

Análise de ruptura hipotética para barragens em cascata

Dam break analysis for cascade dams

Análisis de fallas hipotéticas para presas en cascada

Milena Cristina de Paula Carvalho¹, Luís Gustavo Vilela Silva¹, Eduardo Souza Cândido¹, Luisa de Moura Leão¹, Fátima Resende Luiz Fia¹, André Geraldo Cornélio Ribeiro¹

¹Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

Introdução: As barragens sempre tiveram grande importância no desenvolvimento das civilizações. Entretanto, apesar dos benefícios proporcionados, o rompimento de tais estruturas pode gerar consequências catastróficas. Diante desse cenário, surge a importância do estudo de ruptura hipotética, que avalia os potenciais impactos gerados pela ruptura de uma barragem.

Objetivo: Este artigo tem como objetivo elaborar um estudo de ruptura hipotética para duas barragens de terra para armazenamento de água dispostas em cascata, e delimitar a Zona de Autossalvamento a partir do mapa de inundação gerado.

Métodos: O hidrograma de ruptura foi criado a partir do software HEC-HMS e a envoltória de inundação foi gerada a partir do software HEC-RAS, baseada no modelo digital de elevação Alos Palsar, com resolução de 12,5 m. A Zona de Autossalvamento foi delimitada de acordo com a Lei nº 23.291/2019.

Resultados: A vazão máxima obtida para o cenário simulado foi de 15,7 m³/s. A envoltória de inundação abrangeu parte do Condomínio C, um trecho da Avenida L e as residências situadas à margem deste trecho.

Conclusão: Concluiu-se que, apesar de não atingir uma grande área, a onda de inundação abrange pontos de infraestrutura e residências familiares, impactando aproximadamente 50 pessoas, tendo capacidade para danificar veículos e apresentando perigo para crianças e idosos.

Palavras-chave: Geotecnia Ambiental; Envoltória de Inundação; PAE; Simulação; ZAS.

ABSTRACT

Introduction: Dams have always had great importance in the development of civilizations. However, despite the benefits provided, the disruption of such structures can have catastrophic consequences. Given this scenario, the importance of the study of hypothetical failure arises, which evaluates the potential impacts generated by the rupture of a dam.

Objective: This article aims to elaborate a dam break analysis for two earth dams for water storage arranged in cascade, and to delimit the Self-Rescue Zone from the generated flood map.

Methods: The rupture hydrograph was created using the HEC-HMS software. The flood envelope was generated using the HEC-RAS software, based on the Alos Palsar digital elevation model, with a resolution of 12.5 m. The Self-Rescue Zone was delimited in accordance with Law No. 23,291/2019.

Results: The maximum flow obtained for the simulated scenario was 15,7 m³/s. The flood envelope covers part of Condominium C, a section of Avenue L and the residences located on the margin of this section.

Conclusion: It was concluded that, despite not reaching a large area, the flood wave covers infrastructure points and family homes, impacting approximately 50 people, having the capacity to damage vehicles and presenting a danger to children and the elderly.

Keywords: Environmental Geotechnics; Flood Envelope; PAE; Simulation; ZAS.

Correspondência:

Milena Cristina de Paula
Carvalho
Universidade Federal de
Lavras, Lavras, Minas
Gerais, Brasil.
Email:
milnacpc@hotmail.com

RESUMEN

Introducción: Las represas siempre han tenido una gran importancia en el desarrollo de las civilizaciones. Sin embargo, a pesar de los beneficios proporcionados, la interrupción de tales estructuras puede tener consecuencias catastróficas. Ante este escenario, surge la importancia del estudio de falla hipotética, que evalúa los impactos potenciales que genera la ruptura de una presa.

Objetivo: Este artículo tiene como objetivo elaborar un estudio hipotético de falla para dos presas de tierra para almacenamiento de agua dispuestas en cascada, y delimitar la Zona de Auto-Salvamento a partir del mapa de inundación generado.

Métodos: El hidrograma de ruptura se creó mediante el software HEC-HMS y la envolvente de inundación se generó mediante el software HEC-RAS, basado en el modelo digital de elevación de Alos Palsar, con una resolución de 12,5 m. La Zona de Autorescate fue delimitada de conformidad con la Ley N° 23.291/2019.

Resultados: El caudal máximo obtenido para el escenario simulado fue de 15,7 m³/s. La envolvente contra inundaciones cubre parte del Condominio C, un tramo de la Avenida L y las residencias ubicadas en los márgenes de este tramo.

