

Received:
September 30, 2020

Accepted:
August 29, 2021

Published:
October 29, 2021

Contribution to the study of dam rupture

Adelson Mártir Silva¹ , Paloma dos Santos Gandra¹ , Thiago Bomjardim Porto¹ 

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Curvelo, Brasil.

Email address

silva.madelson@gmail.com (Adelson M. Silva)

gandrapaloma@gmail.com (Paloma S. Gandra) – Corresponding author

thiago.porto@cefetmg.br (Thiago B. Porto)

Abstract

This work aims to contribute to the study and analysis of the stability of dams in Brazil and in the world, in addition to studying the reasons for their failure, from a literary review, with important data and information. It is worth mentioning that once a dam breaks, it causes immeasurable impacts such as environmental, economic and social damage to the population, in addition to the loss of life. Here we will explain about liquefaction, overtopping and plumbing, explaining each of these phenomena and we will mention cases of ruptures with their respective causes, thus making a literary review of each case. The intention is to study the safety of dams in view of the great increase in cases of disruption, which have generated major accidents with thousands of victims worldwide, knowing that when these undertakings are taken seriously, we can drastically reduce their likelihood of disruption.

Keywords: Rupture, Dam, Safety of Dams, Impacts.

1. Introdução

De acordo com a Lei de nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que atualiza a Lei nº 12.334, a respeito de segurança de barragens no Brasil, pelo Art. 2º entende-se como barragem toda estrutura artificial que é construída dentro ou fora de um curso de água que tem como finalidade a contenção de líquidos ou mistura de líquidos e sólidos. É compreendido o barramento, bem como as estruturas integrantes (Brasil, 2020).

Existem indícios de existência de barragens desde os primórdios da humanidade. Uma das barragens mais antigas do mundo, construída há mais de 5.000 anos, é localizada no Egito, a Sadd Al-Kafara, e teve sua ruptura imediata. A causa da ruptura foi devido a galgamento da sua parte central, pelas águas das cheias, causando uma ruptura parcial, removendo partes importantes de sua estrutura. Isso evidencia que mesmo após milênios ainda temos tais problemas de maneira recorrente em nosso cotidiano (Neves, 2018).

Desta forma, existe uma diversidade de atividades econômicas que dependem e necessitam deste tipo de construção. Sendo assim, se torna

necessário que estas estruturas sejam seguras desde a concepção de seu projeto, até suas atividades sequenciais como a construção, o primeiro enchimento e vertimento, operação, monitoramento e possível descomissionamento, ou seja, deixar de ser barragem ou até com a sua possível ruptura. Considerando esses aspectos se faz necessário o acompanhamento de um profissional com especialidade na área, tendo em vista que os prejuízos advindos da negligência profissional, podendo acarretar prejuízos econômicos, ambientais e sociais, além de perda de vidas.

Para fins de segurança pública algumas barragens são reguladas pela Lei federal, nº 14.066 de 2020, já citada neste trabalho. Esta Lei ratifica a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), visando garantir a seguridade da barragem com condições para manter a integridade estrutural e operacional, com o foco de preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (Brasil, 2020).

Tal Lei se aplica a barragens que apresentem ao menos uma das seguintes características:

I - Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a

crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;

II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º da Lei;

V - Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º da Lei.

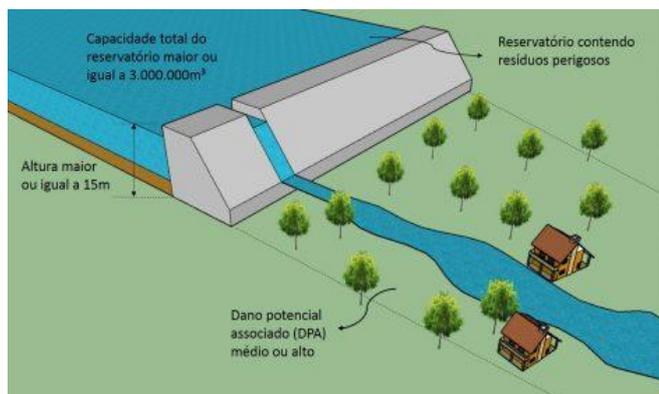


Figura 1 – Características de uma barragem para PNSB (INEA,2020).

As barragens podem ter finalidades específicas ou múltiplas, dentre essas pode-se construí-la para abastecimento de água, geração de energia, irrigação, controle de enchentes, depósitos de rejeitos de mineração e usos múltiplos. Sendo assim, são obras de engenharia que podem beneficiar a vida de muitas pessoas. Entretanto, pode também causar sérios problemas se não houver um controle de segurança desde a concepção de seu projeto.

Desta forma, se faz necessário estudos e análises criteriosas de barragens com retroanálises de casos para que os mesmos erros não se repitam.

2. Barragens

Barragens são obras hidráulicas que exigem o acompanhamento multidisciplinar em áreas da engenharia para que sejam planejadas e executadas de maneira segura e que atendam a todos os requisitos técnicos necessários. Sendo assim, para atingir este objetivo necessita-se de diversas áreas de conhecimento como hidrologia, hidráulica, mecânica dos solos, estatística, entre outras. Desta forma, se faz necessário o acompanhamento de

diversos profissionais trabalhando em equipe. (Romanini, 2020).

Existem etapas básicas para o planejamento de construções de um represamento, que se enquadram para todos os tipos de barragens que aqui serão apresentadas. Entretanto, dependendo de sua utilização e nível de complexidade podem ser acrescentadas etapas e verificações, tendo em vista as necessidades únicas e individuais de cada projeto. Segundo Romanini (2020), as etapas básicas são compreendidas em:

- Planejamento;
- Viabilidade técnico-econômica;
- Anteprojeto;
- Projeto básico;
- Projeto executivo.

Pode-se classificar as barragens em dois grandes grupos pelos materiais que serão construídos o empreendimento. Sendo elas: barragens de aterro e barragens de concreto. As barragens de aterro podem ser classificadas como barragens de terra, de enrocamento ou de rejeitos e as de concreto como barragem em arco, barragem em contrafortes, barragem de concreto de gravidade ou de gravidade aliviada (Romanini, 2020).

