

## ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE ONDA OCACIONADA POR ROMPIMENTO DE BARRAGEM: SIMULAÇÃO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE ÁGUA

### ANALYSIS OF WAVE PROPAGATION CAUSED BY DAM RUPTURE: SIMULATION OF RUPTURE OF A WATER DAM

### ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS POR ROTURA DE PRESA: SIMULACIÓN DE ROTURA DE UNA PRESA DE AGUA

Mylanna Pereira do Valle<sup>1</sup>  
Pantene Oliveira Cassel Junior<sup>2</sup>  
Gabriel Silvério Feltz dos Santos<sup>3</sup>  
Fábio Almeida de Moraes Patente<sup>4</sup>

**RESUMO:** Danos em decorrência de rupturas de barragens são bastante expressivos e podem gerar eventos catastróficos. Levando em consideração o risco inerente que tais estruturas apresentam, a principal ação a ser tomada é evitar ao máximo a ocorrência desses eventos ou prever as proporções que tomariam. Leis e planos foram estabelecidos afim de garantir a segurança de barragens, assim como da região a jusante do barramento, a adoção de medidas de gerenciamento de riscos e de emergência se tornam essenciais nesse cenário. Portanto, é extremamente necessário realizar análises de rupturas em barragens com a finalidade de determinar regiões de inundação contendo as profundidades do alagamento e os tempos de chegada da onda em cada ponto das áreas atingidas, informações essenciais para elaboração de um Plano de Ação de Emergência. Para evidenciar a importância desses estudos, esse trabalho traz a simulação de ruptura de uma barragem de pequeno porte. Os mapas de inundação foram gerados pelo software HEC-RAS a partir da topografia extraída de um modelo digital de elevação. Apesar do caráter preliminar do estudo e da simulação realizada, os impactos gerados na região a jusante da barragem, puderam ser analisados com maior clareza. A partir da propagação da onda que o rompimento dessa barragem proporcionaria, foi possível concluir e refletir sobre a importância de planos emergenciais em barragens de menor porte, uma vez que os danos observados nessa simulação foram significantes.

1822

**Palavras-chave:** Barragem. Rompimento. Simulação. Inundação.

<sup>1</sup> Pós-graduação em Meio Ambiente e Saneamento Básico - Centro Universitário União das Américas Descomplica. Graduação em Engenharia Civil - Universidade Veiga de Almeida (UVA).

<sup>2</sup> Pós-graduação Lato Sensu em Projetos de Estruturas - Centro Universitário União das Américas Descomplica(2023); Pós-graduação Lato Sensu em Orçamentação, Planejamento e Controle na Construção Civil - Centro Universitário União das Américas Descomplica(2023); Graduação em Engenharia Civil - Universidade Anhanguera UNIDERP (2018).

<sup>3</sup> Pós- graduação - MBA em Gestão de obras na construção civil – UniBF. Pós- graduação - MBA em Orçamento, planejamento e controle na construção civil. – UniBF. Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Paraná (UFPR) .

<sup>4</sup> Graduação em Engenharia Civil - Centro Universitário Jorge Amado – UNIJORGE.

**ABSTRACT:** Damages resulting from dam ruptures are quite significant and can lead to catastrophic events. Taking into account the inherent risk that such structures present, the main action to be taken is to avoid these events as much as possible or to predict the proportions they would take. Laws and plans have been established in order to ensure the safety of dams, as well as the bus downstream region, the adoption of measures management of risks and emergency become essential in this scenario. Therefore, it is extremely necessary to carry out analyzes of dam ruptures in order to determine flood regions containing the depths of flooding and wave arrival times at each point in the affected areas, essential information for preparing an emergency action plan. To highlight the importance of these studies, this work brings breakage simulation of a small dam. The flood maps were generated by the HEC-RAS software from the topography extracted from a digital elevation model. The Despite the preliminary nature of the study and simulation performed, the impact generated in the region downstream from the dam, could be analyzed with greater clarity. From the propagation of the wave that the rupture of this dam would provide, it was possible to conclude and reflect on the importance of emergency plans in smaller dams, since the damages observed in this simulation were significant.

**Keywords:** Dam. Breach. Simulation. flood.

**RESUMEN:** Los daños resultantes de la rotura de presas son bastante importantes y pueden generar eventos catastróficos. Teniendo en cuenta el riesgo inherente que tales estructuras presentan, la principal acción a tomar es evitar en la medida de lo posible la ocurrencia de estos eventos o predecir las proporciones que tomarían. Se han establecido leyes y planes para garantizar la seguridad de las represas, así como de la región aguas abajo de la represa, la adopción de medidas de gestión de riesgos y emergencias se vuelve esencial en este escenario. Por lo tanto, es sumamente necesario realizar análisis de roturas de presas para determinar las regiones inundables que contienen las profundidades de las inundaciones y los tiempos de llegada de las olas en cada punto de las zonas afectadas, información fundamental para la elaboración de un Plan de Acción de Emergencia. Para resaltar la importancia de estos estudios, este trabajo presenta la simulación de la ruptura de una pequeña presa. Los mapas de inundaciones fueron generados por el software HEC-RAS a partir de topografía extraída de un modelo de elevación digital. A pesar del carácter preliminar del estudio y la simulación realizada, se pudieron analizar con mayor claridad los impactos generados en la región aguas abajo de la presa. A partir de la propagación de la onda que proporcionaría la ruptura de esta presa, se pudo concluir y reflexionar sobre la importancia de los planes de emergencia en presas de menor tamaño, ya que los daños observados en esta simulación fueron significativos.

