

GEOLOGIA APLICADA A BARRAGENS

Keroly Shaene¹, Vera Thuler¹;Ronaldo Barros Órfão^{2,3};Mayara dos Santos Amarante^{2,4}

RESUMO

Considerado por muitos especialistas como o maior desastre ambiental da história do Brasil, a “tragédia de Mariana” e a “tragédia de Brumadinho” que tiveram uma ampla cobertura jornalística, inclusive pela imprensa estrangeira. O presente trabalho tem por escopo revisitar as principais matérias, reportagens, entrevistas e laudos técnicos de órgãos públicos e privados que retrataram o tema, realizando uma análise crítica e pontual sobre o desastre ocasionado pelo rompimento da barragem de fundão e suas consequências socioambientais. A represa, que pertencia à mineradora Samarco S/A, estava localizada na cidade mineira de Mariana e sua ruptura, causada por circunstâncias ainda não esclarecidas, gerou um tsunami devastador de lama de rejeitos que dizimou o distrito de Bento Rodrigues, ceifou vidas humanas, contaminou rios e destruiu florestas inteiras. Em Brumadinho ocasionou quase a mesma coisa, mais o desastre foi bem maior, o rompimento da barragem do vale em Brumadinho, na região metropolitana de Belo Horizonte em Minas Gerais, causou uma grande avalanche de rejeitos de minério de ferro sendo a barragem 1 da Mina Córrego do Feijão desabou e a lama atingiu a área administrativa do vale e a comunidade da vila Ferteco, deixando um grande rastro de destruição e dezenas de mortos e desaparecidos em meio toda a tragédia. Ainda sobre os efeitos das duas tragédias estejam sendo dimensionados, sabe-se que os danos causados ao meio ambiente e as populações atingidas são indeterminados, imprevisíveis e incalculáveis. Foi decidido o estudo sobre as barragens por conta do acontecimento em Brumadinho e Mariana, o assunto abrange diversos desenvolvimentos e discussões em torno de novas soluções técnicas.

Palavras-Chave: rompimento de barragem; tragédia de Mariana; tragédia de Brumadinho; impactos socioambientais; direito ambiental.

ABSTRACT

Considered by many experts as the greatest environmental disaster in Brazilian history, the "tragedy of Mariana" and the "tragedy of Brumadinho" that had a wide coverage of journalism, including the foreign press. The present work has the purpose of revisiting the main subjects, reports, interviews and technical reports of public and private agencies that portrayed the subject, performing a critical and punctual analysis on the disaster caused by the rupture of the dam and its socio-environmental consequences. The dam, which belonged to the mining company Samarco S / A, was located in the mining city of Mariana and its rupture, caused by circumstances not yet clear, generated a devastating tsunami of tailings mud that decimated the district of Bento Rodrigues, reaped human lives, contaminated rivers and destroyed entire forests. In Brumadinho it caused almost the same thing, but the disaster was much greater, the rupture of the dam of the valley in Brumadinho, in the metropolitan area of Belo Horizonte in Minas Gerais, caused a great avalanche of iron ore tailings being the dam 1 of the Mine Córrego do Feijão collapsed and the mud struck the administrative area of the valley and the community of Ferteco village, leaving a great trail of destruction and dozens of dead and missing amidst all the tragedy. Still on the effects of the two tragedies are being dimensioned, it is known that the damages caused to the environment and the affected populations are indeterminate, unpredictable and incalculable. It was decided the study on the dams due to the event in Brumadinho and Mariana, the subject covers several developments and discussions around new technical solutions.

Keywords: dam disruption; tragedy of Mariana; tragedy of Brumadinho; social and environmental impacts; environmental law.

1 INTRODUÇÃO

Importante elemento, indispensável em uma sociedade, as barragens são construções fundamentais ao desenvolvimento da região onde é construída.

1 Bacharelandos do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Braz Cubas.

2 Professor Titular do Centro Universitário Braz Cubas, Brasil.

3 MESTRADO em Educação Matemática pela Universidade Bandeirante de São Paulo, Brasil (2012).

4 MESTRADO em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil (2014).

Uma grande barragem é um tipo de obra que mais influencia o meio ambiente, pois ela modifica o regime do rio, os níveis freáticos e as paisagens próximas, além de que as formações geológicas saturadas pelo represamento passam a ter comportamento diferente.