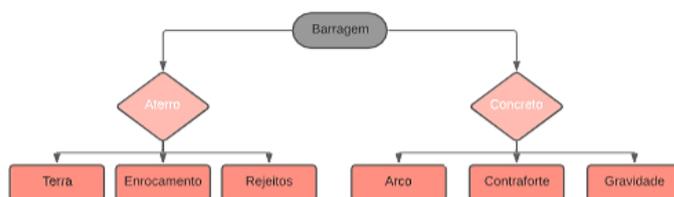


Figura 2 – Tipos barragens.

Entre todos os tipos de barragens citadas, no Brasil foram cadastradas até o ano de 2017 no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) 24.097 barragens, distribuídas em todo território brasileiro. A utilização dessas barragens em território nacional se dá primordialmente para uso de irrigação com 40,8% do total de barragens e 17,6% para fins de dessedentação animal devido a pecuária no país. Os dois juntos somam mais da metade das barragens do país. O restante será para fins de aquicultura, recreação, hidrelétrica, industrial, contenção de rejeitos de mineração, entre outras utilizações conforme apresentada na Figura (3) (Silva, Gurgel e Freitas, 2019).

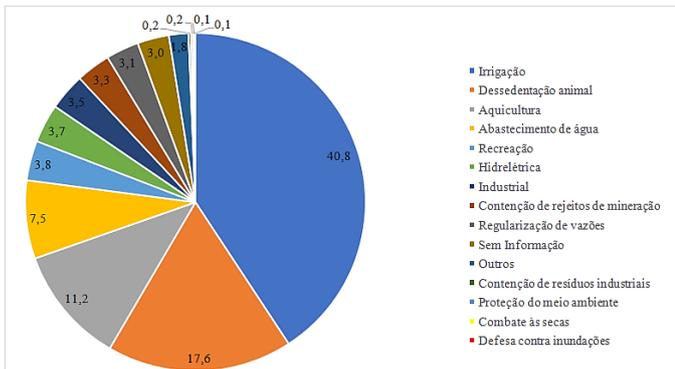


Figura 3 – Percentual do tipo de uso das barragens cadastradas no Brasil, 2017 (Silva, Gurgel e Freitas, 2019).

São três as principais componentes de um barramento para que em conjunto possam caracterizar a barragem. Sendo elas: uma estrutura construída transversalmente ao curso de água, as fundações e as ombreiras. É chamado de parâmetro de montante a parte do barramento em contato com o líquido e parâmetro de jusante o lado oposto, representados conforme Figura (4). Além disso, podem existir algumas estruturas para extravasamento de água por vertedouros de superfície para evacuação de cheias (ANA, 2019).

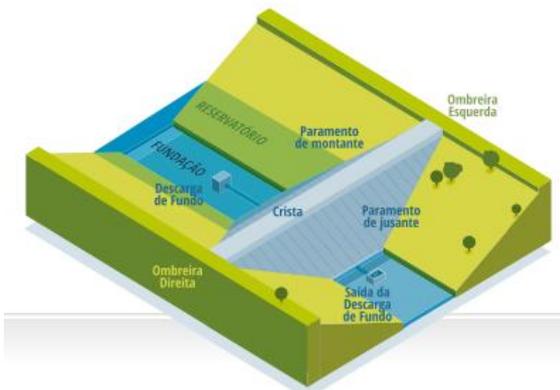


Figura 4 – Componentes de uma barragem (ANA, 2019).

2.1. Barragens de Concreto

Este tipo de barragem se caracteriza resumidamente pela sua forma. Existem três tipos de barragens de estrutura de concreto, e todas elas se beneficiam de seu peso, forma geométrica ou ambas para suportar as forças que são submetidas a elas, como representado na Figura (5). Barragens de gravidade são estruturas de concreto sólidas e que favorecem de seu próprio peso aproveitando sua forma geométrica para obter estabilidade. Outras barragens desse material utilizam de contrafortes como estrutura de apoio, exigindo assim uma espessura menor (Romanini, 2020).

É imprescindível que estas não apresentem formas angulosas ou muito côncavas. Sendo, sempre que possível, escolher por formas curvas, como as barragens em arco que dissipam melhor as forças, ficando o peso em preterido (Romanini, 2020).

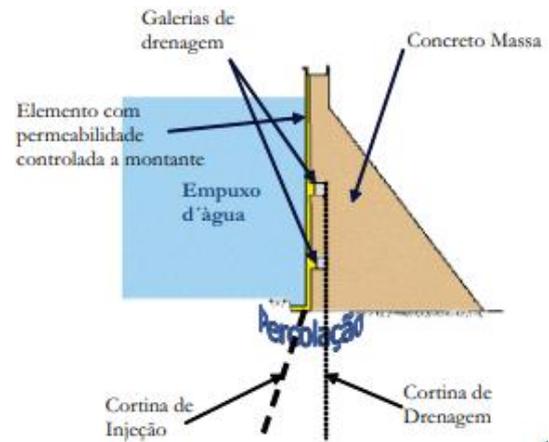


Figura 5 – Seção transversal típica barragem de concreto de gravidade (Vieira Júnior e Salles, 2011).

2.2. Barragens de aterro

Estas podem ser divididas basicamente em barragens de terra, enrocamento e rejeitos, feitas utilizando o material disponível no próprio local.

As barragens de terra podem ser divididas em duas faixas. Aquelas em que quase toda a sua estrutura de seção transversal é composta pelo mesmo material chamada de homogênea. É chamada de zoneada aquela que apresenta diferentes faixas de materiais com características distintas no corpo do aterro. Se tratando de resistência e permeabilidade, a seção transversal típica de uma barragem de terra é representada conforme Figura (7) (Romanini, 2020).