**Palabras clave:** Presa. Rotura. Simulación. Inundación.

## INTRODUÇÃO

Represas são grandes lagos artificiais que se formam a partir de barragens construídas para bloquear ou desviar cursos d'água. Com a finalidade inicial de manter os povoados abastecidos em tempos de seca e controlar inundações, a construção de barragens é feita pelo homem desde a antiguidade. Há indícios de barragens de pedra construídas aproximadamente em 240a.C.

Com o desenvolvimento da população, as barragens foram adquirindo novas funções se tornando essenciais no dia a dia. Hoje, o abastecimento das cidades e das indústrias, assim como a irrigação agrícola, depende em quase sua totalidade das águas advindas de represas. As barragens também são utilizadas em outras importantes funções como: a geração de energia elétrica através das hidrelétricas e o depósito de alguns materiais, que em grande parte são rejeitos de atividades de mineração.

Na Lei 14066/2020, tem-se como definição para barragem: “qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

“A segurança da barragem considera as fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros.” (Lei 14066/2020.) Essas estruturas podem ser construídas por maciços de terra ou serem feitas de concreto, devendo ser projetadas, executadas e monitoradas por uma equipe de engenheiros, geotécnicos e geólogos, seguindo uma série de técnicas e normas afim de garantir sua funcionabilidade e principalmente sua segurança.

A discussão acerca da segurança em barragens tem se tornado um tema cada vez mais observado, pois a ruptura de construções desse porte pode causar efeitos catastróficos.

## JUSTIFICATIVA

Ao fazer a análise do tema estudado, observa-se que as barragens possuem papel relevante na sociedade, entretanto, o risco associado a falhas estruturais causa consequências inestimáveis.

Recentemente no Brasil os municípios de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos no estado de Minas Gerais, sofreram com falhas em estruturas de barragens de rejeito. Esses acidentes catastróficos tiveram como resultados enormes perdas materiais, financeiras, humanas e ambientais.

Embora tratem-se de barragens de rejeitos e com alto Dano Potencial Associado (DPA), muitas das medidas de prevenção e segurança de barragens não foram cumpridas, enfatizando a necessidade de salientar ao estudo, análise e monitoramento dessas estruturas.

Pelo fato de seu DPA ser mais alto, as barragens de rejeitos possuem maior monitoramento em relação a barragens que são apenas de água. Porém, mesmo que em menor

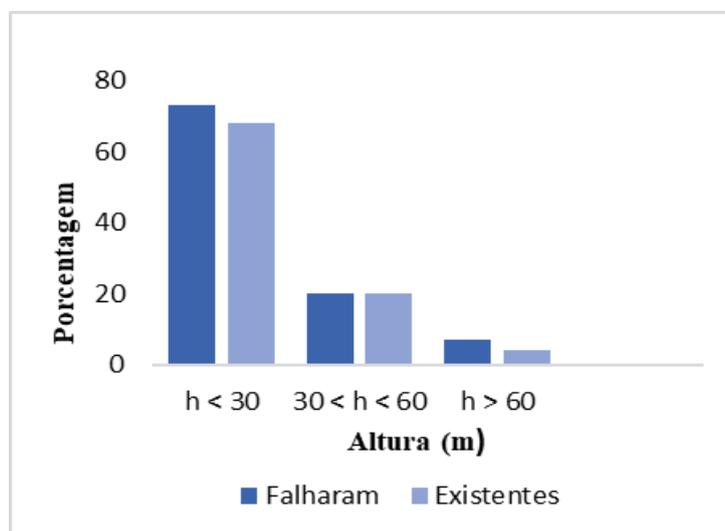
escala, o rompimento de barragens de água gera inúmeras consequências. Acidentes em estruturas desse porte, estão sendo cada vez mais frequentes, não só no Brasil como em vários outros países, tornando evidente que se deve atentar também ao monitoramento de estruturas desse tipo.

As barragens para reservatórios de água estão em maior número no país, segundo o Relatório de Segurança das Barragens de 2019 (RSB/2019) o uso principal das barragens submetidas à Plano Nacional de Segurança das Barragens (PNSB) constantes no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), são: irrigação (34%), abastecimento humano (21%), hidrelétrica (17%) e contenção de rejeitos de mineração (8%).