Na história da mineração Brasileira e Mundial, acidentes ocorrem com relativa frequência. Alguns sequer chegar a serem noticiados, passando despercebidos pela maioria da população. Todavia, a tragédia ocasionada pelo rompimento da barragem de Fundão foi particularmente dramática, haja vista suas consequências socioambientais de grande amplitude (FILHO, Carlos Leite Maciel. Introdução a Geologia de engenharia. 3 ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2008).

A represa encontra-se localizada no município de Mariana/MG e foi especificamente construída para servir de depósito dos resíduos gerados durante o processo de mineração de ferro. Pertence a empresa Samarco S/A, cujos acionistas majoritários são a Companhia Vale do Rio Doce e a anglo-australiana BHP Billinton.

No dia 05 de novembro de 2015, o dique de Fundão entrou em colapso e rompeu-se, causando um desastre ambiental sem precedentes na história do Brasil. Os efeitos imediatos dessa tragédia, ainda em desenvolvimento, puderam ser observados desde a jusante da barragem destruída, em Minas Gerais, até a foz do rio Doce, no mar do Espírito Santo. Seu legado: um rastro de destruição, contaminação e mortes.

A tragédia recém-acontecida localiza-se no município de Brumadinho/MG e foi construída no método de alteamento a montante, no qual se constroem degraus com o próprio material de rejeito, mais simples e também o menos seguro.

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem do feijão, da Vale, se rompeu, destruindo parte dos prédios da mineradora, casas, estradas e pontes. O Rio Paraopeba, um dos afluentes do rio São Francisco, foi contaminado pela lama. (News Brasil, BBC)

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo principal realizar uma abordagem crítica, científica e pontual sobre as prováveis causas do rompimento da barragem, sem olvidar os efeitos socioambientais e econômicos e apresentar a importância dos estudos geológicos e geotécnicos na construção de uma barragem, assim como a importância dela para a região, os tipos, os fatores condicionantes de projeto, em especial problemas em fundação, alguns dos principais problemas enfrentados no cotidiano e as soluções mais comuns nas barragens.

Esses levantamentos são importantes para auxiliar a compreensão da geologia e da geotecnia no trabalho de construção de uma barragem.

2 DESENVOLVIMENTO

Filho (2008) define uma barragem, como sendo um elemento estrutural, construindo transversalmente a vales e depressões com o objetivo de elevar o nível da água dos cursos naturais, ou para formar reservatórios destinados à acumulação de água. Este tipo de estrutura, seja ela concebida de materiais rochosos, terrosos ou de concreto, pode ser projetado com múltiplos propósitos, afim de que satisfaça as necessidades de projeto.

As finalidades que regem a construção de uma barragem são muitas, podendo ser explorado individualmente ou em conjuntos.

As principais são:

- Geração de energia elétrica nas chamadas usinas hidroelétricas;
- Abastecimento de água nos setores residenciais, indústrias e agrícolas;

■ Contenção de enchentes, destinadas a proteger os territórios a jusante da barragem;

Dessa forma, em relação a escolha do local para construção de uma barragem deve ser feita um planejamento geral em que interferem as condições geológicas e geotécnicas da região, além de fatores hidráulicos, hidrelétricos, políticos, econômico, social e ambiental. Além disso, a escolha do local de uma barragem esta diretamente ligada a concepção e aos objetivos do empreendimento. A escolha do eixo do barramento esta associada a aspectos operacionais e econômicos, pois se pretende possuir menor volume de aterro, melhor condição de fundação, menores distância de transportes das matérias de construção, evitando assim menores custos com a obra. A escolha do tipo de barragem esta associada a aspectos técnicos diversos, como as condições de acesso, condições de fundação, as condições topográficas, a disponibilidade de matérias de construção no local, dentre outros aspectos que interferem diretamente na escolha do tipo de barragem.

As barragens podem ser classificadas em diferentes tipos de acordo com o seu objetivo hidráulico e os tipos de material empregados na construção.

Tipos de barragens:

- Barragem de concreto;
- Barragem de enrocamento;
- Barragem de terra;
- Barragem de concreto de gravidade;
- Barragem de concreto em arco;
- Barragem de concreto em contrafortes;
- Barragem de terra homogênea;
- Barragem zonada;

Fatores e Condicionantes para Construção de uma Barragem

Antes de iniciar um projeto de barragem, o geólogo e o engenheiro devem ter conhecimento das condicionantes que possam exercer influencia na obra. Após essa análise, os profissionais devem escolher o método de implantação mais adequado para o local. Para essa escolha e necessário o conhecimento da caracterização das fundações, morfologia das bacias hidrográficas e hidráulicas, caracterização dos materiais naturais de construção de fatores geológicos, como cobertura do solo e aspectos tectônicos e impactos ao meio ambiente que podem ocorrer com a implantação da barragem. A caracterização das fundações e feita a partir do conhecimento sobre os tipos de solos da região.