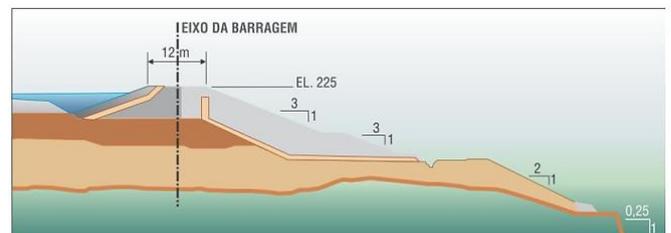


Figura 6 – Seção típica de uma barragem de terra (Patias et al., 2015).

Outro tipo de barragem de aterro são as barragens de enrocamento, que são formadas por um aglomerado de rochas compactas em camadas podendo ter núcleo argiloso ou asfáltico compactado. Um exemplo de uma seção transversal

típica de uma barragem de enrocamento é apresentada na Figura (7).

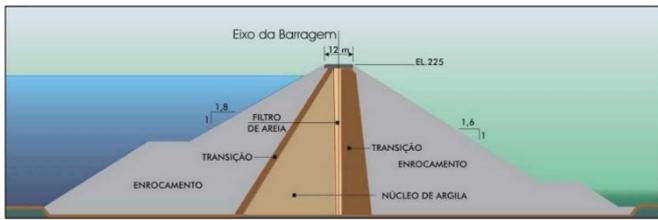


Figura 7 – Seção típica de uma barragem de enrocamento. (Patias et al., 2015).

Existem regimentos e normas para projetos destes empreendimentos. No Brasil a NBR 13028:2017 especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens de mineração, incluindo as barragens para disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos gerados por erosão e reservação de água em mineração. Esta norma visa atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

As barragens de contenção de rejeitos podem ser construídas de terra, enrocamento ou podem ser construídas com o próprio material proveniente da atividade minerária.

Logo após o início das atividades da barragem feita de rejeitos, o primeiro dique de partida é utilizado para o armazenamento dos rejeitos. Assim que a sua capacidade operacional é atingida, se faz necessário elevar o dique a fim de acumular mais material. Podemos chamar esse processo de alteamento e esse pode ocorrer de três maneiras diferentes. (ANA, 2019).

O método de alteamento a jusante ocorre conforme a Figura (8), onde são adicionados diques com alteamento de jusante do anterior. (ANA, 2019).



Figura 8 – Seção típica barragem de rejeitos no método de alteamento a jusante (ANA, 2019)

O método de alteamento a montante ocorre conforme a Figura (9), e se dá utilizando o próprio dique de rejeitos como a sua fundação, construindo

os novos diques a montante do inicial. Porém, este método está proibido desde fevereiro de 2019 pela Agência Nacional de Mineração (ANM) em todo Brasil, com ordem para desativação de todas as barragens que utilize este método.



Figura 9 – Seção típica barragem de rejeitos no método de alteamento a montante (ANA, 2019).

Por último, conforme representado na Figura (10) existe o método de alteamento de linha de cento que utiliza de crescimento de sua crista, criando mais diques tanto a jusante, quanto a montante (ANA, 2019).



Figura 10 – Seção típica barragem de rejeitos no método de alteamento de linha de centro (ANA, 2019).

A NBR 13028:2017 prevê que análises para a estabilidade física de alteamentos das barragens de mineração sejam feitas com valores mínimos de fator de segurança, explicitando a fase com o possível tipo de ruptura e o talude de ocorrência ligado a esses fatores mínimos de segurança.

3. Tipos de Rupturas de Barragens

Desde a antiguidade a humanidade tem a necessidade de buscar maneiras de armazenar água, a fim de satisfazer as necessidades da civilização. Dessa maneira, a construção de barragens foi a solução encontrada e usada nos últimos 5000 anos (Melo, 2012).

Na atualidade o uso de barragens é comum e é uma necessidade. Não é possível imaginar fazer abastecimento de água para a população, construir hidrelétricas, a fim de gerar energia elétrica, e até mesmo fazer atividades de mineração sem que seja necessário a construção de barragens.

Não existe apenas um método construtivo que é usado para a construção de barragens. Em suma, existem dois tipos de barragens: barragens de aterro e barragens de concreto. Ressalta-se que a decisão de qual método requer uma análise complexa de fatores. Dados como topografia, geologia do terreno, bem como aspectos econômicos e ambientais devem ser analisados antes da construção de uma barragem (Tonussi, 2017).

Entretanto, como qualquer obra, a construção de barragens possui alguns riscos. Alguns destes riscos são alguns fenômenos que podem ocasionar o colapso da estrutura, ou seja, os rompimentos destas barragens. Como cita da Silva e Ribeiro (2018), as prováveis rupturas estão associadas às causas naturais e ações humanas, podendo ocorrer de forma simultânea ou não. Como foi visto em fatos recentes, quando ocorre este tipo de evento o prejuízo é incalculável, seja ele financeiro, ambiental ou humano. Assim, este trabalho vai listar alguns dos principais fenômenos que ocasionam o rompimento de barragens.

Desta maneira, pretende-se dar início uma breve revisão explicando alguns fenômenos que provocam a ruptura de barragens, sendo elas o piping (erosão interna), galgamento e liquefação.

3.1. Piping (Erosão interna)

Quando o assunto é barragens de terras ou enrocamento, podem ocorrer falhas estruturais quando existem infiltrações através do corpo da mesma. Estas infiltrações provocam uma movimentação de massa, causando erosão e arraste de materiais. Esse arraste de materiais pode ocasionar uma ruptura de barragem (ENGECORPS, 2012).

O fenômeno conhecido como piping pode se dar conforme descrito na NBR 13028:2017: “A erosão interna pode ocorrer quando as forças de percolação forem elevadas o suficiente para mover as partículas de solo, gerando um processo de erosão regressiva (“piping”). A barragem deve ser projetada e dimensionada para que não haja erosão interna tanto no maciço quanto na fundação. Deve ser verificada com base nos materiais a serem empregados na construção da barragem, nos gradientes hidráulicos e na condição da fundação e das ombreiras” (ABNT, 2017, p.12).