No RSB/2019 consta que foram relatados 12 acidentes e 58 incidentes com barragens em 15 diferentes estados, sendo 2 deles em barragens de mineração e os demais em barragens de menor porte onde ocorreram eventos de cheia.

De acordo com dados do ICOLD, o maior número de vítimas fatais em acidentes com rupturas de barragens em todo o mundo fora advindo de rupturas de barragens de médio porte, com altura até aproximadamente 30 metros.

**Gráfico 1 – Porcentagem de falhas x Altura da barragem**



Fonte: ICOLD-1995 - Adaptado

Consta também no Relatório de Segurança das Barragens de 2019, que a implementação do PNSB já é realidade na maioria das barragens cadastradas dos setores de geração hidrelétrica e de mineração, porém nas barragens que são apenas para acumulação de água há um grande déficit, por isso é de grande importância a realização de análises e estudos nesse tema.

## OBJETIVOS GERAIS

O estudo em questão tem como objetivo analisar os impactos que o rompimento de uma barragem de água ocasionaria na região ao seu redor, tomando como exemplo uma barragem de água de pequeno porte.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivo específico, tem-se:

- Reunir materiais que agregam informações sobre barragens, estruturas de barragens, acidentes com causas e erros, danos;
- Identificar normas e leis vigentes ao assunto em questão;
- Analisar os dados estruturais e de funcionamento da barragem exemplificada;
- Projetar e analisar o comportamento da onda de inundação;
- Avaliar os danos causados pelo rompimento da barragem.

## METODOLOGIA

Recolhimento e estudo de materiais relevantes ao tema, tais como normas, artigos e bibliografias relacionadas a barragens e seus atributos, assim como materiais e dados específicos da barragem em questão.

O material utilizado como base principal foi a Lei 14066/2020, que altera a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 12334/10) no qual se estabelece todas as diretrizes para que a segurança seja garantida. Assim como artigos que expõem o tema em questão e relatórios de análises feitas na barragem exemplificada.

Dados e demais informações foram coletados principalmente de materiais disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), como os Relatórios de Segurança de Barragens que são publicados anualmente, dando ênfase ao publicado no ano de 2019, e ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB, sistema que coleta, armazena e recupera informações sobre barragens.

O modelo numérico de propagação do hidrograma de ruptura e o consequente mapeamento das áreas inundadas foi realizado por meio do software HEC-RAS versão 5.0.7, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center – U. S. Army Corps of Engineers (HEC-USACE). O programa é capaz de determinar a propagação do hidrograma de ruptura e os níveis de elevação a partir de simulações unidimensionais e bidimensionais baseado nas equações de

Saint-Venant. Para o estudo em questão, utilizou-se simulações bidimensionais. Para a elaboração da simulação da propagação da onda da barragem exemplificada no software HEC-HAS foram necessários dados específicos, extraídos em grande parte de relatórios fornecidos pela empresa responsável, ao qual não foi permitido a exposição de seu nome como também da localização do empreendimento. Com base nessas informações, foram adotadas algumas premissas que nortearam o estudo, tais como:

- Definição do cenário de ruptura, levando em consideração a causa de rompimento mais provável com base na análise das características da barragem;
- Cálculo da geometria da brecha, realizado por meio de equações empíricas definidas para o cenário de ruptura definido;
- Elaboração do hidrograma por meio de equações empíricas, dados definidos sobre barragem e características da brecha.

A partir dessa simulação, foi possível realizar o mapeamento da planície de jusante e sinalizar as áreas mais suscetíveis ao risco.

## REFERENCIAL TEÓRICO

Após o crescimento e a proporção da ocorrência de eventos relacionados à rupturas de barragens, tornou-se explícito a importância de pesquisas e estudos voltados a essas estruturas, assim como maiores exigências nas aplicações das leis e normas vigentes.

1827

## NOMAS E LEIS VIGENTES

Em setembro de 2010 entrou em vigor no Brasil a Lei 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Esta lei foi revisada em 2020 e sofreu alterações em alguns de seus dispositivos, entrando então em vigor a lei 14066/2020 sancionada em 30 de setembro de 2020.

Enquadram-se na Política Nacional de Segurança de Barragens, as barragens destinadas a acumulação de água independente do uso e barragens destinadas a acumulação de rejeitos e resíduos industriais, que apresentem pelo menos uma das seguintes categorias:

- 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 3.000.000m<sup>3</sup> ;
- 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 desta Lei;

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

Estão caracterizados no artigo 7º da Lei 14066/2020 esses dois critérios que são bastante citados nesse artigo, o CRI E O DPA:

- Categoria de risco (CRI): A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação e da idade do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem, bem como de outros critérios definidos pelo órgão fiscalizador. (Lei 14066/2020).