Outros fatores condicionantes são: transição solo rocha, origem do solo, características geotécnicas, permeabilidade, barragem de concreto devem ser apoiadas em fundações de rocha, execução de ensaios e de laboratório para determinação da resistência mecânica para fundação e permeabilidade (ZINGANO,2005)

Esses fatores são relevantes para construção de barragens, já que para cada situação é estipulado um método de implantação da obra, onde a melhor relação custo x benefício deve ser aplicada. Os aspectos tectônicos estão relacionados aos fatores condicionantes na construção de uma barragem, no sentido de que os movimentos tectônicos possam afetar o maciço rochoso, exigindo assim, tratamentos tanto superficiais quanto subsuperficiais do maciço.

Os tratamentos superficiais são feitos por meios do levantamento e análise de dados através de estudos superficiais, que se iniciam ainda no escritório, dos fatores fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos, não só da barragem, mas de toda bacia hidrográfica. Esse estudo continua no escritório até a fase de foto interpretação geológica. Após essa fase, o estudo segue para o campo, onde inicia-se o processo de identificação superficial dos materiais naturais de construção.

A investigação subsuperficial que completa a fase inicial. Esta é elaborada por meio de diversos tipos de prospecção e de ensaios necessários, que servem para o conhecimento mais aprofundado das feições geotécnicas e geológicas do projeto que vai ser implantado.

A questão da análise dos impactos ambientais gerados é também um fator muito importante na construção de barragens. Dessa forma, é necessário fazer um levantamento das famílias que serão afetadas com a construção, a região que deve ser alagada, as espécies presentes no ecossistema, afim de que possa elaborar medidas que reduza esses impactos, para que os impactos causados não sejam maiores do que os benefícios gerados pela construção da barragem.

Para prever os impactos nos componentes físicos utilizam variadas metodologias, sendo uma das mais utilizadas os modelos físicos em escala reduzida, reproduzindo a área a ser implantada a obra com as características ambientais locais (ABES, 1987).

Problemas e tratamentos em fundações de uma barragem, é normal haver alguma deformação, tanto na fundação quanto nas ombreiras. A rocha normalmente oferece uma resistência satisfatória como fundação, porém o maciço rochoso apresenta alguns planos de fraqueza, ou seja, fraturas ou até mesmo falhas, que diminuem a resistência do mesmo, pois servem de canal de percolação da água. Segundo Filho (2008), se o material sobre o qual se assentará a barragem é rochoso.

Deve-se ficar atento para a permeabilidade das fundações, já que todo maciço, seja ele rochoso ou terroso, possui certa permeabilidade devido à presença de poros. Segundo Filho (2008), a presença e passagem de água pela fundação podem criar problemas relativos à pressão neutra e a erosão interna (*piping*). Dessa forma, na construção de uma barragem é fundamental que diminua essa permeabilidade a níveis aceitáveis para segurança da construção.

Os métodos utilizados para controlar a percolação de água e a pressão neutra são: tapetes impermeabilizantes; cortinas de impermeabilização seguidas de drenos a jusante em barragens de concreto; trincheiras de vedação; filtros em barragens de terra; diafragma plástico, dentre outros métodos. Para tratamento de maciços terrosos utilizam-se diafragma plástico ou trincheira de vedação.

3 DISCUSSÃO

Constata-se que obras de engenharia do tipo barragens devem ser melhores planejadas, tendo em vista que este tipo de empreendimento é de alto custo e alta complexidade, e caso ocorra problemas após o termino da obra, os investimentos para reparação são muito superiores aos que seriam se o projeto e a execução fossem mais bem elaborados e empregados, respectivamente. Para evitar problemas de obras de barragens, primeiramente o profissional técnico tem a obrigação de ser altamente qualificado, sendo que este deve estar amparado com estudos geotécnicos, estudos hidrológicos, topografia do local, estudos do subsolo, entre outras informações necessárias para um bom planejamento da obra.