Conclusión: Se concluyó que, a pesar de no alcanzar una gran extensión, la ola de inundación cubre puntos de infraestructura y viviendas familiares, impactando aproximadamente a 50 personas, teniendo capacidad para dañar vehículos y presentando un peligro para niños y ancianos.

Palabras-clave: Geotecnia Ambiental; sobre de inundación; PAE; Simulación; ZAS.

INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA) (2021), uma barragem é uma estrutura construída em um curso de água permanente ou temporário, seja no próprio leito ou em cava exaurida com dique, com o propósito de conter ou acumular substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos. Elas variam em tamanho e tipo, desde pequenas represas locais até imponentes estruturas multifuncionais.

Segundo Romanini (2020), as barragens podem ser categorizadas pelo material de construção em dois tipos principais: barragens de concreto e barragens de aterro. Dentro deste último grupo, encontram-se as barragens de terra, as barragens de terra/enrocamento e as barragens de enrocamento, sendo as barragens de terra as mais prevalentes no Brasil.

Apesar de sua importância e dos benefícios proporcionados, o rompimento de uma barragem pode acarretar consequências catastróficas para o meio ambiente e suas populações, resultando em perdas e danos irreversíveis. Nesse contexto, destaca-se a necessidade crítica da análise de ruptura de barragens, conhecida como "*Dam Break*", que avalia os impactos potenciais de um rompimento. Essa análise permite simular diferentes cenários de ruptura, calcular a área inundada e estimar a população afetada.

Os estudos de ruptura de barragens são essenciais para a elaboração de Planos de Ações Emergenciais (PAE), um dos componentes obrigatórios do Plano de Segurança de Barragens (PSB), conforme exigido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), para todas as barragens classificadas como de alto risco ou com alto ou médio potencial de dano.

Embora haja extensa pesquisa sobre a análise de ruptura para barragens de mineração (RODRIGUES; NASCIMENTO, 2020; LIMA et al., 2021) e barragens convencionais de armazenamento de água (KHALKHO et al., 2020; BHARATH et al., 2021; ROSSI et al., 2021), há uma lacuna significativa no estudo das barragens de terra para armazenamento de água em cascata.

Portanto, este artigo tem como objetivo realizar uma análise de ruptura hipotética e delimitar a Zona de Autossalvamento (ZAS) para duas barragens de terra em cascata, além de classificar o risco hidrodinâmico em pontos de interesse.

SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL

A segurança de uma barragem visa assegurar sua integridade estrutural e operacional, reduzindo ao mínimo o risco de incidentes ou acidentes, garantindo que ela cumpra sua função e proteja a vida, saúde, propriedade e meio ambiente. Uma barragem segura requer cuidados contínuos, envolvendo uma concepção sólida, um projeto bem elaborado, uma construção que siga padrões de engenharia adequados, além das fases subsequentes como o primeiro enchimento, manutenção, operação e eventual desativação. O empreendedor é o responsável pela segurança da barragem (ANA, 2021).

No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) orienta empreendedores e fiscais nesse contexto. Entre os instrumentos estabelecidos pela PNSB, destacam-se o cadastro das estruturas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), a classificação das barragens e o Plano de Ação de Emergência (PAE), integrante do Plano de Segurança de Barragens (PSB).

POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (PNSB)

Em 20 de setembro de 2010, foi sancionada a Lei nº 12.334, estabelecendo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que abrange estruturas destinadas à acumulação de água para diversos usos, disposição de rejeitos temporária ou final, e acumulação de resíduos industriais; além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A PNSB tem como objetivos principais prevenir e reduzir a possibilidade de acidentes envolvendo barragens, regulamentar a segurança em todas as fases dessas estruturas, monitorá-las e promover uma cultura de segurança e gestão de riscos.

A aplicação da PNSB se estende a barragens que apresentem pelo menos uma das seguintes características: altura do maciço igual ou superior a 15 metros, capacidade total do reservatório igual

ou superior a 3.000.000m³, reservatório contendo resíduos perigosos conforme normas técnicas, categoria de Dano Potencial Associado (DPA) médio ou alto, e categoria de risco (CRI) alto conforme avaliação do órgão fiscalizador.

Além da legislação nacional, o estado de Minas Gerais instituiu a Lei nº 23.291, em 25 de fevereiro de 2019, estabelecendo a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB), que impõe critérios mais rigorosos para as barragens que se enquadram em sua jurisdição.