- Dano potencial associado (DPA): classificação dividida em alto, médio ou baixo feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (Lei 14066/2020).

A Política Nacional de Segurança de Barragens dispõe de alguns instrumentos, dentre eles está o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Esse sistema existe para registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional, mantendo informações sobre incidentes que possam colocar em risco a segurança de barragens, sobre acidentes e desastres. O SNISB compreende um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção em operação e desativadas. (Lei 14066/2020).

Tem-se também como instrumento da PNSB o Plano de Segurança de Barragens (PSB). A elaboração desse plano é de responsabilidade do empreendedor e deve conter dados referentes à implantação do empreendimento, assim como informações sobre a estrutura da equipe e inspeções de segurança, manuais de procedimentos e monitoramento. Também pode ser exigido um Plano de Ação Emergencial (PAE), além de relatórios das inspeções e revisões periódicas de segurança.

Para que as medidas de segurança sejam atendidas, a PNSB atribuiu a órgãos fiscalizadores responsabilidade de exigir dos empreendedores o cumprimento das normas de segurança. Cabe a estes órgãos estabelecer: a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento dos planos de segurança (Lei 14066/2020). Também fica a cargo dos órgãos fiscalizadores a responsabilidade de reportar à

Agência Nacional de Águas (ANA) quaisquer irregularidades ou a falta de cumprimento das normas e orientações estabelecidas.

## TIPOS DE BARRAGENS

As barragens geralmente são classificadas de acordo com suas formas e materiais utilizados. A escolha do tipo de estrutura adotada para cada barragem depende de uma análise de fatores, que determinam a viabilidade de um projeto, entre os quais se destacam a topografia e geologia da região, finalidade do barramento, aspectos técnicos, econômicos e impacto ambiental.

- Barragem de terra

É o tipo mais comum de barragem. As barragens de terra funcionam conforme o peso do aterro, o que justifica o grande volume que elas barragens possuem. Esse fato se deve pela sua facilidade de execução e sua construção envolve muitas vezes o uso do material das escavações da própria barragem e o uso de outros materiais disponíveis no local.

As barragens de terra são aquelas em que toda ou quase toda a seção transversal está construída por um mesmo material.

- Barragem de enrocamento

As barragens de enrocamento são formadas por fragmentos de rocha compactados em camadas sobrepostas, cujo peso e compactação promovem a estabilidade do corpo contra o deslizamento. É ideal para situações onde a barragem se localiza em locais com prolongados períodos chuvosos e quando o custo de uma barragem de concreto seja muito alto ou quando há grande disponibilidade de pedra.

- Barragem de Concreto

As barragens de concreto são ideais para locais com ocorrência de fundação em rocha. Elas podem ser construídas em concreto armado ou em concreto rolado e seu formato pode ser reto ou curvado.

As barragens de concreto podem ser divididas em dois tipos de acordo com a sua estrutura:

- Barragem de gravidade

Esse é o tipo de barragem de concreto que possui o menor custo de manutenção. Este tipo pode ser adaptado para todos os locais, mas a sua altura é limitada pela resistência das fundações.

As barragens de concreto gravidade são consideradas corpos maciços, no qual trabalham transferindo a carga do barramento e as pressões da água para a fundação.

As barragens de gravidade geralmente rompem por tombamento ou deslizamento devido a deterioração do material constituinte do corpo ou da diminuição da resistência da fundação.

- Barragens de contrafortes

Essa barragem de concreto é indicada para locais onde há a ocorrência de eventos sísmicos. É considerada o tipo de estrutura com maior resistência.

As barragens de contraforte são compostas de placas de concreto armado como contrafortes em direção a jusante, em que descarregam a carga recebida pela placa às fundações com tensões bem elevadas.

## RUPTURAS DE BARRAGENS

Segundo Mascarenhas (1990), as prováveis causas de ruptura de barragens podem ser associadas à causas naturais e/ou materiais e a causas resultante de ações humanas. Esses dois fatores podem ocorrer de maneira simultânea ou não.

As principais causas de ruptura são:

- Galgamento (overtopping)

Esse fenômeno ocorre em barragens de terra e é atribuído à falta de capacidade do vertedouro, avaliações deficientes da vazão durante a construção e mau funcionamento das estruturas e dos equipamentos de descarga.

A associação dessas falhas citadas a um evento hidrológico extremo, onde o volume do reservatório e as estruturas de descarga da barragem não são suficientes para armazenar e extravasar a quantidade de água, resulta no escoamento d'água sobre a estrutura. Esse escoamento inicia-se por uma brecha no ponto mais fraco do barramento que vai se aprofundando e aumentando lateralmente.

- Erosão interna regressiva (Piping)

O processo de piping consiste na erosão interna da barragem ou de suas fundações através da percolação de água que excede as forças resistentes e provocam a abertura progressiva de canais, que vão aumentando de tamanho até formarem a brecha.

