ABSTRACT

Between the years of 2001 and 2019 there were ten cases of ruptured dams in Brazil, being four of them in the state of Minas Gerais (MADEIRO, 2019). The more recent accidents occurred in the city of Brumadinho and Mariana, causing countless material damage and the loss of many lives, also having a huge effect on the wildlife, destroying an ecosystem and polluting the extremely important waterways not only from the region, but also from the whole country. The most alarming is that there are many other structures in the same conditions or worse, having a larger ore storage, being closer

to cities and with a high structural risk, and in search for a solution so that these may be prevented from happening and that there are no losses. In the present, there are studies being presented in ways to prevent the ways that the mud would take and also possible consequences in case of a rupture, having as aid the geoprocessing and new Technologies such as the geographic information system (SIG), imaging process techniques and 3D impression. It was firstly studied the already ruptured dam of Mina Corrego do Feijão, where it was possible to visualize the path taken by the mud through satellite images and prove by simulating the flow in a 3D model, afterwards they analyzed the dams Casa de Pedra and Mina do Engenho, with ends to analyze the possible economics, social and environmental impacts in case of a rupture.

Keywords: Dam breaking. Tailings dams. Geoprocessing.

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas em cursos de água que têm como objetivo reter e controlar o fluxo, sendo utilizadas para diversas finalidades. Embora não haja registros da primeira estrutura construída no mundo, acredita-se que foi elaborada com o intuito de armazenar água evitando a escassez nos períodos de seca.

No Brasil, a primeira barragem foi construída por volta do século 16 e está localizada em Recife, Pernambuco. Em 1880, após o Nordeste passar por um período rígido de seca, Dom Pedro II decidiu solucionar esse problema construindo barragens de armazenamento de água, pois essa solução já vinha sendo adotada em outros países que partilhavam do mesmo problema (SOUZA, 2018).

Dentre as diversas utilidades das barragens, a que mais vem se destacando no cenário nacional, embora de forma negativa, são as barragens de rejeitos. Com o aumento da demanda mundial por bens minerais, estas foram criadas de forma a armazenar os resíduos de volumes significativos provenientes da mineração, que, apesar de serem materiais que não possuem grande valor econômico, devem ser devidamente estocados a fim de evitar maiores danos ambientais.

No ano de 2017 foram registradas no Brasil, por 31 órgãos competentes, 24.092 barragens para diferentes usos, sendo para acúmulo de rejeitos, água ou até mesmo para a geração de energia. Conforme o último relatório da Agência Nacional de Águas (ANA) (BRASIL, 2017) houve um aumento de quase 2.000 barragens em relação ao ano anterior. Neste relatório foram classificadas por agentes fiscalizadores 3.545 barragens como Categoria de Risco (CRI) e outras 5.459 como Dano Potencial Associado (DPA) e, cerca de 3% das barragens cadastradas, o equivalente a 723, foram classificadas simultaneamente como CRI e DPA. O dado mais alarmante é que de 790 são de rejeitos de mineração e que aproximadamente 204 dessas estruturas se encontram com alto potencial de dano.

Ainda, o Brasil tem sete barragens consideradas de alto risco e dano potencial, onde quatro estão em Minas Gerais e as outras em Santa Catarina e o Mato Grosso (ADORNO, 2019).

Segundo a British Broadcasting Corporation (2019) ainda há cerca de 300 barragens de mineração que não foram devidamente classificadas, levando em conta o risco de rompimento e ao potencial de dano que as mesmas poderiam ocasionar ao meio ambiente e sociedade. Partindo desde preceito, para que sejam devidamente fiscalizadas as barragens precisam seguir a critérios pré-estabelecidos para resíduos perigosos e danos de médio a alto, como ter a capacidade maior de 3 milhões de metros cúbicos e ter a partir de 15 metros de altura. Para exemplo de dimensão destes critérios, a barragem Mina Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho (MG) que se rompeu no ano de 2019, tinha 86 metros de altura e armazenava cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério.

Este tipo de barragem contendo rejeitos virou o principal foco após os acidentes ocorridos envolvendo barragens de rejeitos em Brumadinho e Mariana, cidades situadas em Minas Gerais, e que deram um alerta de o quão desastrosos podem ser os acidentes relacionados às mesmas, provocando catástrofes ambientais e sociais.

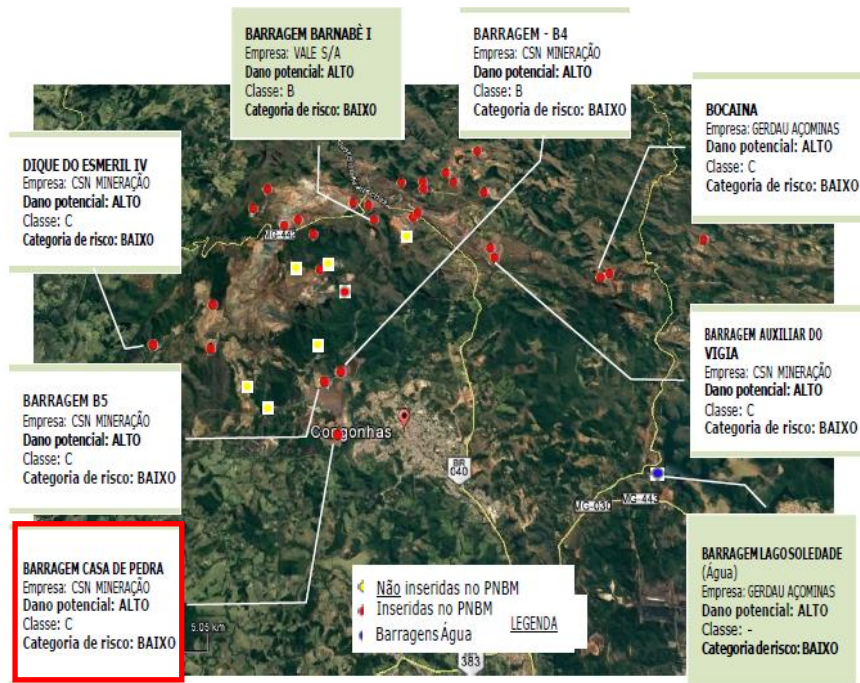
Os municípios que abrigam as barragens escolhidas neste estudo pertencem ao estado de Minas Gerais e, apesar de serem cidades de pequeno porte, abrigam um grande patrimônio histórico e cursos d'água de extrema importância. A cidade de Congonhas (Figura 1), que abriga a barragem Casa de Pedra, em destaque, contém vinte e três barragens de rejeitos de mineração e mais uma de acumulação de água, totalizando 158,5 milhões de m³ (Figura 2), conforme o Plano Municipal de Segurança de Barragens (Congonhas – MG, 2019).