CADASTRO DE BARRAGENS JUNTO AO SNISB

Conforme estabelecido na Lei nº 14.066/2020, o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) é responsável pelo registro informatizado das condições de segurança das barragens em todo o território nacional. Isso inclui o sistema completo de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações, abrangendo barragens em diferentes estágios: construção, operação e desativação. Além disso, o SNISB deve manter registros detalhados de incidentes, acidentes e desastres que possam representar riscos para a segurança das barragens.

CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS

De acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), as barragens são classificadas com base em três critérios principais: categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e volume, conforme estabelecido pela Resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), datada de 10 de julho de 2012.

A CRI, conforme definido na Lei nº 14.066/2020, é determinada considerando características técnicas, métodos construtivos, estado de conservação, idade do empreendimento e a conformidade com o Plano de Segurança da Barragem, além de outros critérios definidos pelo órgão fiscalizador.

A classificação do DPA da barragem em alto, médio ou baixo é baseada no potencial de perdas de vidas humanas e nos impactos econômicos, sociais e ambientais resultantes de uma ruptura da barragem (BRASIL, 2020). Segundo a Resolução nº 143 (CNRH, 2012), o DPA é definido como o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento da barragem, independentemente da probabilidade de ocorrência, e pode ser graduado de acordo com as consequências para vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais.

Quanto ao volume, para barragens de acumulação de água, considera-se segundo a Resolução nº 143 (CNRH, 2012): (I) pequena, para reservatório com volume inferior a 5 milhões de metros cúbicos; (II) média, para reservatório com volume igual ou superior a 5 milhões de metros cúbicos e igual ou inferior a 75 milhões de metros cúbicos; (III) grande, para reservatório com volume superior a 75 milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a 200 milhões de metros cúbicos; e (IV) muito grande, para reservatório com volume superior a 200 milhões de metros cúbicos.

PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL (PAE)

O Plano de Ação de Emergência (PAE) constitui uma medida não-estrutural essencial para mitigar os riscos associados às barragens. Ele é elaborado antes de uma emergência decorrente de uma possível inundação, visando preparar o vale para enfrentar os riscos impostos pela barragem. Conforme Balbi (2008), o PAE é composto por cinco componentes principais: detecção, tomada de decisões, notificação, alerta/aviso e evacuação.

Vianna (2015) destaca que o PAE é um pilar fundamental da gestão de riscos, estabelecendo um conjunto de ações para responder eficazmente a situações críticas, prevenindo acidentes ou minimizando suas consequências.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) torna obrigatória a implementação do PAE como parte integrante do Plano de Segurança de Barragens (PSB) para todas as barragens classificadas como de alto risco, com Dano Potencial Associado (DPA) médio ou alto, ou que acumulem rejeitos de mineração.

Conforme a PNSB, o PAE deve definir as ações a serem executadas pelo empreendedor em caso

de emergência, identificar os responsáveis pela notificação de ocorrências, descrever as instalações da barragem e potenciais cenários de emergência, além de estabelecer procedimentos para identificação e notificação de problemas operacionais ou condições que possam levar à ruptura da barragem.

ESTUDOS DE DAM BREAK

Conforme estabelecido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a elaboração do estudo de *Dam Break* é um requisito essencial do Plano de Segurança de Barragens (PSB). Segundo Rossi et al. (2021), esses estudos permitem estimar parâmetros cruciais do impacto do rompimento, como cotas alcançadas e velocidades da onda resultante da ruptura em locais estratégicos. De acordo com Tercini et al. (2020), o estudo de *Dam Break* pode ser conduzido utilizando *softwares* especializados ou baseando-se em teorias e estudos de casos de rupturas de outras barragens. Esse estudo determina a abertura da brecha de ruptura conforme o material de construção, calcula o tempo e a vazão de ruptura com base nas características técnicas, e gera um hidrograma para prever a propagação das ondas de inundação.

CENÁRIOS DE RUPTURA

Segundo o Guia de Orientação e Formulários do PAE (ANA, 2016), é recomendado reduzir ao mínimo necessário o número de cenários considerados, com foco na segurança adequada para diferentes tipos de barragens. Devem ser definidos dois tipos principais de cenários: (i) cenário de operação hidráulica extrema, que, sem levar à ruptura, pode resultar em descargas significativas e colocar em risco pessoas e propriedades no vale a jusante; e (ii) cenário de ruptura (com ruptura seguida de transbordamento, erosão interna, etc.).