Outro ponto a ser considerado é o método construtivo, pois dependendo da urgência e das intenções dos governantes - haja vista o impacto social que este tipo de intervenção causa na comunidade e na economia do estado – há uma intervenção e troca de responsabilidades e favores entre governantes e construtoras, ou seja, (em alguns casos) a obra não é construída com as devidas especificações técnicas, para garantir a qualidade e a usabilidade com eficiência da barragem, os resultados são visíveis.

No geral, os problemas de obras de barragens, tanto no Brasil como no mundo, não são só de engenharia, mas também são problemas administrativos, pois este tipo de construção requer controles técnicos constantes, como medição do nível e da pressão da água nos taludes, controle da permeabilidade, e os controles técnicos só são empregados quando há as condições financeiras para tal, todavia, o poder público nem sempre possibilita a manutenção de barragens ou qualquer outra obra de engenharia civil.

Com isso vem acontecendo várias tragédias como a de Mariana e Brumadinho, fora essas durante o artigo já foi se rompeu mais uma barragem em Rondônia e uma barragem na Bahia vem estado de alerta, fora muitas que estão irregulares pelo Brasil todo.

Quase três meses que aconteceu a tragédia em Brumadinho, cerca de 32 barragens da mineradora Vale, sediada em Minas Gerais estão com suas atividades interditadas. A suspensão das operações destas estruturas tem ocorrido tanto pela justiça, como também da Agência Nacional de Mineração (ANM), da secretaria de meio ambiente e desenvolvimento sustentável de Minas Gerais (Semad) ou da própria mineradora.

Dimensionamento de Barragem

A barragem tem que ter segurança e o bom desempenho em estruturas é uma tarefa de engenharia. Atingir esse objetivo, principalmente em obras grandes como barragens, não é simples. Um projeto de barragem envolve as mais diversas áreas da engenharia, estrutural, hidráulica, elétrica, geotécnica, hidrologia, entre outras, logo é impossível um homem só ser especializado em todas essas ciências e por isso o projeto é o resultado de um trabalho em equipe. “No Brasil existe um grande número de barragens construídas e em fase de projeto, e os critérios de projeto são permanentemente questionados e revisados em diversos fóruns” (Krüger, 2009). A quantidade de livros falando sobre o assunto no Brasil ainda é escassa, o que torna complicado o aprendizado na área.

A análise de estabilidade em estruturas de gravidade é um elemento fundamental em projetos de barragens. Constitui-se de uma rotina de cálculo básica, porém extensa pelas inúmeras verificações a serem feitas e principalmente pela quantidade de seções que necessitam ser analisadas ao longo do projeto de uma barragem. Sugere-se fazer a verificação de estabilidade em diversas seções da barragem, no vertedouro, no fim do vertedouro, nos muros de abraço onde ocorre uma mudança brusca de seção.

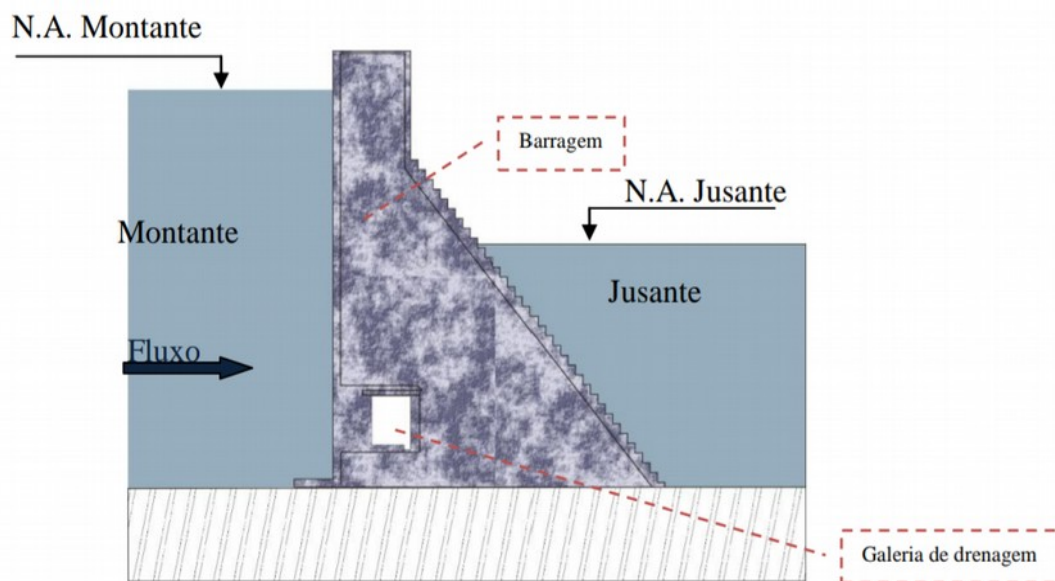


Figura 1 – seção convencional de uma barragem de concreto [1].