O objetivo geral deste estudo é analisar o rompimento de barragens de rejeitos por meio de imagens orbitais e softwares de geoprocessamento e consequentemente avaliar os danos que seriam causados.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

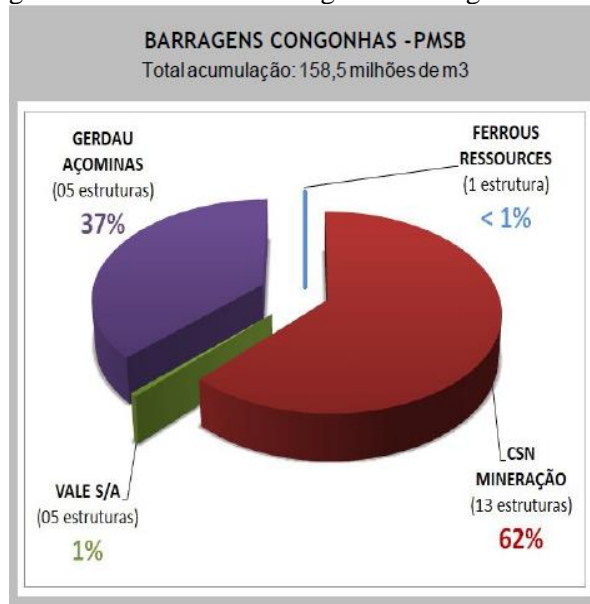
- a) analisar os tipos de barragens;
- b) analisar o rompimento das barragens de Brumadinho e Mariana;
- c) mapear três barragens em situação de risco. Foram escolhidas as barragens Mina Córrego do Feijão em Brumadinho, Casa da Pedra em Congonhas e Mina de Engenho em Rio Acima, todas pertencentes ao estado de Minas Gerais;
- d) analisar a trajetória da lama em um possível rompimento e avaliar os danos causados às áreas atingidas.

Figura 1 – Localização das barragens da cidade de Congonhas – MG



Fonte: Congonhas – MG (2019).

Figura 2 – Volume das barragens de Congonhas – MG



Fonte: Congonhas - MG (2019).

Para atingir os objetivos, o Sistema de Informações Geográficas QGIS foi utilizado para gerar mapas das regiões estudadas a fim de analisar as áreas atingidas em caso de rompimento. Utilizando uma impressora 3D, foi criado um modelo físico do relevo das regiões estudadas para simular a área de inundação de um possível rompimento, permitindo a comparação com dados reais ou, na falta destes, indicando as prováveis áreas atingidas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi a base para a realização deste trabalho, onde foram analisados estudos científicos, notícias e cursos direcionados à análise de rompimento e métodos construtivos de barragens de rejeito, ou informações que de alguma forma pudesse acrescentar conteúdo à pesquisa.

2.1 BARRAGENS DE REJEITOS

Barragem de rejeito é uma estrutura de terra construída em solo compactado para armazenar rejeitos provenientes de alguns processos industriais, principalmente os da mineração. Os chamados rejeitos são os resíduos sólidos resultantes dos processos de beneficiamento na atividade de mineração. Nesse processo utiliza-se água para separar o minério de ferro do material que não tem valor comercial, essa sobra é denominada de rejeito.

Estas barragens normalmente são construídas e depois ampliadas conforme a necessidade e a produção de rejeitos, pois se o volume produzido for muito alto, há necessidade de aumentar a capacidade do reservatório por alteamento, processo de aumento da altura da barragem e consequentemente do nível de água do reservatório, que pode ser feito de três maneiras: à montante, à jusante e por linha de centro.

A forma de alteamento mais comum, mais barata e mais utilizada no Brasil é do tipo à montante (Figura 3), onde o eixo da barragem é deslocado para a montante havendo o aproveitamento dos rejeitos previamente armazenados como parte da estrutura da construção, a continuação da barragem é feita e apoiada sobre o rejeito já consolidado no alteamento realizado anteriormente e que está acumulado com água a montante da barragem, por esse motivo são mais instáveis (Congonhas – MG, 2019).

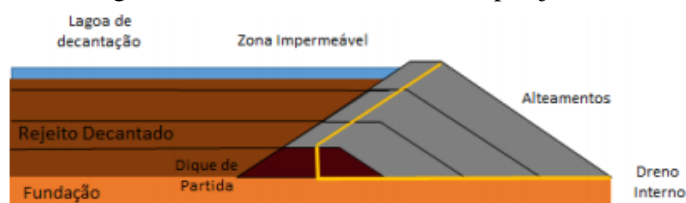


Fonte: Congonhas – MG (2019).

No método à jusante (Figura 4) o eixo da barragem é deslocado para a jusante tendo os alteamentos posteriores apoiados nos próprios aterros das etapas anteriores. É um método mais caro, devido ao maior volume de aterro, porém mais seguro e estável.

O método de linha de centro (Figura 5) que se trata de um método intermediário relacionado aos dois mencionados anteriormente.

Figura 4 – Método de Alçamento por jusante



Fonte: Congonhas – MG (2019).

Figura 5 – Método de Alçamento por linha de centro



Fonte: Congonhas – MG (2019).

Embora o método linha de centro apresente algumas vantagens, não se exclui a possibilidade da ocorrência de acidentes, haja visto que no Brasil esse tipo de acontecimento se tornou recorrente nos últimos anos com o crescente número de desastres envolvendo barragens de rejeito, gerando maior enfoque tanto por parte dos órgãos públicos quanto da população de forma geral.