As rupturas ocasionadas por *pipping* são originadas por uma erosão do solo, causada pela

percolação da água pela fundação ou corpo da barragem (Jónatas, 2013).

Essa erosão provoca a criação de um “tubo” de transporte, onde há a movimentação de solo compactado da barragem. Este tubo tende a aumentar o seu diâmetro proporcionalmente a percolação da água no solo compactado. Quanto maior o diâmetro do tubo criado maior é a quantidade de material que é transportado, ou seja, maior é a erosão existente. Desta maneira, com o aumento do tubo chega em um momento que a estrutura entra em colapso, formando apenas um canal (Jónatas, 2013).

Além disso, de acordo com Jonhson (1976) a forma final do canal é semelhante ao que é causado por galgamento, possuindo um formato trapezoidal. Na Figura (11), tem-se como é a evolução do canal até o rompimento. Já nas Figuras (12), (13) e (14) mostra as geometrias que o canal vai tomando de acordo com a evolução do fenômeno, até atingir a ruptura, possuindo a geometria trapezoidal, acima dito.

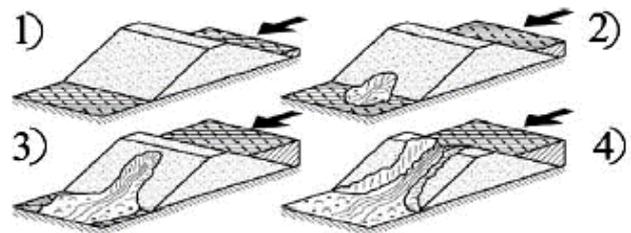


Figura 11 – Estágios fenômeno Piping até a ruptura - (Jónatas, 2013).

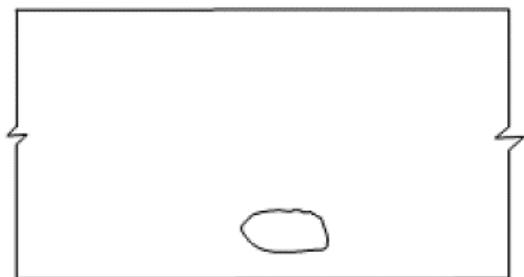


Figura 12 – Estágio inicial - Fenômeno Piping (Jónatas, 2013).

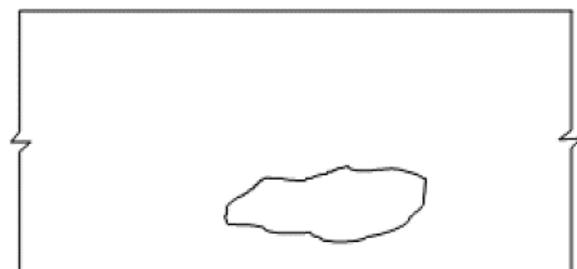


Figura 13 – Estágio intermediário - Fenômeno Piping (Jónatas, 2013).



Figura 14 – Estágio final (Ruptura) - Fenômeno Piping (Jónatas, 2013).

3.2. Galgamento

Em suma, o fenômeno de galgamento ocorre quando o nível da água supera a cota do coroamento da barragem. Ou seja, em termo mais simples, o galgamento acontece quando a barragem transborda. As principais causas são níveis de precipitação altos durante o período chuvoso, bem como em eventos sísmicos. (ENGEORPS, 2012)

O termo que define o galgamento em inglês é “overtopping”. Note que a tradução de “overtopping” é por cima, tornado o termo mais intuitivo do que em português. Outra forma de chamar esse fenômeno é de ruptura hidrológica. (ENGEORPS, 2012).

O rompimento devido ao galgamento em barragens de aterro pode ser atribuído a um evento raro ou uma avaliação incorreta do período da enchente, durante a concepção do projeto. O fenômeno de galgamento implica no corte em profundidade do coroamento de barragens de aterro, bem como a erosão do material da barragem do talude de jusante. Este corte em profundidade pode evoluir até a base do talude. Dessa maneira, a existência desse processo implica na formação de uma área mais frágil, onde o colapso da barragem pode romper (Jónatas, 2013).

É impossível determinar o local no qual vai situar a zona frágil em barragens de aterro. Como o galgamento ocorre normalmente no eixo central da barragem é comum prever a ruptura se inicie nesta parte. Entretanto, é fácil concluir que qualquer etapa de construção feita de forma ineficiente, principalmente a compactação, permite a criação de uma zona frágil, que pode ser o local da ruptura da barragem (Jónatas, 2013).

Em barragens de concreto, o galgamento não é capaz sozinho de provocar uma ruptura. Entretanto, as cargas adicionais que a barragem é submetida pode levar a barragem a colapso (ENGEORPS, 2012).

Segundo Jónatas (2013) a intensidade do corte causados pelo galgamento em barragens de aterro depende de uma série de fatores. Além dos já citados, como uma má compactação da barragem, a duração do galgamento, as características do material e do aterro serão fatores que irá determinar o tamanho do corte da barragem.

Segundo Johnson (1976), citado por Jónatas (2013) o corte possui no início um formato triangular, como é visto na Figura (15). Após o corte ser iniciado, caso o fenômeno de galgamento continue ocorrendo a erosão tornará o corte ainda maior, dando uma geometria em V, como é visto na Figura (16). Em situações mais avançadas o corte assume uma geometria trapezoidal, como é mostrado na Figura (17). Dessa maneira, pode-se afirmar que nas situações de rompimento de barragens a geometria existente durante o rompimento é no formato trapezoidal, independente da geometria inicial. Além disso, a velocidade e intensidade do corte está relacionado a capacidade de armazenamento e dimensão do reservatório (Jónatas, 2013).



Figura 15 – Situação inicial do corte provocado por galgamento (Jónatas, 2013).