De acordo com a ANA (2020), o primeiro tipo é típico de acidentes e ocorre devido à abertura rápida e simultânea de todas as comportas para barragens com vertedouros equipados, ou à ocorrência da cheia de projeto para barragens com vertedouros sem comportas. Por outro lado, o cenário de ruptura deve ser submetido a uma classificação rigorosa que inclui tanto o cenário de ruptura mais provável quanto o cenário de ruptura mais desfavorável ou extremo, conforme também mencionado pela ANA (2016).

Segundo Rossi et al. (2021), o cenário de ruptura mais provável deve ser determinado com base nas características específicas da barragem e nas potenciais causas de ruptura. Caso estas causas não sejam claras, o cenário mais extremo deve ser adotado para simular as condições mais adversas possíveis. O autor destaca que o cenário de ruptura mais provável pode ser subdividido em falhas por mecanismos estruturais (ruptura em condições normais do reservatório) e ruptura por mecanismo hidráulico (com o reservatório ao menos no nível máximo maximorum).

De acordo com o Guia de Orientação e Formulários do PAE (ANA, 2016), o cenário mais extremo envolve a ruptura total e rápida do barramento, agravando a simulação ao maximizar todos os parâmetros da brecha e as vazões que chegam à barragem, visando calcular a pior cheia induzida possível e registrar os níveis máximos no reservatório.

FORMAÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA

Uma brecha é definida por três parâmetros essenciais: sua configuração geométrica, dimensões (largura e altura), e o tempo necessário para se formar. Esses fatores, em conjunto, influenciam as vazões, níveis de água e tempos de chegada das ondas de inundação em diferentes áreas da zona inundada, afetando os intervalos disponíveis para implementação do plano de emergência (ANA, 2016).

Segundo a ANA (2016), o desenvolvimento da brecha em barragens de concreto em arco é rápido e geralmente abrange toda a estrutura da barragem, enquanto em barragens de aterro, a ruptura é mais lenta e parcial, assumindo formato trapezoidal com altura aproximadamente igual à altura da barragem.

A formação da brecha varia conforme o tipo e o material da barragem, o mecanismo de ruptura,

as características do reservatório, entre outros fatores. As Figuras 1 e 2 ilustram o processo de evolução da brecha de acordo com diferentes mecanismos de ruptura.

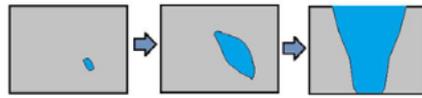


Figura 01: Formação da brecha por *piping*.

Fonte: Faria et. al. (2019).

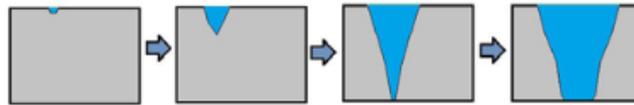


Figura 02: Formação da brecha por galgamento.

Fonte: Faria et. al. (2019).

O Quadro 1 mostra os valores característicos dos parâmetros da brecha para cada tipo de barramento. Conforme Mascarenhas (1990) e Ladeira (2007), a brecha resultante de *piping* apresenta uma angulação mais fechada, devido à erosão interna que avança de jusante para montante, com escoamento preferencial (entubamento). Por outro lado, a brecha causada por galgamento, segundo Collischonn (1997), é mais aberta, pois a erosão começa no ponto mais fraco da crista da barragem.

Quadro 1 - Valores característicos da brecha de ruptura

Tipo de Barragem	Largura média da brecha (B_{bre})	Inclinação das paredes da brecha (Z)	Tempo de ruptura [h]
Concreto em arco	Toda a crista ou $B_{bre} \geq 0,8B_{barr}$	$0 \leq Z \leq \text{Inclinação do vale}$	$t_{rup} \leq 0,1$
Concreto gravidade	Múltiplos trechos, usualmente $B_{bre} \leq 0,5B_{barr}$	$Z = 0$	$0,1 \leq t_{rup} \leq 0,3$
Terra/Enrocamento	$B_{bre} \leq 5H_{barr}$	$1/4 \leq Z \leq 1$	$0,5 \leq t_{rup} \leq 3$
Estéreis de minas	$B_{bre} \leq 0,8H_{barr}$	$1 \leq Z \leq 2$	$0,1 \leq t_{rup} \leq 0,3$

Fonte: ANA (2016).