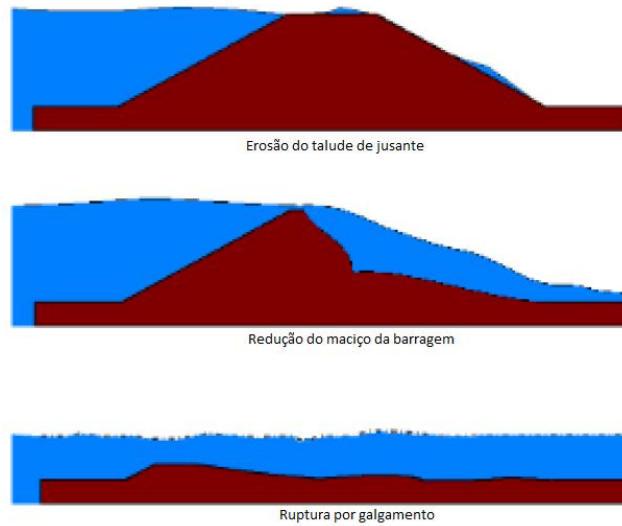
2.2 CAUSAS DE RUPTURA

Existem diversos problemas que podem causar a ruptura de uma barragem. Geralmente elas estão associadas às causas naturais ou são provocadas devido a ações antrópicas. Sendo também possível que esses dois fatores ocorram de maneira simultânea.

O tipo de barragem é um dos fatores mais determinantes para causa da ruptura. As barragens de concreto são mais susceptíveis a problemas estruturais ou de fundação, e barragens de terra, a erosão interna e galgamento.

Uma das possíveis causas de rompimento de barragens de terra chama-se galgamento (Figura 6) e ocorre quando o vertedouro não possui capacidade suficiente, fazendo com que a água verta sobre a crista da barragem, assim, inicia-se uma erosão no talude de jusante podendo resultar na formação de uma brecha de ruptura de forma regressiva ocasionando a ruptura global do barramento. Isso pode ocorrer devido à má operação do reservatório e do vertedouro durante uma cheia de projeto, ou em ocasiões de cheias extraordinárias para as quais o vertedouro não tenha capacidade hidráulica, já que o vertedouro é dimensionado para uma cheia de projeto (PEREIRA, 2009).

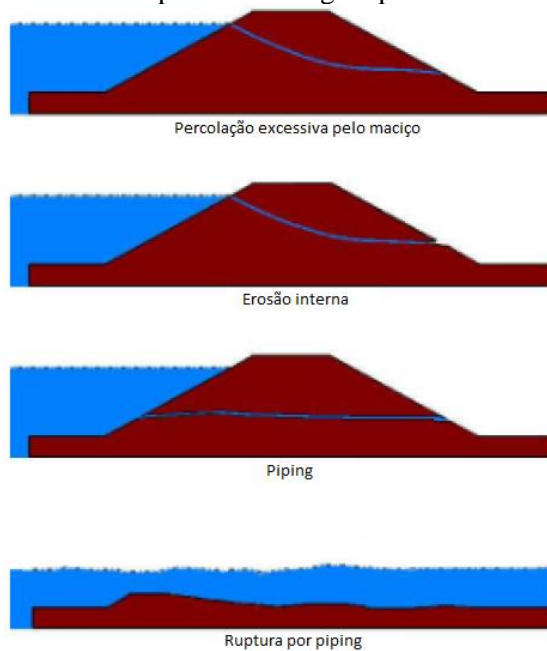
Figura 6 – Processo de ruptura de barragem por galgamento.



Fonte: PEREIRA (2009).

A infiltração, conhecida também como “*piping*” (erosão regressiva) (Figura 7), também pode levar a estrutura ao colapso, e ocorre pelo mal dimensionamento dos filtros, fazendo com que o solo se rompa na parte interna da barragem ocasionando a percolação de água seguida de uma grande ação erosiva no maciço, e a passagem de água com partículas por um solo com erosão subterrânea, originando assim a formação de canais dentro da massa de solo. O aparecimento desses canais, por onde a água acaba circulando dentro da estrutura de contenção, danificam e comprometem toda a estrutura, favorecendo o seu rompimento (PEREIRA, 2009).

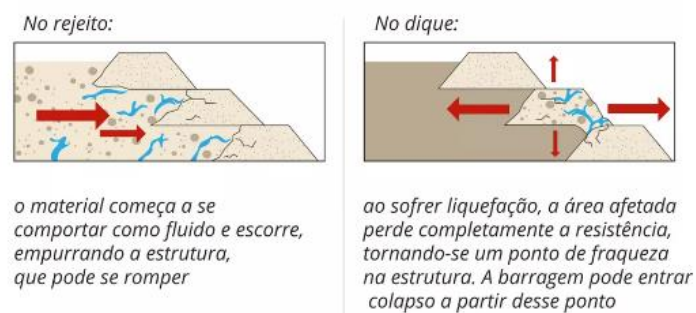
Figura 7 – Processo de ruptura de barragem por erosão interna (piping).



Fonte: PEREIRA (2009).

Já o processo de liquefação (Figura 8) faz com que um material rígido se comporte como fluido ocorrendo tanto no rejeito quanto na barragem. No primeiro caso o rejeito torna-se mais líquido e começa a escorrer empurrando a estrutura do reservatório podendo vir a causar o rompimento. Já no segundo caso, a liquefação ocorre no dique da barragem fazendo com que uma área do barramento perca totalmente a sustentação e se torne um ponto de fraqueza na estrutura, deixando-a vulnerável para o colapso. A liquefação acontece quando um sedimento sólido passa a se comportar como se fosse um líquido devido a um aumento de pressão no solo, causando deslizamentos de terra semelhantes a uma avalanche (Globo Comunicação e Participações S.A, 2019a).

Figura 8: Processo de liquefação em barragens de rejeito.



Fonte: Globo Comunicação e Participações S.A (2019a).