Conceito de esforço

“Uma barragem de concreto por gravidade é concebida de modo que seu próprio peso exerça a maior resistência sobre as forças externas que atuam sobre ela.” (Bureau of Reclamation, 1987). Atualmente as barragens de concreto vêm sendo feitas com concreto CCR (Concreto Compactado a Rolo).

Os principais esforços atuantes em uma barragem são os seguintes:

- O peso da barragem (esforço vertical)
- O peso resultante das águas, tanto a montante como a jusante do corpo de concreto da barragem (esforço horizontal, e vertical quando em contato com uma superfície inclinada)
- Sub-pressão proveniente da água
- Empuxo provocado pelo acúmulo de material decantado
- Esforços provenientes do atrito
- Esforços proveniente de terremotos.

Peso de barragem

Em uma barragem por gravidade este é o principal esforço resistente da barragem. Este varia diretamente com a área da seção da barragem e o peso específico do concreto. Segundo o livro Usinas Hidrelétricas (Schreiber, 1977) “O peso da barragem depende do peso específico do concreto, que pode ser aumentado usando-se agregado graúdo de cerca de 15 cm. A granulométrica do agregado deve ser fixada de modo que se obtenha um concreto o mais denso possível. A vibração do concreto fresco ajuda no adensamento e reduz a porosidade. Assim pode-se conseguir facilmente concreto com peso específico de $2,4 \text{ t/m}^3$ ”.

A resultante deste esforço é vertical e tem seu ponto de aplicação no centróide da seção de concreto. Ela atua no sentido da gravidade e é a favor da segurança.

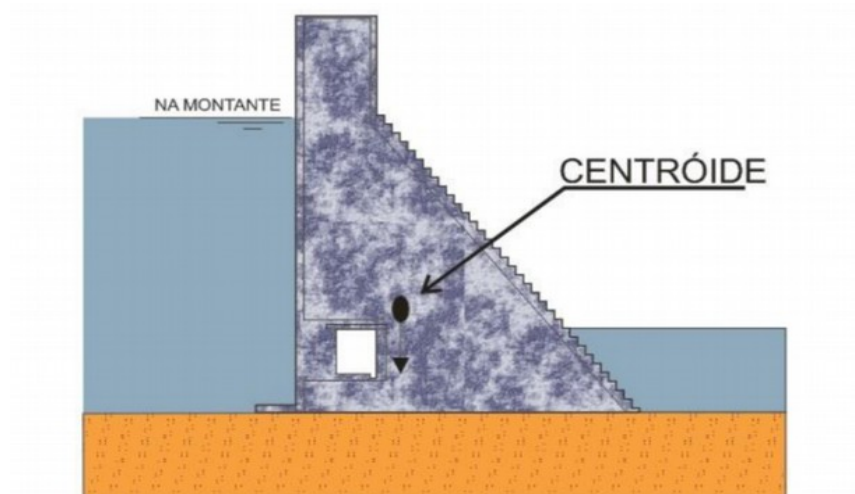


Figura 2 – esforço exercido pelo peso da barragem [1].

Cálculo do empuxo em repouso com a equação (1):

$$E_s = \frac{f_s \times h^2}{2} \times (1 - \text{sen } \varnothing) \quad (1)$$

Onde:

f_s = peso específico do material submerso, como dito anteriormente em falta de dados pode ser admitido 1300 kg/m^3 ;

h = altura da barragem;

\varnothing = ângulo de atrito interno, o qual se sugere adotar 30° .

Cálculo do peso da barragem com as equações (2, 3 e 4):

$$P = \gamma_c \times \text{Área} \quad (2)$$

$$X_a = \frac{\text{Largura}}{2} - X_g \quad (3)$$

$$X_b = \text{Largura} - X_g \quad (4)$$

O cálculo do peso da barragem é simples com essas fórmulas.