O piping pode iniciar devido a diversos fatores como erros construtivos no aterro, grau de compactação do solo, erros de especificação do material do filtro, erros de avaliação da fundação entre outros.

- Deslizamento das fundações ou do enrocamento

Ocorre geralmente quando a resistência da fundação não satisfaz as tensões impostas. A utilização de materiais impermeáveis com juntas de ligação pode também contribuir no deslizamento, se a infiltração através desses materiais não for monitorada para controle.

- Abalos sísmicos ou terremotos

Os abalos sísmicos podem interferir diretamente na barragem, afetando sua estrutura, ou a partir da geração de ondas no reservatório que podem comprometer a barragem.

- Falha no projeto e/ou construção

Podem ocorrer falhas como: subdimensionamento dos dispositivos de descarga, análise não criteriosa dos materiais constituintes da obra, falha nas fundações, falta de manutenção, dentre outros.

Tabela 1 – Principais tipos de barragens x rupturas comuns.

Tipo de barragem	Causa da ruptura
Terra	Galgamento
	Erosão interna (Piping)
Concreto	Falha na fundação
	Erosão na fundação
	Deterioração do material
	constituente do corpo

Fonte: Autor, 2020

## HISTÓRICO DE RUPTURA

- Barragem da Pampulha –1954

Localizada em Belo Horizonte (MG), a barragem da Pampulha possuía 16,5 metros de altura, 330 metros de comprimentos e 18 milhões de metros cúbicos de volume de reservatório. Era uma barragem de terra de seção uniforme, com uma placa de concreto armado recobrando o talude de montante e funcionando como elemento de vedação.

**Figura 1** - Rompimento da barragem de Pampulha



**Fonte:** Internet

A ruptura se deu por erosão interna (piping), iniciada entre a fratura na laje de concreto e o talude de jusante em que a placa de concreto retardou o seu progresso.

- Barragem de Orós, Brasil – 1960

Localizado no Ceará, o açude de Orós, ainda em construção, teve seu barramento de terra rompido em março de 1960 pelo processo de galgamento, causando a abertura de uma brecha de 201 metros na estrutura, decorrente de uma onda de cheia.

Cerca de mil pessoas morreram e estima-se que cerca de 50 mil pessoas ficaram desabrigadas devido à inundação do vale.

- Barragem de Camará, Brasil – 2004

A barragem de Camará era feita de concreto compactado com rolo, com 50 metros de altura e comprimento da crista de 296 metros. Rompeu em junho de 2004, liberando 17 milhões de metros cúbicos e causando danos por cerca de 20 km a jusante, deixando 6 vítimas fatais e mais de 3 mil pessoas desabrigadas.

Segundo Barbosa, a barragem apresentou problemas na rocha de fundação devido a mau projeto e mau acompanhamento durante a operação, abrindo um orifício que propiciou o esvaziamento do seu reservatório.

- Barragem de rejeitos de Mariana – 2015

**Figura 2** - Distrito de Bento Rodrigues após a tragédia



**Fonte:** Internet

O rompimento da Barragem de Mariana é o maior acidente da história em volume de material despejado por barragens de rejeitos de mineração. Em novembro de 2015, 62 milhões de metros cúbicos de lama vazaram dos depósitos da Samarco. A lama causou a morte de 19 pessoas, destruiu os distritos de Bento Rodrigues e Paracatu, atingiu a bacia do Rio Doce e afetou mais de 30 municípios de Minas Gerais e do Espírito Santo, onde houve danos profundos ao meio ambiente desde Mariana até o litoral capixaba. (AZEVEDO, 2015).

1833

**Figura 3** - Poluição na desembocadura do Rio Doce no Oceano Atlântico



**Fonte:** Internet

O relatório final do Ministério Público do Estado de Minas Gerais sobre as causas da ruptura da barragem apontou que, uma construção na parte da frente da represa aliada a alteamentos sem controle provocou o desmoronamento da obra.

- Barragem de rejeitos de Brumadinho – 2019

Segundo a Agência Nacional de Mineração, a barragem não apresentava pendências documentais e era considerada inativa.

**Figura 4** - Imagens retiradas do vídeo que mostra o momento do rompimento.



**Fonte:** Internet

O sistema de monitoramento por vídeo da Barragem I foi responsável por registrar as imagens divulgadas onde foi possível observar o modo de ruptura por liquefação que ocorreu na estrutura. (RSB/2019).

A barragem rompeu em janeiro de 2019, liberando um volume de aproximadamente 12 milhões de m<sup>3</sup>, atingindo a velocidade aproximada de **80 KM/h**. A lama chegou ao Rio Paraopeba, afetando a qualidade água e comprometendo uma enorme região.

No momento da ruptura, o sistema de alerta não foi acionado. Os trabalhadores da mineradora e moradores da região não tiveram tempo de buscar abrigo. Até o final de Agosto de 2019 foram contabilizadas 241 mortes e outras 21 pessoas que ainda seguem desaparecidas.