Outro fator que pode influenciar no rompimento de uma barragem é a questão da falha humana. Cabe ao empreendedor da barragem prover todos os recursos necessários à garantia de sua segurança e, por se tratar de um projeto de alto risco deve-se manter o serviço especializado em segurança de barragem conforme o Plano de Segurança da Barragem estabelece a fim de evitar possíveis desastres ao seu empreendimento. Dentre as possíveis causas humanas que acarretam ruptura de barragens destacam-se as falhas tanto no projeto, operação inadequada no reservatório e monitoramento inadequado das estruturas (PEREIRA, 2009).

2.3 ACIDENTES ENVOLVENDO BARRAGENS

As maiores ocorrências de acidentes em barragens de rejeitos têm como principais causas a liquefação e o *piping*, causando mortes, impactos ambientais de grandes proporções e prejuízos para as mineradoras.

A barragem rompida em 2015 na cidade de Mariana, em Minas Gerais, denominada como Barragem de Fundão, foi a estrutura que causou o maior desastre ambiental do Brasil relacionada à mineração. A estrutura pertencente à mineradora Samarco, controlada pela Vale e pela BHP Billiton, tinha em torno de 56,6 milhões de m³ de lama proveniente dos rejeitos de minério, de onde 43,7 milhões de m³ vazaram atingindo os afluentes e o próprio Rio Doce, dizimando o pequeno vilarejo chamado de Bento Rodrigues e deixando destroços por todas as regiões próximas, como também,

privando milhares de munícipes a água potável e trabalho (Globo Comunicação e Participações S.A, 2019b).

Os danos ambientais causados pelo rompimento da barragem de Fundão ainda são sentidos, não só pela cidade de Mariana, como o estado de Minas Gerais e estados vizinhos. A lama, que era constituída por óxido de ferro e água, após secar parcialmente libera substâncias e forma uma espécie de cimento, deixa o solo infértil. Estudos feitos pela Ambios Engenharia e Processos (2019) realizados após quatro anos decorridos do desastre, coletaram a poeira impregnadas nas casas e no solo de Mariana e Barra Longa (município também afetado) e na análise foram encontrados metais pesados, como cádmio, níquel, zinco e cobre e além dos limites de concedidos pela legislação brasileira, portanto risco iminente a saúde da população residente.

O rompimento da barragem de Brumadinho em janeiro de 2019 foi um desastre que chocou e chamou atenção do mundo inteiro. Os danos causados não foram apenas ambientais, mas também de infraestrutura, culturais, econômicos e familiares (como as centenas de crianças que ficaram órfãs). Imediatamente após o rompimento, Fabio Schvartsman, o presidente da empresa Vale S. A., responsável pela barragem, fez uma declaração dizendo que “o dano ambiental será muito menor que o de Mariana, mas a tragédia humana deverá ser maior” (FREITAS, 2019).

Os rejeitos de mineração de ferro na região do quadrilátero ferrífero apresentam alto potencial de contaminação dos meios físico e biótico, do curto ao longo prazo, devido ao seu conteúdo de minério fino e presença de metais pesados. Ao atingir as partes baixas do relevo, o escoamento de rejeitos contaminou os recursos hídricos locais, bem como o rio Paraopeba. A drenagem dos rejeitos dizimou a ictiofauna e outros animais aquáticos, provavelmente por asfixia via aumento exacerbado da carga de sedimentos (LOPES, 2016).

Embora a Vale tenha declarado na época que a barragem possuía todos os certificados de estabilidade e seguranças nacionais e internacionais, e que a barragem estava dentro do limite de risco, os laudos de 2017 e 2018 indicam que a empresa sabia do risco de rompimento da barragem Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho. A mineradora tem um documento interno do ano de 2017, e naquela época já constava a chance de colapso da barragem, que já era duas vezes maior que o nível máximo de risco individual tolerável. Outro documento, do ano de 2018 indica que a barragem estava em uma zona de atenção, por estar situada e uma área próxima à um núcleo urbano (LOPES, 2016).

Tanto a Barragem em Brumadinho, quanto a barragem em Mariana, foram feitas com alteamento a montante, que é o método de alteamento de menor custo e também o mais instável. Após os acidentes este método construtivo foi proibido.

Tendo como exemplo os acidentes acima citados, vale ressaltar a preocupação que se deve ter com o município de Congonhas, também localizado no estado de Minas Gerais. Debaxo de 50 milhões de m³ de rejeitos, além da população, a cidade guarda um precioso patrimônio histórico. É

em Congonhas que fica a Basílica do Senhor Bom Jesus de Matosinhos, onde estão os 12 profetas esculpidos em pedra-sabão por Aleijadinho. Há ainda seis capelas em que o escultor representou, em imagens de tamanho natural, os Passos da Paixão de Cristo, além de um santuário construído entre 1757 e 1790 e declarado patrimônio cultural pela Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura (UNESCO). As obras de arte convivem com um dos maiores complexos de exploração de minério de ferro em área urbana no mundo, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) (Folha de São Paulo, 2019).

Na cidade histórica de Congonhas (a 77 km de Belo Horizonte), diferentemente de Brumadinho, a barragem fica em área urbana. A maior estrutura com rejeitos, conhecida como Casa de Pedra, está apenas 250 metros da cidade de 54 mil habitantes. A cidade fica num nível de 70 metros abaixo da estrutura (Folha de São Paulo, 2019).

A cidade abriga 24 barragens de quatro empresas, a maior delas, a Barragem Casa de Pedra, da CSN, localizada próxima à área urbana, tem 21 milhões de metros cúbicos, atualmente – há quem conteste a informação, dizendo que o total chega a 50 milhões. São 107,5 milhões de metros cúbicos de rejeito de mineração e água acondicionados nas represas da cidade (Correio Brasiliense, 2019).

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos alguns conceitos básicos como geoprocessamento, imagens da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), bem como os softwares utilizados neste trabalho.

Para realizar este estudo foi primordial o uso de ferramentas de geoprocessamento como o software QGIS, um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O geoprocessamento permite a análise de dados espaciais georreferenciados (ou seja, com coordenadas conhecidas), através de recursos matemáticos e computacionais. Esta ferramenta é essencial para a análise ambiental e consequentemente a avaliação dos impactos causados pelo rompimento de barragens.