A força calculada deve ser aplicada no centróide da seção no sentido da gravidade. Neste trabalho usei um comprimento unitário, no valor de um metro, para o cálculo do volume conseqüentemente o peso.

Cálculo dos empuxos da montante e jusante de acordo com as equações (5 e 6):

Os esforços devidos aos empuxos d'água a jusante a montante

$$Fx = \frac{ha^2}{2} \times ya \quad (5)$$

$$Y = \frac{ha}{3} \quad (6)$$

Onde:

ha – Altura de água do carregamento normal ou extraordinário
ya – Peso específico da água

Cálculo devido a sub-pressão

Os esforços devido à sub-pressão foram utilizando as seguintes considerações: o esforço provocado pela sub-pressão na face de montante é igual à altura da água a montante e o esforço provocado a jusante é igual a altura da água a jusante, formando os seguintes diagramas sem drenagem e com drenagem respectivamente, conforme as equações (7, 8 e 9).

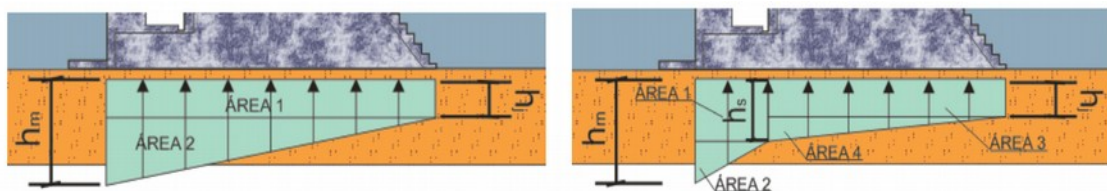


Figura 3 – diagrama de sub-pressão [1].

Onde:

hm – Altura de água a montante
hj – Altura de água a jusante
hs – Altura de água no local da drenagem

$$hs = hd + \frac{(NAM - hd)}{3} \quad (7)$$

Onde:

hd – Altura do dreno
NAM – Nível de Água a Montante

Cálculo de esforços provenientes de terremoto

Os esforços provenientes de terremotos geram um acréscimo ou redução no peso da barragem e uma oscilação horizontal, como um acréscimo no peso ou uma oscilação de jusante para montante iria a favor da segurança então calcula apenas a redução do peso e a oscilação de montante pra jusante. A redução do peso é calculada da seguinte forma.

$$F_t = 0,03 \times P \quad (8)$$

Onde:

F_t – Força vertical devida ao cismo

P – Peso da barragem

Sendo essa força aplicada no centróide da barragem no sentido contrário a gravidade e outro no sentido montante para jusante.

O esforço horizontal, que o livro usinas hidrelétricas sugere, é calculado a partir da fórmula abaixo. Essa força atua no centro de gravidade da barragem. Nesse caso, ao contrário do que acontece na oscilação vertical, devemos considerar apenas o acréscimo do peso para se tornar mais conservador.

$$F_h = 0,05 \times (P \pm 0,03 P) \quad (9)$$

Onde:

F_h – Força horizontal gerada pelo cismo

P – Peso da estrutura

REFERÊNCIAS

Disponível em: < https://juris40.jusbrasil.com.br/artigos/670832349/sos-barragens-do-brasil-verdadeiro-crime-ambiental?ref=topic_feed >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < http://www.abge.org.br/site/wp-content/uploads/2017/10/Artigo_AvaliacaodeRisco.pdf >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < <https://www.radarciencia.org/barragens/> >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < <https://oglobo.globo.com/opiniao/artigo-modelo-de-barragens-em-xeque-23409796> >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < <http://www.vale.com> >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < <https://brasilecola.uol.com.br/biologia/rompimento-barragem-brumadinho.htm> >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47002609> >. Acesso em: 10/05/2019.

Disponível em: < ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. Curso de Impacto Ambiental e Relatórios de Impacto Ambiental. Rio de Janeiro, 1987. 300p ≥.

Disponível em: < COSTA, Walter Duarte. Geologia de Barragens. São Paulo: Oficina de Textos, 2012 ≥.

Disponível em: < FILHO, Carlos Leite Maciel. Introdução a Geologia de engenharia. 3 ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2008 ≥.

Disponível em: < [1] KETZER, Bruno; SCHÄFFER, Almir. Roteiro de cálculo com auxílio de planilha eletrônica para análise de estabilidade em barragens de concreto por gravidade ≥.