## ESTUDO DE CASO

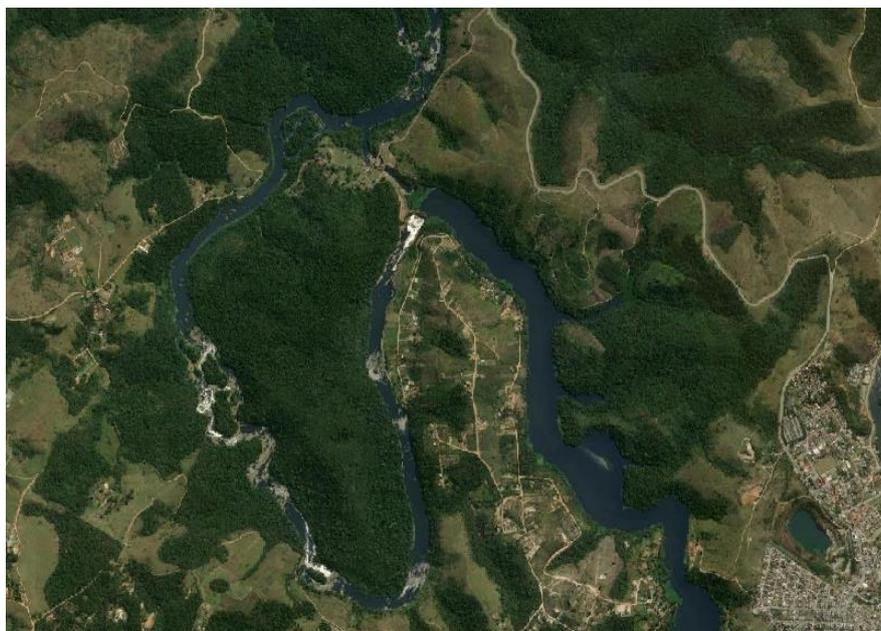
Afim de fundamentar a importância de todo questionamento abordado neste artigo, foi tomada como exemplo para análise do comportamento da onda inundação, uma barragem de água de pequeno porte localizada na região metropolitana do estado de São Paulo.

### CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

A barragem em questão tem por finalidade a geração de energia elétrica e por esse motivo o órgão responsável por sua fiscalização é a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

A estrutura do barramento é feita de concreto gravidade, com altura de 20 metros formando um reservatório com volume máximo de aproximadamente 7300000 m<sup>3</sup>.

**Figura 5** - Imagem aérea do reservatório, barragem e área a jusante da barragem.



**Fonte:** Autor, 2020.

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens /2017, a barragem se enquadra no nível baixo em relação a categoria de risco. Já em relação ao dano potencial associado sua, classificação é considerada alta, pois a jusante da barragem estão localizadas cidades que poderiam ser afetadas na ocorrência de um possível rompimento.

A tabela abaixo mostra um resumo dos dados disponíveis:

**Tabela 2** – Resumo dos dados disponíveis sobre a represa analisada.

<b>Dados da Barragem</b>	
Localização	São Paulo - SP
Órgão fiscalizador	Agência Nacional de Energia
	Elétrica - ANEEL
Uso principal	Geração de energia
Categoria de risco	Baixo
Dano potencial	Alto
<b>Barramento Principal</b>	
Tipo de barramento	Concreto Gravidade
Altura do barramento	17 m
Cota da crista	663 m
Comprimento da crista	130 m
<b>Reservatório</b>	
Cota do NA mín. operacional	650 m
Cota do NA máx. operacional	662 m
Cota do NA máx. excepcional	663 m
Volume máximo	7300000 m <sup>3</sup>
<b>Vertedouro</b>	
Tipo	Soleira livre
Cota da crista	659 m
Quantidade de comportas	2
Largura por comporta	5 m
Coef. de vazão (CO)	2
Descarga máxima	113 m <sup>3</sup> /s
<b>Descarregador de fundo</b>	
Descarga máx. total	1059 m <sup>3</sup> /s

Fonte: Autor, 2020.

## PREMISSAS E CRITÉRIOS

### - CENÁRIO DE RUPTURA

Como a barragem analisada tem sua estrutura de concreto gravidade, os cenários de ruptura possíveis são três: tombamento, deslizamento e giro do barramento

O estudo foi desenvolvido a partir da análise do rompimento em um dia seco (sunny day), onde as condições do reservatório são consideradas normais.

### - DEFINIÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA

O hidrograma de ruptura de uma barragem depende das características do barramento, do reservatório, da brecha formada e da causa da ruptura hipotética considerada.

- Como já citado a barragem é de concreto gravidade e a ruptura considerada é tombamento do barramento.
- A geometria da brecha foi estimada com formato retangular, tendo  $H_{bre} \cong H_{barr}$  = 17 m e largura aproximadamente igual a  $B_{bre} \leq 0,5B_{barr} \leq 65$  m.