No SIG, a coleta de dados pode ser feita através de cartografia digital, Aerofotogrametria, Topografia Clássica, Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*), Sensoriamento Remoto por Satélites etc. Para realização deste trabalho foram obtidas Cartas Topográficas, pertencentes ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), das regiões onde se encontram as barragens selecionadas para estudo. Além disso, foram utilizadas imagens SRTM das mesmas regiões para criar mapas temáticos utilizando o software QGIS produzindo assim amostragens gráficas dos planos terrestres selecionados.

3.1 SRTM

A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma missão coordenada pelas instituições *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), com o propósito de produzir um banco de dados digital para todo o planeta, sendo fundamental para a formação de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de terras continentais. Os dados, distribuídos em formato raster pelo EROS Data Center, foram colhidos por um radar no período de 11 dias, de 11 a 22 de fevereiro de 2000, a bordo da nave espacial Endeavour, que executou 16 órbitas diárias na Terra, tendo o equivalente a 176 órbitas no decorrer de toda a missão (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019).

O emprego destes dados foi essencial para esta pesquisa, pois com o uso dela foi possível identificar o perfil do terreno e dar dimensões em 3D à região de interesse.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As imagens SRTM das regiões das três barragens escolhidas para o estudo foram coletadas no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e processadas utilizando o software QGIS, para a geração de mapas temáticos e modelos 3D do terreno. Tais imagens utilizam o sistema de referência de coordenadas WGS84 e posteriormente precisaram ser transformadas em SIRGAS2000 com projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) para geração de curvas de nível.

Para a barragem Mina Córrego do Feijão em Brumadinho, foi utilizada uma imagem de satélite georreferenciada captada após o rompimento, onde se pode observar o caminho da lama. Essa imagem foi utilizada para se traçar a área de inundação. Em seguida, foi feito um recorte na imagem SRTM da área de interesse por onde a lama se espalhou. Após isso foi executada a reamostragem da imagem a fim de melhorar sua qualidade gráfica diminuindo a dimensão dos pixels da imagem obtendo assim melhor visualização para impressão 3D.

Para delimitação da área de estudo no entorno da barragem Casa de Pedra em Congonhas, foi utilizado como referência um mapa de inundação elaborado pelo Sistema Municipal do Meio Ambiente de Congonhas – MG (2019), onde é apresentado o possível caminho da lama caso haja um rompimento da estrutura. Posteriormente foi realizado o mesmo processo feito na barragem Mina Córrego do Feijão em Brumadinho para geração do modelo 3D.

A área de estudo da barragem Mina de Engenho pode ser delimitada através de uma análise da topografia do terreno e do volume de rejeitos da barragem, bem como através de um experimento prático utilizando o modelo 3D como será descrito mais adiante neste estudo. Desta forma seria possível visualizar o caminho da lama em caso de rompimento da barragem e verificar o impacto que causaria no meio ambiente e nas edificações presentes no entorno.

3.3 MODELO 3D

Os mapas em 3D, como dito anteriormente, foram criados no QGIS e o modelo físico de Brumadinho foi impresso na impressora 3D pertencente ao Laboratório de Geotecnologias da Universidade Presbiteriana Mackenzie (LABGEO) (Figura 9).

Figura 9 – Impressão 3D da Mina Córrego do Feijão - Brumadinho (natural e com pintura)



Fonte: O autor.

A impressão tem por objetivo analisar a topografia da região e realizar um teste prático que permita estimar a área atingida pelo rompimento. Para isso foi criado um líquido viscoso com densidade similar ao da lama para que se pudesse observar se o escoamento no modelo físico impresso corresponde à realidade. O líquido foi inserido no modelo 3D com o auxílio de uma seringa descartável e o caminho percorrido por ele pôde ser observado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção mostra a análise realizada nas três regiões escolhidas a fim de se conhecer o impacto de um rompimento em cada região.

4.1 ESTUDO DE CASO 1 – MINA CÓRREGO DO FEIJÃO - BRUMADINHO

Para confirmar a veracidade do estudo de escoamento da lama através do modelo 3D criado, primeiramente foram analisadas imagens de satélite da área da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho (MG) do dia 18/01/2019, pré-rompimento (Figura 10 à esquerda), e do dia 29/01/2019, pós-rompimento (Figura 10 à direita).

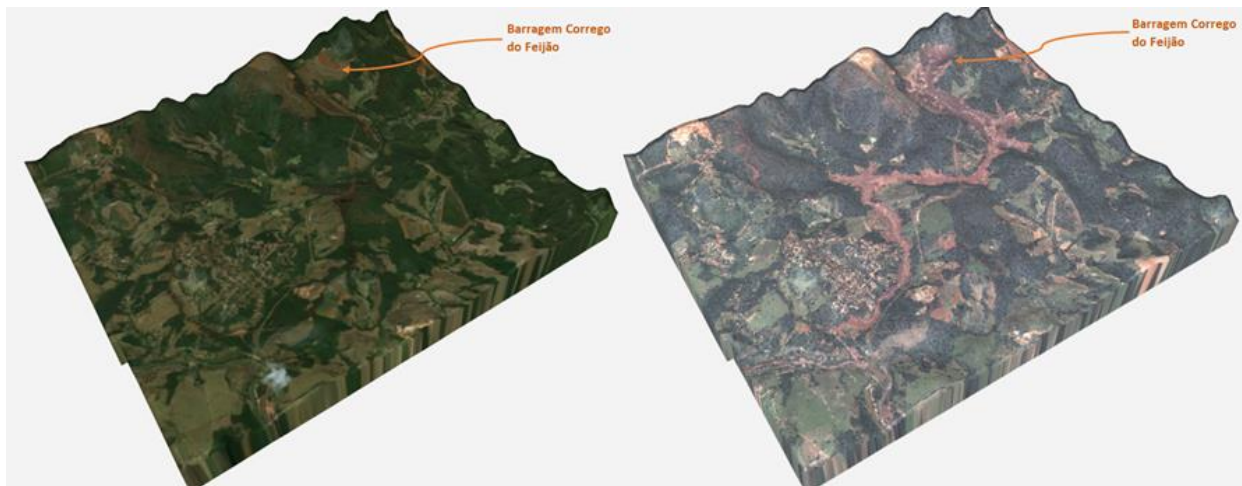
Figura 10 - Imagens dos dias 18/01/2019 (pré-rompimento) e 29/01/2019 (pós-rompimento)



Fonte: adaptado de Engesat (2019).