Nos quais: B_{barr} é a largura da barragem e H_{barr} é a altura da barragem, ambos em metros.

Especificamente para a largura da brecha, foram desenvolvidos diversos critérios de cálculo. Dentre esses, destaca-se o de Froehlich (2016).

$$\underline{B_{bre}} = 15k_0V_w^{0,32}H^{0,19} \quad (1)$$

nos quais: V_w é o volume de água no reservatório no momento da ruptura (em 1000 m³); H é a altura final da brecha (em m); k_0 é 1,4, para galgamento e 1,0 para *piping*.

Quanto ao tempo de formação da brecha, destaca-se o critério de cálculo de Xu e Zhang (2009), apresentado na Equação 2.

$$t_f = 0,304 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0,707} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{1,228} e^{b_3+b_4+b_5} \quad (2)$$

nos quais: H_w é a altura de água acima do fundo da brecha (em m); H_d é a altura da barragem (em m); H_r é a variável de controle utilizada na regressão; V_w é o volume do reservatório (em 1000 m³); $b_3=0,189$ para barragens homogêneas ou zonadas; $b_3=-0,327$ para barragens de enrocamento; $b_3=-0,674$ para barragens de concreto; $b_4= -0,579$ para rompimento por galgamento; $b_4=-0,611$ para rompimento por *piping*; $b_5= -1,205$ para solo de alta erodibilidade; $b_5= -0,564$ para solo de média erodibilidade; $b_5= 0,579$ para solo de baixa erodibilidade.

Já referente à inclinação das paredes da brecha, Froehlich (2016) estabelece que esta é de 1H:1V nos casos de rompimento por galgamento e de 0,7H:1V nos casos de rompimento por *piping*.

VAZÃO DE PICO

A vazão de pico que ocorre durante o rompimento de barragens pode ser determinada com base nas características geométricas da brecha e no tempo de sua formação, assim como nas características específicas da barragem e do reservatório (FERLA, 2018).

HIDROGRAMA DE RUPTURA

De acordo com Campos (2020), os hidrogramas de ruptura são diretamente influenciados pelo volume e pelo tipo de material armazenado nos reservatórios das barragens, assim como pelo tempo e pela forma de sua liberação. Essa afirmação complementa o que foi exposto por Faria et al. (2019), que consideram a geometria e o tempo de abertura da brecha como parâmetros fundamentais na estimativa do hidrograma de ruptura.

Quanto ao amortecimento do hidrograma, Ferla (2018) explica que ele ocorre devido às características topográficas do vale a jusante e às interações dinâmicas do escoamento. A autora ainda destaca a importância de determinar o hidrograma como um elemento necessário para a simulação do evento de ruptura e para a elaboração do mapa de inundação a jusante.

MAPA DE INUNDAÇÃO

De acordo com a ANA (2022), o mapa de inundação é o resultado de um estudo que delimita geograficamente as áreas potencialmente afetadas por eventos extremos, como vazamentos ou rupturas parciais ou totais de barragens, e seus possíveis cenários associados. Esse mapa tem como objetivo facilitar a notificação eficiente e a evacuação das áreas afetadas. Deve conter informações sobre o instante de chegada da frente e do pico da onda de inundação, os níveis máximos atingidos em termos de cota e altura da onda, a velocidade máxima, a vazão máxima e o tempo de duração da fase crítica da inundação.

Complementando o PESB, o Ofício Circular 02-2019 GMG/CEDEC, publicado em 26 de junho de 2019, e o Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) *Dam Break*, publicado em 07 de janeiro de 2020 pelo Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MPMG), estabelece orientações para o estudo de ruptura hipotética de barragens. Entre as diretrizes, destaca-se que a propagação da onda deve ser modelada em um sistema bidimensional.

MÉTODOS

Neste tópico estão detalhadas, da escolha do cenário mais factível à delimitação da ZAS, todas as etapas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa.

ÁREA DE ESTUDO

Neste tópico, serão apresentados dados referentes a duas barragens de terra para armazenamento de água dispostas em cascata, objetos deste estudo de caso. Todas as informações foram retiradas do banco de dados disponibilizado pela instituição proprietária das barragens. No entanto, por motivos de segurança da informação, as referências não serão divulgadas neste documento, e serão utilizados pseudônimos. Portanto, os nomes das estruturas originais serão alterados para Barragem A, situada à montante, e Barragem B, situada à jusante. A instituição responsável será denominada Instituição F, o condomínio residencial localizado à jusante das barragens será chamado de Condomínio C, e a avenida situada à jusante da Barragem B será denominada Avenida L.