Onde:  $H_{barr} \cong$  a diferença entre a cota da crista do vertedouro (663m) e a cota da base do reservatório (646m):

$H_{bre}$  – altura da brecha;

$B_{bre}$  – largura da brecha;

$B_{barr}$  – largura da barragem (130 m).

**Tabela 3-** Parâmetros da brecha

Elevação do topo da brecha (m)	663
Elevação do fundo da brecha (m)	646
NA máximo atingido	663
$H_{bre}(m)$	17
Volume (hm <sup>3</sup> )	7.3
$B_{bre}$ (m)	65

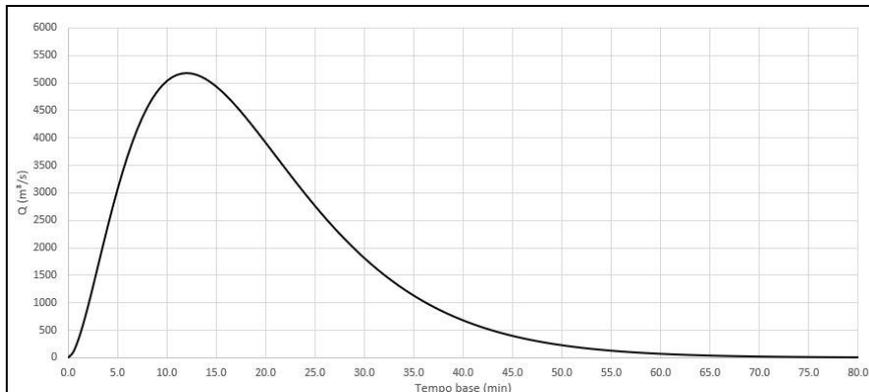
**Fonte:** Autor,2020.

- O tempo de esvaziamento do reservatório é estimado em função do hidrograma de ruptura simplificado. Para construir os hidrogramas de ruptura simplificados é necessário a vazão de pico efluente no caso analisado. O nível d’água máximo é o nível d’água máximo operacional que está estabelecido na cota 663 m.

No Brasil, segundo os critérios definidos pela Eletrobrás (2003), para barragens de concreto gravidade o tempo de pico do hidrograma de ruptura deve estar entre 0,1h e 0,3h.

O hidrograma de ruptura mostrado a seguir foi elaborado por meio de equações empíricas, utilizando-se o modelo com decaimento parabólico e calibrado para o tempo de pico 0,2h. Com base nesse hidrograma, pode-se estimar o tempo de esvaziamento do reservatório que é da ordem de 62min.

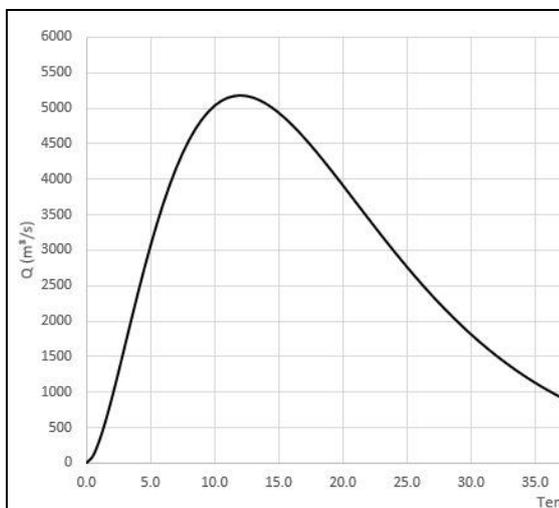
**Figura 6 -** Hidrograma de ruptura para tempo de pico 0,2h



**Fonte:** Autor, 2020.

Também é possível estimar o momento em que a vazão máxima é atingida, que ocorre aproximadamente aos 12 minutos após o rompimento, onde a vazão máxima está em torno de  $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Figura 7 -** Hidrograma de ruptura, vazão máxima.



**Fonte:** Autor, 2020.

## PROPAGAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA

A propagação do hidrograma de ruptura é uma importante ferramenta de planejamento e apoio à segurança de barragens. Nesse estudo, a simulação foi feita com a utilização do software HEC-HAS versão 5.0.7., a partir da associação dos dados obtidos no hidrograma, base topográfica, dados do barramento e demais informações.

A base topográfica utilizada para essa simulação foi extraída da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e possui precisão de 30m. Para uma análise mais confiável é preciso aumentar o nível de precisão do modelo digital de terreno (MDT). Porém, os MDTs com precisão na ordem de 5m, que são os mais recomendados, são caros e não estão disponíveis em bases públicas.