A partir da comparação entre as imagens de pré e pós-rompimento foi possível visualizar a área que foi inundada nos entornos da barragem e assim delimitar a região a ser utilizada para criação do modelo 3D (Figura 11).

Figura 11 – Relevo da região da Barragem Mina Córrego do Feijão em 3D gerado no QGIS

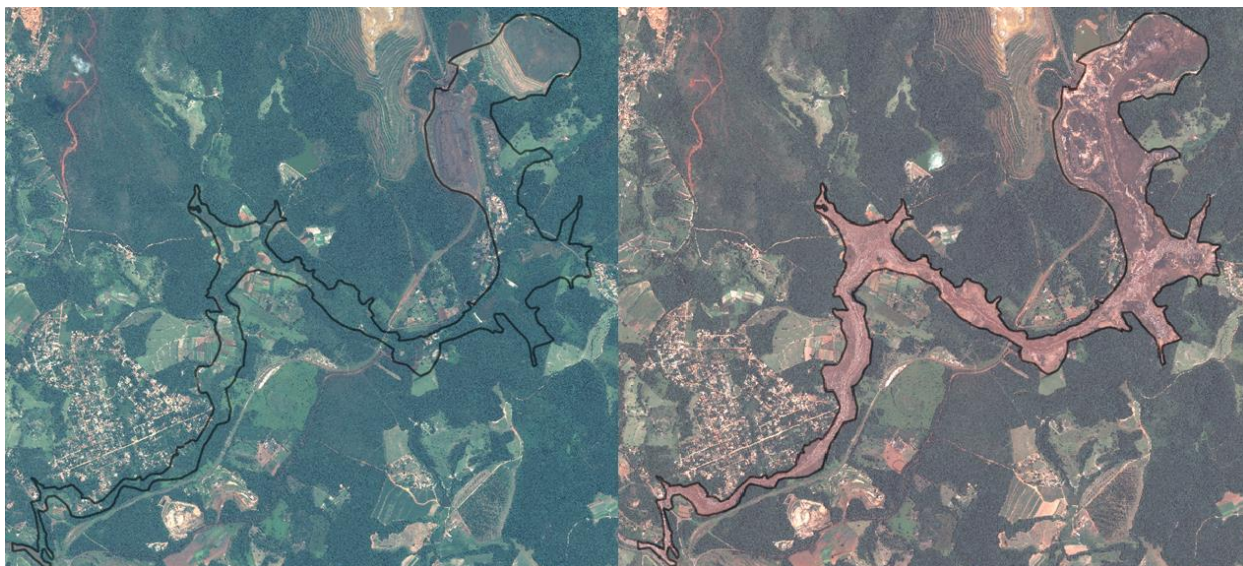


Fonte: O autor, adaptado de Pamboukian et al. (2019).

Com o auxílio do QGIS foi utilizada uma ferramenta de criação de polígonos para delimitação da área atingida pela lama através da imagem de satélite da região após rompimento (Figura 12 à direita) e essa mesma área foi sobreposta à imagem de antes do rompimento (Figura 12 à esquerda) para que se possa ver o que existia na região inundada.

A partir do modelo 3D gerado no QGIS foi possível a impressão de uma amostra física do relevo da região e foi utilizado um líquido viscoso com uma densidade similar ao da lama de rejeitos. Sendo assim, o líquido foi despejado no modelo 3D justamente onde estava localizada a barragem Mina Córrego do Feijão, com isso foi possível visualizar o caminho percorrido pela lama após o rompimento da barragem (Figura 13).

Figura 12 – Mapa de inundação da Barragem Mina Córrego do Feijão pré e pós-rompimento



Fonte: O autor, adaptado de Pamboukian et al. (2019).

Figura 13 - Simulação do caminho percorrido pela lama



Fonte: O autor.

Com os resultados obtidos a partir da comparação da delimitação gerada na imagem pré-rompimento comparada à imagem pós-rompimento e ao resultado obtido com a simulação, foi possível comprovar a eficiência do estudo e a possibilidade da utilização do método para estudo de outras barragens que ainda não romperam (Figura 14).

Figura 14- Comparação área de inundação real com a obtida no modelo 3D.

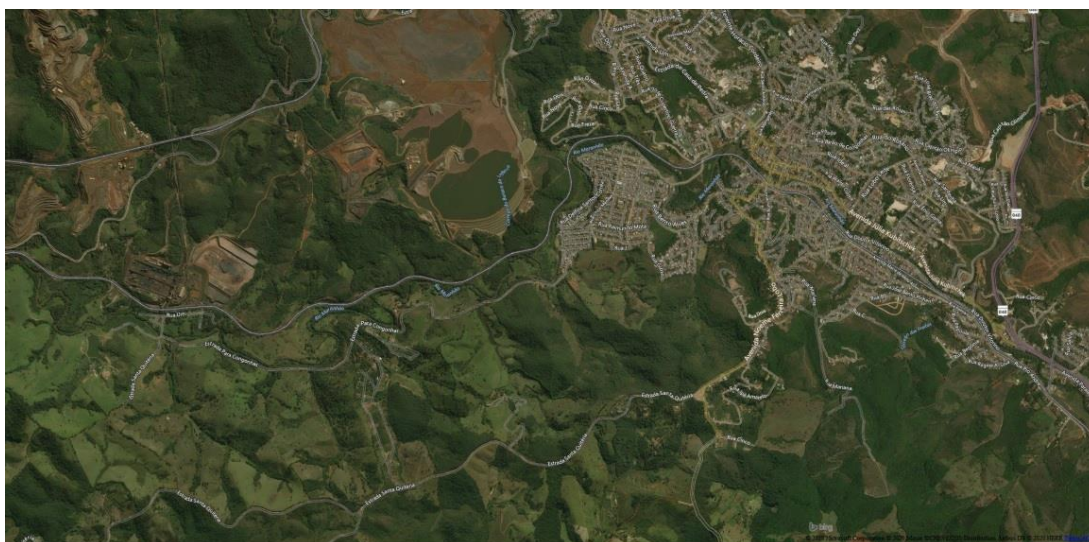


Fonte: O autor, adaptado de Pamboukian et al. (2019).