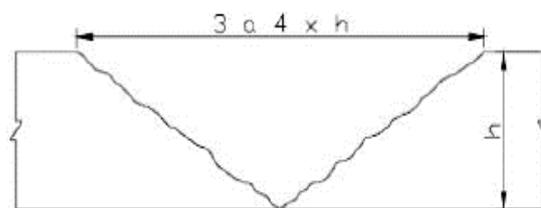


Figura 16 – Situação avançada do corte provocado por galgamento (Jónatas, 2013).



Figura 17 – Situação final do corte provocado por galgamento, com a ruptura da barragem (Jónatas, 2013).

3.3. Liquefação

De maneira geral, o fenômeno liquefação é definido pela NBR 13028:2017 como:

“A liquefação pode ser entendida como o comportamento na ruptura de materiais granulares e/ou finos com baixa coesão, fofos, saturados e com tendência à contração, que sob solicitações ou carregamentos não drenados, gera acréscimo de poropressão e conseqüente redução da tensão efetiva, caracterizando uma quebra substancial na resistência ao cisalhamento não drenado.” (ABNT, 2017, p.12).

O primeiro a usar este termo para explicar tal fenômeno foi Hazen para explicar o rompimento da barragem da Calaveras, localizada na Califórnia, EUA, no ano de 1918 (Guillén, 2004).

A liquefação é causada pela diminuição da resistência efetiva e da rigidez dos solos, submetido a cargas externas. Ele ocorre normalmente em locais que os materiais estão mais propensos a diminuição de volume quando são submetidos a tensões de cisalhamento, encontram-se saturados (Guillén, 2008).

Visto que o solo se encontra saturado, todos os poros presentes no solo, ou seja, os vazios, estão preenchidos com água. O tempo que é preciso para a drenagem é maior que o tempo de aplicação da carga externa. Desta maneira, a diminuição do volume é causada por um aumento do valor da pressão dos fluidos presentes nos poros do solo (Guillén, 2008).

Segundo Silveira (2009) o conceito de poropressão é a pressão causada pelo fluido exercida no interior dos poros dos elementos porosos, como as rochas e solo. Ressalta-se que o fluido distribui as tensões em todas as direções, originando tensões normais anisotrópicas e cisalhantes nulas.

De acordo Guillén (2008) durante a aplicação da carga externa a poropressão tende a aumentar, igualando-se a tensão de confinamento, a tensão efetiva atuante no material chega a zero. Devido a este fato, o material perde as características de material sólido, comportando-se fisicamente igual a um fluido viscoso. Assim, a resistência ao cisalhamento deste material se torna zero. Ressalta-se que a definição técnica de um fluido é: todo material que não possui resistência a tensões de cisalhamento, independente da intensidade. Desta maneira, a ruptura ocorre em certas regiões de massa, não somente em uma determinada superfície.

Visto em ensaios de laboratório e eventos em campos foi necessário a divisão do fenômeno da

liquefação em dois grupos. O primeiro é chamado de “fluxo de liquefação” e a segunda “mobilidade cíclica”. O primeiro pesquisador a utilizar o termo de mobilidade cíclica foi por Casagrande (1971).

O chamado fluxo de liquefação, simplesmente chamado de liquefação, é o fenômeno que apresenta o aumento expressivos de poropressões como mostrado na Figura (18) no interior do material, até que chegue à ocorrência da ruptura, existindo grande deformações. Entretanto a mobilidade crítica ocorre em casos de rupturas com deformações progressivas (Guillén, 2008).

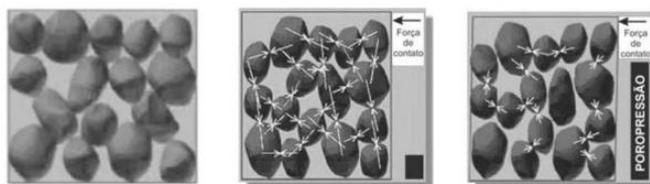


Figure 18 – Sequencia Geral do processo da liquefação (Pereira, 2005).

Como cita Guillén (2004) o fluxo de liquefação ocorre apenas em areias saturadas fofas, a partir de cargas externas estáticas ou dinâmicas que vão provocar tensões cisalhantes no solo. Isso pode acontecer em taludes, sob fundações, etc.

Mobilidade cíclica pode ser induzida em laboratório mesmo para areias bastante densas. A resistência à mobilidade cíclica para uma areia saturada com dado índice de vazios aumenta com a tensão confinante. Considerando-se resistência à mobilidade cíclica como a tensão de desvio necessária para produzir certa deformação sob determinado número de ciclos.

4. Dados Estatísticos de Ruptura de Barragens e Estudos de Caso

A segurança de barragens se apresenta como uma função importante, entretanto, variam os métodos de prevenção a acidentes a depender do tipo de cada uma delas. Os riscos e danos que advêm de sua ruptura são variáveis devido ao tipo e tamanho de sua estrutura.

A partir da década de 1950 ocorreram graves acidentes com barragem, dentre estes incidentes mais graves sete deles ocorreram no Brasil como podemos perceber na Figura (19). Este é um estudo de retro análise das causas de alguns desses acidentes a seguir, em ordem cronológica dos fatos.

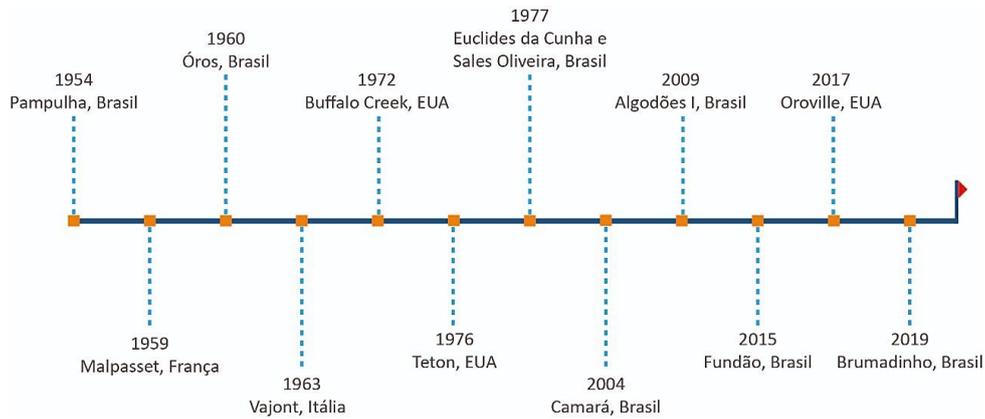


Figure 19 – Incidentes com barragens (INEA, 2020).