Ambas as barragens são de terra homogênea com fundação em rocha sã e foram construídas entre as décadas de 1980 e 1990. A Barragem A possui um extravasor de terra escavada, que atualmente não se encontra em boas condições de manutenção, enquanto a Barragem B possui um monge como estrutura de descarga de fundo.

O Quadro 2 apresenta os dados referentes à altura das barragens e ao volume dos reservatórios.

Quadro 2 - Dados das barragens

Barragens	A	B
Altura máxima do maciço acima da base da fundação (m)	6	5
Volume total do reservatório (m ³)	7943,77	5185,48
Largura da crista (m)	10	10

Fonte: Dos autores

À jusante da barragem A, na outra margem da Avenida L, ainda existe uma terceira barragem em cascata. Este barramento não é de propriedade da Instituição F, portanto, para ele não será realizado o estudo de *Dam Break*.

SOFTWARES UTILIZADOS

Optou-se pelo uso do *software* HEC-RAS, versão 6.3.1, para simular um rompimento hipotético das estruturas. A extensão RASMapper foi utilizada para a criação do terreno e a vetorização dos elementos de estudo. Além disso, o *software* HEC-HMS, versão 4.10, foi empregado para a simulação da brecha e a geração do hidrograma de ruptura hipotética.

CENÁRIO DE RUPTURA

Considerando que as barragens estão dispostas em cascata, a barragem localizada no vale a jusante será diretamente impactada pela onda de ruptura hipotética da barragem situada a montante. Diversos cenários podem ser simulados, incluindo galgamento, *piping*, instabilização da fundação do maciço ou liquefação, seja estática ou dinâmica. Além disso, a ruptura hipotética pode ser analisada em condições de cheia (*rainy day*) ou em condições normais (*sunny day*).

Para o estudo em questão, simulou-se o rompimento hipotético em um dia de sol (*piping*) para a barragem a montante (Barragem A), o que resultaria no rompimento hipotético por galgamento da Barragem B, com ambas as barragens operando em sua capacidade total de armazenamento.

DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA BRECHA

A geometria da brecha foi calculada conforme os critérios de Froehlich (2016), utilizando a Equação 1 para determinar a largura média. Para o tempo de formação da brecha, foi adotado o critério de Xu e Zhang (2009) (Equação 2). Ambos os autores apresentaram os melhores resultados em relação aos parâmetros para os quais seus critérios foram aplicados, justificando a escolha dos métodos.

Para a aplicação desses métodos, foram consideradas as seguintes premissas iniciais: (i) a altura final da brecha é igual à altura total do barramento, 6 metros; (ii) o volume de água no reservatório é igual à capacidade total com borda livre de 1 metro, sendo o volume da Barragem A igual a 5.185,48 m³, o volume da Barragem B igual a 7.943,77 m³, e o volume propagado de 13.129,25 m³; e (iii) *piping* para a barragem a montante e galgamento para a barragem a jusante.

HIDROGRAMA DE RUPTURA

O hidrograma de ruptura foi gerado utilizando o *software* HEC-HMS, considerando um dia seco (*sunny day*). Como se trata de uma ruptura hipotética em cascata, foi gerado apenas um hidrograma para o conjunto de barragens, simplificando assim as condições de entrada no *software* HEC-RAS, responsável pelo modelo numérico do escoamento. Dessa forma, foi adotado um único *inflow*, situado no talude da barragem a jusante, considerando o volume total das duas barragens.

BASE TOPOGRÁFICA DO TERRENO

Neste artigo, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR, disponibilizado pela *Alaska Satellite Facility* (ASF), que possui resolução de 12,5 metros. O MDE passou por uma interpolação no *software* ArcGIS 10.8® para obter uma resolução de 1,0 metro, resultando em uma maior suavização das imagens do terreno. Após a interpolação, o MDE foi importado para a extensão

RASMapper e georreferenciado de acordo com a zona UTM 23S do sistema geodésico SIRGAS 2000. A partir do MDE, gerou-se o terreno utilizado na simulação.