4.2 ESTUDO DE CASO 2 – CASA DA PEDRA - CONGONHAS

A barragem Casa da Pedra em Congonhas/MG, apesar de ter sido construída pelo método a jusante, tem o agravante da grande proximidade da área habitada da cidade. Dessa forma, com o intuito de analisar os danos que a passagem da lama causaria, foi utilizado o software QGIS juntamente com os mapas de inundação feitos no Plano Municipal de Segurança de Barragens PMSB (CONGONHAS – MG, 2019) para realizar uma comparação de antes do rompimento (Figura 15) e após o rompimento (Figura 16).

Figura 15 – Antes do Rompimento



Fonte: O autor, a partir de imagens do Google Earth.

Figura 16 – Passagem da lama após o rompimento



Fonte: O autor, a partir de imagens do Google Earth.

Como pode-se observar nas Figuras 15 e 16, o rompimento destruiria uma parte da área urbanizada, como também, um significativo trecho de mata.

Para ser comprovada a veracidade deste mapa de inundação criado no QGIS, foi impresso 3D a partir da Figura 17 e recriando a lama (Imagem 1) (como feito no Estudo de Caso 1), assim fazendo-a escoar pelo modelo. Porém, este trabalho foi interrompido devido à COVID-19 e deixa-se tal feito como sugestão para trabalhos futuros.

Figura 17 – Relevo da região da Barragem Casa da Pedra em 3D gerado no QGIS



Fonte: O autor, a partir de imagens do Google Earth.

4.3 ESTUDO DE CASO 3 - MINA DE ENGENHO - RIO ACIMA

Para criação do modelo 3D da barragem Mina do Engenho foi selecionada uma área onde se pudesse observar as construções civis mais próximas (Figura 18), localizadas na cidade Rio Acima, além de apresentar os valores naturais da região que seriam impactados em caso de rompimento da barragem como a ampla vegetação e o Rio das Velhas.

Assim como mencionado no estudo de caso 2, devido às limitações decorrentes da pandemia do COVID-19 não foi possível criar o modelo físico 3D em laboratório e consequentemente realizar a simulação de escoamento da lama na região, sendo apresentados no presente trabalho como sugestão para trabalhos futuros.

Contudo é difícil afirmar, sem um estudo mais profundo, se em caso de rompimento da barragem a lama atingiria a cidade Rio Acima e o Rio das Velhas e consequentemente a necessidade de planos de emergência na região.

Figura 18 – Relevo da região da Barragem Mina de Engenho em 3D gerado no QGIS



Fonte: O autor, a partir de imagens do Google Earth.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem três métodos diferentes para a construção das barragens de rejeito, porém no Brasil a maior parte delas foi construída pelo método a montante, pois apesar de ser o método mais instável e perigoso, é o mais econômico. As barragens de Mariana e de Brumadinho, que haviam sido

construídas por esse método, romperam e causaram enormes danos ambientais, econômicos e sócio econômicos citados anteriormente neste estudo.

Embora essas barragens tivessem toda a aparelhagem e tecnologia de fiscalização de estabilidade, assim como a maior parte das barragens no território brasileiro, os métodos utilizados para tal monitoramento não foram eficazes, mostrando que um estudo mais aprofundado de emergências potenciais em uma barragem devem ser identificadas e avaliadas, levando-se em consideração as consequências da ruptura, de modo que ações apropriadas, corretivas ou preventivas, possam ser tomadas de forma eficiente.

Através do uso do Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), aliados à utilização de softwares como o QGIS, é possível criar modelos 3D para estimar os impactos que seriam causados em caso de rompimento de barragens prevendo a área de inundação e a região afetada pelo material armazenado, principalmente em situações como a dos casos 2 e 3, sendo o primeiro uma barragem que se encontra localizada em uma região de importância histórica e o segundo apresenta uma barragem com risco de rompimento. Com a tecnologia hoje existente, é possível alertar a população que seria afetada em caso de instabilidades nas barragens para que haja uma evacuação do local, evitando que vidas sejam perdidas, além de prever os danos que seriam causados na área afetada.

Com base nos estudos efetuados foi evidenciado que mudanças na legislação, aliadas a uma fiscalização mais efetiva, são necessárias, principalmente quanto ao uso do método a montante. Inclusive, durante a realização desse estudo foi aprovado o projeto de lei número 550 de 2019, onde foi definido de forma mais clara os responsáveis pela fiscalização tanto nos aspectos preventivos, quanto nas medidas de atuação em casos de emergência, de maneira a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre bem como minimizar as suas consequências. Também foi decretada a obrigação de contratar seguro ou apresentar uma garantia financeira em caso de danos a terceiros e ao meio ambiente, e em casos onde for comprovado que as ações dos indivíduos contribuíram para o desastre haverá sanção penal (BRASIL, 2019).

Com o deferimento também ficou estabelecido a obrigatoriedade do monitoramento em tempo real da estabilidade da barragem através de instrumentos, bem como o acionamento automático das sirenes de alarme em caso de acidentes, que avisarão os órgãos responsáveis, evitando assim que ocorra novamente um desastre como o de Brumadinho, onde a população não foi avisada e evacuada da área atingida pela lama. Todos os relatórios recolhidos com esse monitoramento devem ser armazenados, e fornecidos ao órgão fiscalizador quando requerido (BRASIL, 2019).

O intuito dessas mudanças é de aumentar consideravelmente o patamar de segurança das barragens, para que desastres como o de Mariana e Brumadinho não voltem a acontecer ou que ao menos seus danos sejam minimizados.

6 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se a criação de modelos 3D e posterior simulação de escoamento utilizando um líquido com características similares à lama de rejeitos para os casos 2 e 3 apresentados na presente pesquisa, processo esse que, como já mencionado anteriormente, foi impossibilitado de ocorrer devido às consequências da pandemia do COVID-19.