Segundo Tonussi (2017), durante os últimos 100 anos, houve cerca de 200 falhas significativas em barragens construídas, resultando em um prejuízo de milhões de dólares e na morte de 11.100 pessoas. Como cita Ferreira e Andrzejewski (2015), as maiores cheias resultaram em rompimentos de barragens. A partir de dados compilados pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens, no período de 1900 a 1973, as principais causas de ruptura foram devido aos fenômenos de galgamento e piping, bem como problemas nas fundações. De acordo com Tonussi (2017), o grande problema é que não é fácil perceber estes problemas na barragem durante a sua execução, pois estes fenômenos ocorrem quando o barramento de montante possui problemas estruturais. A Figura (20) mostra o percentual de rompimento e sua causa.



Figura 20 – Percentual de rompimento e suas causas (Ferreira e Andrzejewski, 2015).

Note que em barragens de terra e enrocamento as principais causas de ruptura foram galgamento e piping, em mais de 70% dos casos. Ressalta-se que problemas nas fundações ocorrem no início da operação das barragens, enquanto que os demais fenômenos demoram um tempo para que ocorram. Entretanto, grande percentual ocorre durante o primeiro enchimento, momento no qual aparecem as falhas construtivas, de projeto, etc (Tonussi, 2017).

Ainda de acordo com o levantamento realizado pelo Comitê Internacional de Barragens, na Europa Ocidental e nos EUA, durante o período

de 1900 a 1969, mais de 70% dos rompimentos ocorrem em barragens de terra e enrocamento. Em contrapartida, mais da metade das barragens destes locais foram construídas como barragens de terra e enrocamento. A Figura (21) mostra estes dados (Ferreira e Andrzejewski, 2015).

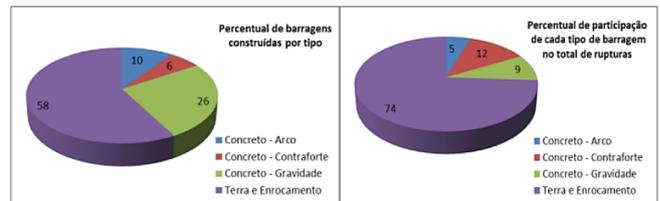


Figura 21 – Percentual ruptura por tipo de barragens (Ferreira e Andrzejewski, 2015).

Como cita Tonussi (2017), diversas podem ser as causas que podem levar a ruptura de uma barragem. Podendo ser um fato isolado ou um conjunto deles. Dessa forma, na Tabela (1) segue as principais causas de ruptura para cada tipo de barragem.

Tipo de Barragem	Tipo de Ruptura
Aterro	Galgamento, erosão interna (<i>piping</i>) e escorregamento da fundação
Concreto	Falha na fundação da barragem e erosão da fundação a jusante da barragem

Tabela 1 – Tipo de barragem e rupturas comuns (Tonussi, 2017).

Abaixo, segue casos de rompimentos de barragens no Brasil, demonstrando a causa e as principais consequências.

4.1. Pampulha

A Lagoa da Pampulha se situa na região da Pampulha no município de Belo Horizonte do estado de Minas Gerais. Atualmente é reconhecida

como uma atração turística e cartão postal, que foi contemplada com monumentos arquitetônicos por Oscar Niemeyer.

Sua concepção e construção ocorreu em duas etapas, sendo a primeira delas em 1936 e a segunda em 1943, com uma capacidade naquela década de 18x106 m³. Seu objetivo inicial era de ser um reservatório artificial com o intuito de amortecimento de enchentes além de contribuir com o abastecimento de água do município (Guimarães e Marchi, 2015).

Entretanto, no dia 20 de abril de 1954, ocorreu uma ruptura do maciço, mostrado na Figura (21). Existem como razões teóricas de sua ruptura o fato de que ocorreu uma erosão subterrânea conhecida como piping, através do corpo da barragem e o emperramento da comporta do vertedouro não permitindo o alívio da pressão da água (Guimarães e Marchi, 2015).

O sistema de drenagem desta barragem era constituído de drenos normais ao seu eixo e se avançavam anormalmente até muito próximo ao talude de montante, que era revestido por uma placa contínua de concreto armado. Porém, após anos de sua construção a cortina de concreto se rompeu por recalques em sua fundação (Braz, Oliveira e Melo, 2015).



Figura 22 – Rompimento da barragem da Pampulha 1954 (Metro Jornal, 2019).

Após a reconstrução da barragem da Pampulha, esta contou com um sistema extravasor que permaneceu com as mesmas características possuindo um vertedor de serviço e um emergencial para medir e controlar a vazão, com mais potencial para situações de cheias de grandes magnitudes. Hoje se faz necessário um acompanhamento de segurança rígido, tendo em vista que após o fim de sua reconstrução em 1958, ocorreu uma grande ocupação de sua região que hoje é densamente populada. Sendo assim, uma nova e eventual

ruptura desta, teriam consequências catastróficas (Braz, Oliveira e Melo, 2015).

4.2. Euclides da Cunha e Sales de Oliveira

As usinas Hidrelétricas de Euclides da Cunha e Armando Salles de Oliveira, conhecida como Limoeiro, apresentam respectivamente volumes de 13,6hm³ e 25,9hm³, construídas em 1960 e 1964. Elas são localizadas no Rio Pardo, no município de São José do Rio Pardo, no estado de São Paulo (Camargo, 2014).

Janeiro de 1977 foi um mês de grande volume de chuvas, chovendo cerca de 230 mm em 24 horas. Este fato ocasionou uma grande cheia na região causando problemas nas comportas do vertedouro que impediu a liberação da vazão. Com isso o nível da água subiu até galgar a barragem, gerando o rompimento da estrutura por overtopping. (Camargo, 2014).