GEOMETRIA DA SIMULAÇÃO

Para a simulação bidimensional são necessários ao menos uma malha de fluxo e as linhas de condição de contorno. Logo, na extensão RASMapper, criou-se uma malha alargada junto ao talude da primeira barragem, onde foi colocada uma linha de condição de contorno interna, configurada com o hidrograma de ruptura de ambas as barragens. A malha se estendeu por 10 km no sentido da declividade do terreno. Externa à área delimitada, na região mais baixa da geometria, foi colocada uma segunda linha de condição de contorno, a qual é condicionada pela declividade natural do terreno.

CONDIÇÕES DE CONTORNO E ESCOAMENTO

Para a simulação do escoamento no *software* HEC-RAS são necessárias algumas condições de contorno, tais como hidrograma de ruptura, declividade do terreno, entre outros. É importante ressaltar que a simulação foi realizada em regime não permanente, uma vez que a velocidade do escoamento em cada ponto varia com o tempo, de acordo com o hidrograma. Como citado anteriormente, como condição de inflow foi utilizado o hidrograma de ruptura. Para o outflow utilizou-se a declividade do terreno, medida com a ferramenta "régua" da extensão RASMapper.

Definiu-se o intervalo de simulação de 3 (três) horas, iniciando o rompimento às 00:00 do dia 8 de setembro de 2022 e finalizando a simulação às 3:00 do mesmo dia. Também foram definidos os intervalos de computação, de geração do hidrograma, do mapa e do detalhamento dos resultados.

Para garantir a confiabilidade dos resultados foi utilizado o número de Courant, dado pela Equação 3, tal parâmetro, segundo Fabiani (1995), fornece uma relação entre os intervalos de espaço e de tempo para garantir que o modelo seja estável e representa a relação entre as celeridades de propagação na solução analítica e na solução numérica. De acordo com o mesmo autor, para garantir a estabilidade nos métodos explícitos esse número deve ser menor ou igual a 1.

$$C_r = \frac{|u| \times \Delta t}{\Delta x} \quad (3)$$

Nos quais: $|u|$ é a magnitude da velocidade da onda de inundação no ponto analisado (em m/s); Δt é o intervalo de tempo adotado para cálculo (em s); Δx é o comprimento da face da célula adotada na simulação (em m).

Após a simulação, prosseguiu-se à análise dos mapas e delimitação da ZAS e ZSS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo o modelo de Froehlich (2016) para obtenção da geometria da brecha, a equação de Xu e Zhang (2009) para determinação do tempo de formação da brecha e considerando todo o volume das duas barragens apenas na barragem de jusante (Barragem B), pode-se obter o hidrograma de ruptura como mostrado na Figura 3. Como resultado da simulação no HEC-RAS obteve-se o mapa de inundação gerado pelo rompimento de ambas as barragens, conforme as Figuras 4 a 6. As imagens foram trabalhadas utilizando-se o *software* ArcGis® para uma melhor visualização dos dados.

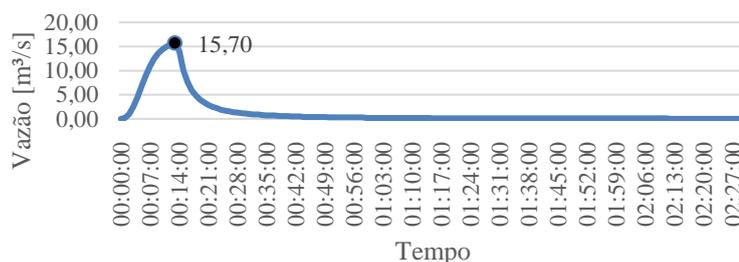


Figura 03: Hidrograma de ruptura hipotética.