Embora tenha ocorrido a necessidade de ajustes e simplificações, foi possível realizar o mapeamento da planície de jusante, indicando as áreas mais suscetíveis a danos.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apesar das simplificações adotadas, a propagação da onda de inundação e o comportamento da lâmina d'água pôde ser observado e analisado.

**Figura 8** – Área a jusante após a ruptura da barragem



**Fonte:** Autor, 2020.

Na figura 8 está representada a barragem e a área mais próxima a sua jusante após a ruptura. É possível verificar a proporção que a onda de inundação máxima toma nos primeiros quilômetros após o barramento. Embora a baixa precisão no modelo digital de terreno, nota-se que a inundação atinge áreas significativas além das margens do rio.

Na legislação brasileira, não há recomendação de áreas mínimas ou máximas para a análise da onda de inundação. Vale ressaltar que para barragens desse porte, a legislação de Portugal orienta que sejam analisados os primeiros 10 km. Em busca de uma melhor análise, optou-se pelo estudo da onda de inundação nos primeiros 16km desta barragem.

A figura 9 apresenta os primeiros 16km a jusante do barramento após sua ruptura, onde é possível observar o primeiro adensamento urbano atingido.

**Figura 9** - Propagação da onda de inundação



**Fonte:** Autor,2020.

A onda de inundação chega em 40 min até o primeiro adensamento urbano a jusante do barramento.

Na figura 10 é possível observar de forma ampliada que ruas e construções são atingidas pela onda, situação pela qual a barragem já pode ser classificada com um alto dano potencial associado. Importante ressaltar novamente que a base topográfica utilizada nessa simulação tem uma precisão de 30m, entende-se então que essa área atingida pode, na realidade, ser bem maior que a demonstrada na figura.

1840

**Figura 10** - Adensamento urbano atingido pela onda de inundação



**Fonte:** Autor, 2020.

A onda de inundação continua, e embora com menos força atinge outros adensamentos urbanos ao longo do seu caminho.

O rompimento foi simulado em um dia sem chuva e danos significativos foram observados. Entende-se que em ocasiões em que há a ocorrência de chuvas excepcionais os riscos e danos serão maiores.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma análise expedita da ruptura de uma barragem, foi possível demonstrar a planície de inundação e os danos que poderiam ser gerados. Assim como o entendimento de que as ferramentas de hidrodinâmica juntamente com toda a legislação referente a segurança de barragens devem ser aplicadas em barragens de todos os tipos, independentemente de seu porte ou finalidade.

É de grande valor ressaltar que dada a importância da utilização de estudos de modelagens hidrodinâmicas para previsões, estimativas e definições de ações emergenciais a serem tomadas, tem-se a necessidade de que estes sejam feitos com a melhor precisão possível. Quanto mais precisos os MDTs forem, mais confiáveis serão os resultados no mapeamento das regiões potencialmente inundadas. A disponibilidade de MDTs com alta precisão deve ser pública, afim de garantir melhores análises e com isso, planos de prevenções mais eficazes.

A problemática em torno de acidentes em barragens vem sendo cada vez mais analisada, fato que foi possível observar com base no estudo das leis e recomendações emitidas sobre o assunto, estas estão em números cada vez maiores conforme os anos.

As adequações e reformulações de leis e normas estão sendo mais diretas e precisas conforme o aumento dos estudos feitos, assim como a adequação dos empreendedores às novas regras. A maior visibilidade adquirida após as últimas tragédias é um dos grandes motivos para o crescimento desses estudos. Para que essas situações não se repitam, a tendência é que os estudos, criações e formatações de leis e normas continuem a avançar, garantindo cada vez mais a segurança.

## REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. Lei nº 14066, 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 União, Brasília, DF, set. 2020.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos Estabilidade de Taludes. - NBR 13.028, Rio de Janeiro, 2018.

[3] AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Relatório de Segurança de Barragens 2017: relatório técnico. Brasília, 2019.

[4] AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Relatório de Segurança de Barragens 2018: relatório técnico. Brasília, 2019

[5] BRASIL. Resolução ANA n. 236, de 30 de jan. de 2017. Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 fev. 2017. p. 34

[6] COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

[7] SANTOS, L. F.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. A. G. M. Simulação do Rompimento Hipotético da Barragem de Juturnaíba, Localizada no Estado do Rio de Janeiro, 2019. Anuário do Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

1842

[8] HORA, M. A. G. M.; GUIMARÃES, R. B.; NETA, Z. F. L. Barragens Órfãs: Estudo de Caso da Barragem de Juturnaíba, Localizada no Estado do Rio de Janeiro, 2019. Anuário do Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

[9] CARVALHO, D. Barragens: Uma introdução a graduandos. Apostila do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2011.

[10] AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Diretrizes Para a Construção de Barragens: Manual do empreendedor sobre Segurança de Barragens. Brasília, 2016.

[11] MOTA, K. R. R. Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2017.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Estabilidade de Taludes. - NBR 11.682, Rio de Janeiro, 1991.