Durante quatro horas, cerca de 1,2 m de lâmina de água passou por cima de sua estrutura. A erosão abriu uma enorme brecha em sua estrutura, com todo esse volume de água vazando, em poucos minutos, a onda de cheia proveniente deste acidente levou também à ruptura em cascata de outra barragem localizada a 10km a jusante desta, a Usina Armando de Salles Oliveira (Camargo, 2014).

Ambas foram reconstruídas e se encontram em amplo funcionamento atualmente.

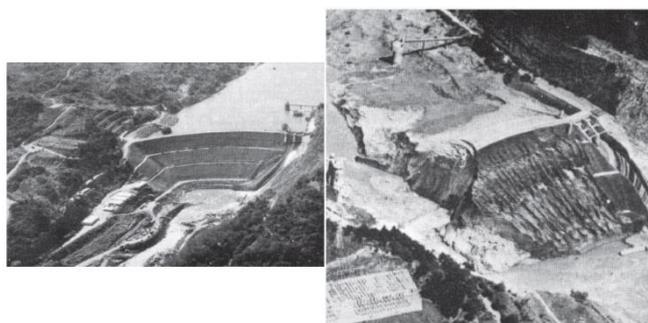


Figura 23 – Vista da barragem Euclides da Cunha, antes (à direita) e após o rompimento (à esquerda) - (CBDB, 1982).

4.3. Fundão

A barragem de Fundão era localizada no subdistrito de Bento Rodrigues, cerca de 35km do município de Mariana. Esta era uma barragem construída para servir de depósito de rejeitos de mineração, controlada pela empresa Samarco Mineração S.A.

Em 5 de novembro de 2015, a barragem de fundão entrou em colapso tendo o seu rompimento.

Tal desastre chocou a população global, causando danos irreparáveis ao meio ambiente e a vida, provocando um desastre sem precedentes na história do Brasil. O legado desta tragédia foi um rastro de mortes e destruição.

Com o seu rompimento, cerca de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério foram lançados a natureza. Ainda 16 milhões de metros cúbicos continuaram sendo despejados lentamente junto as correntezas da foz do Rio Doce no oceano do Espírito Santo (Lopes, 2016).



Figura 24 – Visão área da barragem de Fundão, em Mariana (G1, 2019).

O rompimento de tal barragem se deu primordialmente devido a negligência de profissionais. Continuavam a operar a barragem de rejeitos com uma elevação de sua crista anualmente. Sendo que esta elevação era maior do que a recomendada por segurança (Machado, 2017).

No dia de seu rompimento, o início se deu na ombreira esquerda da barragem. Um fato determinante foi a ocorrência de falha na barragem devido ao fluxo de liquefação dos rejeitos. Processo este onde as partículas de rejeitos se comportam como líquidos, devido a poropressão entre as partículas que aumentam consideravelmente, fazendo com que a areia se torne lama e deixe de filtrar a água (Machado, 2017).

Ainda hoje existem consequências irreparáveis desta tragédia e ainda se estenderá por longos anos seus prejuízos.

4.4. Barragem I - Córrego do Feijão

A barragem I era localizada no Córrego do Feijão, localizado cerca de 9 km do município de Brumadinho, região metropolitana de Belo Horizonte. No dia 25 de janeiro de 2019, sofreu um rompimento, resultando em um fluxo catastrófico. A barragem foi construída para servir de depósito de rejeitos de mineração, controlada pela empresa Vale S.A.

Como cita Robertson et al. (2019), o rompimento da barragem I foi um evento único, pois existem imagens de vídeo de alta definição que mostram o acontecimento. As imagens mostram o rompimento do talude da barragem, começando na crista e estendendo-se até a uma área próxima ao primeiro alteamento. O colapso do talude ocorreu em menos de 10 segundos. Foi despejado da barragem cerca de 9,7 milhões de metros cúbicos de material em menos de 5 (cinco) minutos.



Figura 25 – Barragem I após o rompimento (Robertson et al., 2019).

Com o seu rompimento, mais de 250 pessoas morreram, sendo a maioria funcionários da mina. Além disso, refeitórios e escritórios de administração da mina, bem como vagões e locomotivas foram soterradas. O fluxo de lama existente destruiu partes do distrito, como pousadas, ferrovias, etc. As áreas de cultivo abaixo da barragem também foram afetadas (Robertson et al., 2019).

Como já foi mencionado, o rompimento da barragem se deu dentro do talude, estendendo-se até a crista, como um resultado de perda de resistência significativa e repentina. Dessa maneira, com base nas imagens do vídeo do rompimento, a causa deste evento foi o resultado do fenômeno da liquefação estática dos materiais retidos na barragem. Ressalta-se que o processo de liquefação é a perda súbita de resistência de solos muitos fofos, como areia, podendo acontecer também em solos saturados ou quase saturados (Robertson et al., 2019).

Uma série de fatores culminaram na falha na barragem devido a liquefação estática. Dentre os fatores pode-se citar: a falta de drenagem interna, resultando em um nível de água alto, principalmente na região do pé da barragem; precipitação regional alta e intensa; projeto que resultou em um talude íngreme construído a montante; dentre outros (Robertson et al., 2019).

A tragédia de Brumadinho, foi um dos maiores desastres de barragens no mundo desde 1960. Os efeitos causados geraram consequências irreparáveis e ainda se estenderá por longos anos seus prejuízos.

5. Considerações Finais

Este trabalho teve como seu objetivo o estudo de barragens e seus tipos, entender como estas são classificadas, além de rever as principais causas que combinam na ruptura de barragens, realizando retroanálises que culminam em uma ferramenta para avaliar e aperfeiçoar os modelos de previsões de rupturas. Ao realizar a revisão bibliográfica, e os estudos acerca do tema abordado, pode-se concluir que a maioria dos fenômenos descritos ocorrem em barragens de aterro.