Além disso, há também softwares que podem simular o trajeto da lama no caso de um rompimento de uma barragem, como por exemplo, o HEC-RAS (*Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System*), software criado pelo exército americano.

Após a geração de mapas altimétricos obtidos a partir de imagens SRTM, eles podem ser salvos no formato *.tif*, para dessa forma serem carregados no software HEC-RAS tornando possível a simulação de rompimento de barragens e determinação do trajeto percorrido pela lama de rejeitos.

As imagens comumente usadas no HEC-RAS têm a necessidade de tratamento e de serem georreferenciadas, e para que o software execute os testes com perfeição, deve ser escolhidos parâmetros como a vazão, as características do fluido, a distância a ser vencida e as cotas do terreno. O HEC-RAS é um software que simula rompimento de barragens que contém água e não lama, com isto será indispensável encontrar uma viscosidade ou algoritmos que possam reproduzir a simulação a mais próxima da realidade. Como proposta, modificar o *Manning*.

REFERÊNCIAS

ADORNO, Luís. UNIVERSO ONLINE (UOL). **Brasil tem 204 barragens de rejeitos de minério com alto potencial de danos**. 2019. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/01/30/204-barragens-de-minerio-tem-potencial-de-dano-alto-no-brasil.htm>. Acesso em: 18 mar. 2020.

AMBIOS ENGENHARIA E PROCESSOS LTDA. **Estudo de Avaliação de Risco à Saúde Humana em Localidades Atingidas pelo Rompimento da Barragem do Fundão – MG**. São Paulo, 2019. 369 p. Disponível em: <https://apublica.org/wp-content/uploads/2019/11/ambios-arsh-mariana-e-barra-linga-final-20190417.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2020.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens 2017**. 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias/45-barragens-preocupam-orgaos-fiscalizadores-aponta-relatorio-de-seguranca-de-barragens-elaborado-pela-ana/rsb-2017.pdf/view>. Acesso em: 24 set. 2019.

BRASIL. Projeto de Lei n 550, apresentada em 20 de março de 2019. **Altera Leis de segurança de barragens**. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2194912>. Acesso em: 5 de julho de 2020.

BRITISH BROADCASTING CORPORATION (Brasil). BBC News. **Brumadinho: Brasil tem mais de 300 barragens de mineração que ainda não foram fiscalizadas e 200 com alto potencial de estrago.** 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47056259>. Acesso em: 24 set. 2019.

CONGONHAS – MG. Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Conselho Municipal do Meio Ambiente. **Plano Municipal de Segurança de Barragens PMSB.** Congonhas, 2019. Disponível em: <http://www.congonhas.mg.gov.br/wp-content/uploads/2019/04/RELAT%C3%93RIO-FINAL-Plano-Municipal-de-Seguran%C3%A7a-de-Barragens-PMSB-convertido-1.docx>. Acesso em: 18 out. 2019.

Correio Brasiliense, 2019. **Veja como ficaria Congonhas (MG) em caso de rompimento das barragens locais.** Disponível em: <https://www.correiobrasiliense.com.br/app/noticia/brasil/2019/02/11/interna-brasil,736670/veja-como-ficaria-congonhas-mg-em-caso-de-rompimento-das-barragens-l.shtml>. Acesso em: 27 mar. 2020.

ENGESAT. **Sobre Brumadinho – MG, dia 25/01/19.** Disponível em: <http://www.engesat.com.br/sobre-brumadinho-mg-dia-25-01-19/>. Acesso em: 31/01/19.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *SRTM – Shuttle Radar Topography Mission.* Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_srtm.html. Acesso em: 27 ago. 2019.

Folha de São Paulo, 2019. **Tensão cresce em Congonhas (MG), cidade com área urbana colada a barragem.** Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2019/01/tensao-cresce-em-congonhas-mg-cidade-com-area-urbana-colada-a-barragem.shtml>. Acesso em: 18 mar. 2020

FREITAS, Carlos Machado. **Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: Desastres em barragens de mineração e saúde coletiva.** 2019. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/csp/2019.v35n5/e00052519/#>. Acesso em: 20 maio 2019.

Globo Comunicação e Participações S.A (Minas Gerais). G1 MINAS. **Barragem da Vale se rompe em Brumadinho, MG: Mar de lama avançou sobre área administrativa da empresa e casas na área rural da cidade.** 2019a. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/bombeiros-e-defesa-civil-sao-mobilizados-para-chamada-de-rompimento-de-barragem-em-brumadinho-na-grande-bh.ghtml>. Acesso em: 25 jan. 2019.

Globo Comunicação e Participações S.A (Minas Gerais). G1 MINAS. **Há 3 anos, rompimento de barragem de Mariana causou maior desastre ambiental do país e matou 19 pessoas.** 2019b. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/ha-3-anos-rompimento-de-barragem-de-mariana-causou-maior-desastre-ambiental-do-pais-e-matou-19-pessoas.ghtml>. Acesso em: 25 mar. 2020.

LOPES, L. M. N. **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais.** 2016. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla/article/view/11377>. Sinapse Múltipla, v. 5, n. 1, p. 1- 15. Acesso em: 07 nov. 2019

MADEIRO, Carlos; UNIVERSO ONLINE (UOL). **Brasil registrou 65 mortes em 9 incidentes com barragens entre 2001 e 2018.** 2019. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/02/03/brasil-registrou-65-mortes-em-9-incidentes-com-barragens-entre-2001-e-2018.htm>. Acesso em: 20 out. 2019.

PAMBOUKIAN, S.V.D. et al. Rompimento de barragens de rejeitos. Projeto Integrador desenvolvido na Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2019.

PEREIRA, Frank Marcos da Silva. **Gestão de riscos e plano de ações emergenciais aplicado à barragem de contenção de rejeitos Casa De Pedra/CSN.** 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/110654055-Dissertacao-de-mestrado.html>. Acesso em: 20 jul. 2019.

SOUZA, Fernando Basquioto de. **Quando construíram as barragens no mundo? Como criar um histograma no R.** 2018. Disponível em: <https://2engenheiros.com/2018/01/30/barragens-histograma-no-r/>. Acesso em: 10 out. 2019.