Barragens de aterro estão mais suscetíveis aos fenômenos de galgamento e piping (erosão interna). Como cita Tonussi (2017) as três principais causas por detrás de ruptura são o galgamento, problemas na fundação e piping. Já as barragens de concreto podem ter falha na fundação ou erosão da fundação a jusante.

Dessa maneira, pode-se concluir que de fato toda construção de barragem possui um risco associado. Visto os imensuráveis prejuízos em caso de colapso da estrutura é necessário ter um cuidado contínuo, desde a idealização do projeto a desativação, realizando todas as ações cabíveis a fim de evitar possíveis desastres.

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017. NBR 13028:2017. *Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ANA – Agência Nacional das Águas, 2019. *Relatório de Segurança de Barragens 2019*. [online]. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>> [Acessado 01 Outubro 2020].
- Brasil, 2020. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração)*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil.
- Braz, M.G., Oliveira, M.L. e Melo, B.R., 2015. Considerações da Lei nº 12334/2010 à luz de um rompimento hipotético de uma barragem em meio urbano. Estudo de caso: Barragem da Pampulha. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Camargo, W.D.P., 2014. *Estudo de acontecimentos históricos de rupturas de barragens*. Graduação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Casagrande, A., 1971. *On Liquefaction Phenomena*. *Geotechnique*, 21(3), pp.197-202. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.3.197>
- CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 1982. *Main brazilian dams: design, construction and performance*. ICOLD Publications. Brasil.
- Engecorps Engenharia S.A., 2012. *Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas*. [online]. Disponível em: <http://gripsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo_I_Texto.pdf> [Acessado 29 Setembro 2020].
- Ferreira, A.L.M. e Andrzejewski, E.A., 2015. Comparação de métodos de cálculo da ruptura de uma barragem hipotética. In: *XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens*.
- G1 – O portal de notícias da Globo, 2019. *Justiça estipula 2020 como prazo final para o reassentamento das famílias atingidas pelo desastre da Samarco, em Mariana*. [online]. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/03/13/justica-estipula-2020-como-prazo-final-para-o-reassentamento-das-familias-atingidas-pelo-desastre-da-samarco-em-mariana.ghtml>> [Acessado 19 Outubro 2020].
- Guillén, J.L.C., 2008. *Modelagem Elasto-plástica da Liquefação Dinâmica de Solos*. Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Guillén, J.L.C., 2004. *Estudo de modelos constitutivos para a previsão da liquefação em*

- solos sob carregamento monotônico. Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Guimarães, A.C.P.D. e Marchi, A., 2015. *Avaliação para destinação do sedimento dragado da lagoa da Pampulha em Belo Horizonte/MG*. [online]. Disponível em: <https://www.abes-rs.org.br/novo/_materiais/materiais_wt1habg7wj7t.pdf> [Acessado 29 Setembro 2020].
- INEA – Instituto Estadual do Meio Ambiente, 2020. *Segurança de Barragens*. [online]. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/seguranca-hidrica/seguranca-de-barragens/>> [Acessado 29 Setembro 2020].
- Johnson, F.A. e Illes P., 1976. *A Classification of Dam Failures*. Water Power and Dam Construction, 28(12), pp.43-45.
- Jonatás, R.J.L., 2013. *Ruptura de barragens de aterro por galgamento: ensaios experimentais com aterros homogêneos*. Doutorado. Universidade de Lisboa.
- Lopes, L.M.N., 2016. *O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais*. Sinapse Múltipla, 5(1), pp.1-14.
- Machado, N.C., 2017. *Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação*. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Melo, R., 2012. *Comportamento de percolação em barragens de enrocamento com núcleo em concreto asfáltico*. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Morgenstern, N.R., Vick S.G., Viotti, B.C. e Watts, B.D., 2016. *Relatório sobre as causas imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão*. [online]. Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/10/relatorio-sobre-as-causas-imediatas-da-ruptura-da-barragem-de-fundao.pdf>> [Acessado 01 de Outubro de 2020].
- Metro Jornal, 2019. *Rompimento da Barragem da Pampulha, 1954*. [online]. Disponível em: <<https://www.metrojornal.com.br/foco/2019/06/04/rompimento-barragem-belo-horizonte-65-anos.html>> [Acessado 29 Setembro 2020].
- Neves, L.P., 2018. *Segurança de barragens: legislação Federal Brasileira Comentada*. [online]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/asuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-pani-ago-neves>> [Acessado 01 Outubro 2020].
- Patias, J., Matos, S.F., Royer, J.C. e Faria, E.F., 2015. *Vasões de infiltração através da barragem de Itaipu*. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens.
- Pereira, E.L., 2005. *Estudo de potencial de liquefação de rejeitos de ferro sob carregamento estático*. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Robertson, P.K., Melo, L., Williams, D.J. e Wilson, G.W., 2019. *Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão*. Brumadinho/MG.
- Romanini, A., 2020. *Introdução ao projeto de barragens de terra*. 1ed. Sinop/MT.
- Silva, E.L., Gurgel, H. e Freitas, C.M., 2019. *Saúde e desastres no Brasil: uma reflexão sobre os aspectos envolvidos em eventos hidrológicos e rompimento de barragens*. Confinos, (42). <https://doi.org/10.4000/confinos.23114>
- Silva, A.F.R. e Ribeiro, C.B.M., 2018. Estudo dos hidrogramas formados por piping e galgamento para propagação de onda de cheia proveniente de ruptura de barragem - estudo de caso. In: *III Simpósio de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul*. Universidade Federal de Juiz de Fora. Pp.1-10.
- Silveira, B.T., 2009. *Estimativa de Pressão de Poros em 3 Dimensões*. Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Tonussi, A.P., 2017. *Estudo de ruptura de barragem por piping*. Graduação. Universidade do Sul de Santa Catarina.
- Vieira Júnior, L.P. e Salles, F.M., 2011. *A tecnologia do concreto aplicada ao projeto de barragens*. Concreto & Construção, XXXIX(63), pp.15-23.