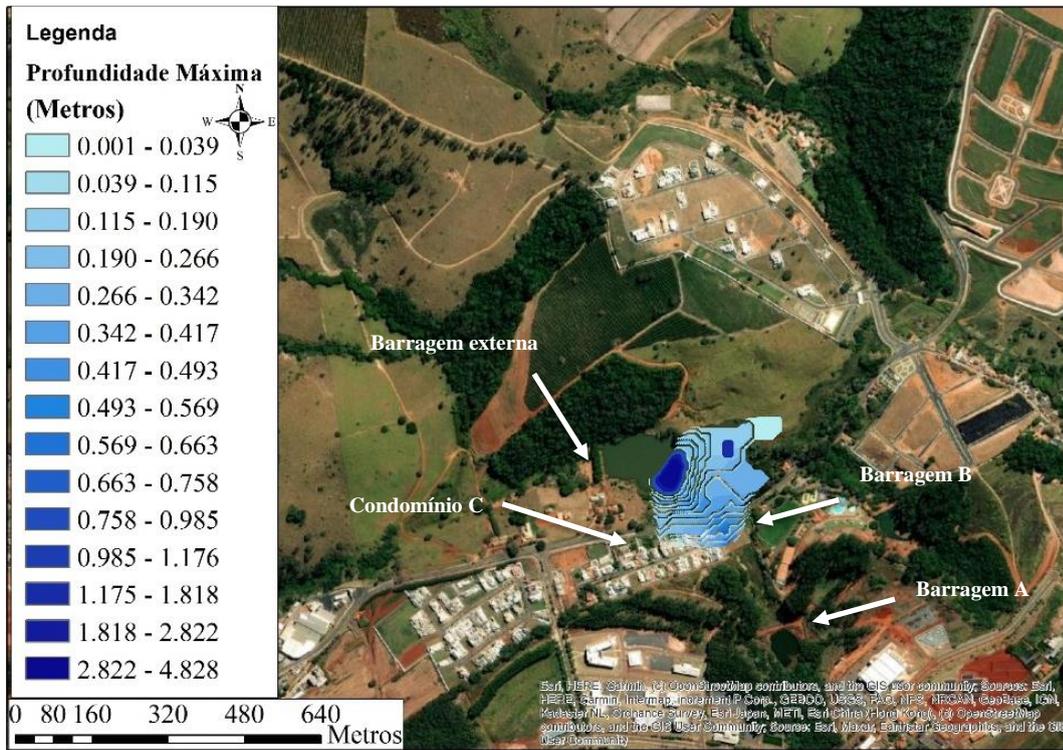


Figura 04: Envoltória de inundação - Profundidade

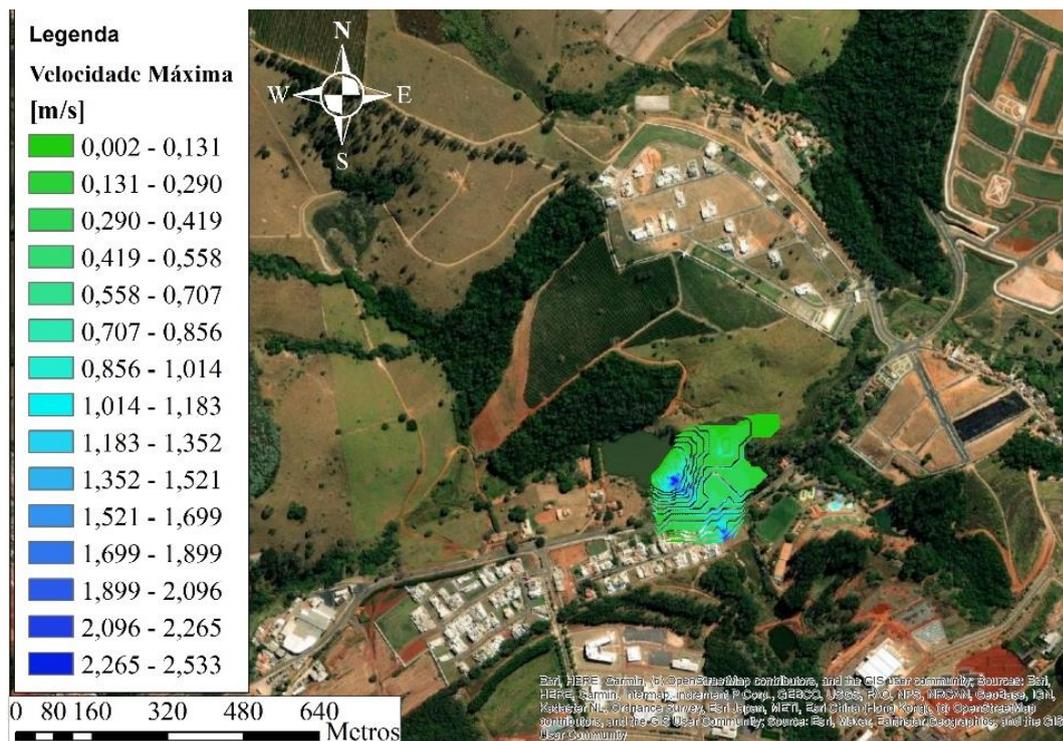


Figura 05: Envoltória de inundação - Velocidade

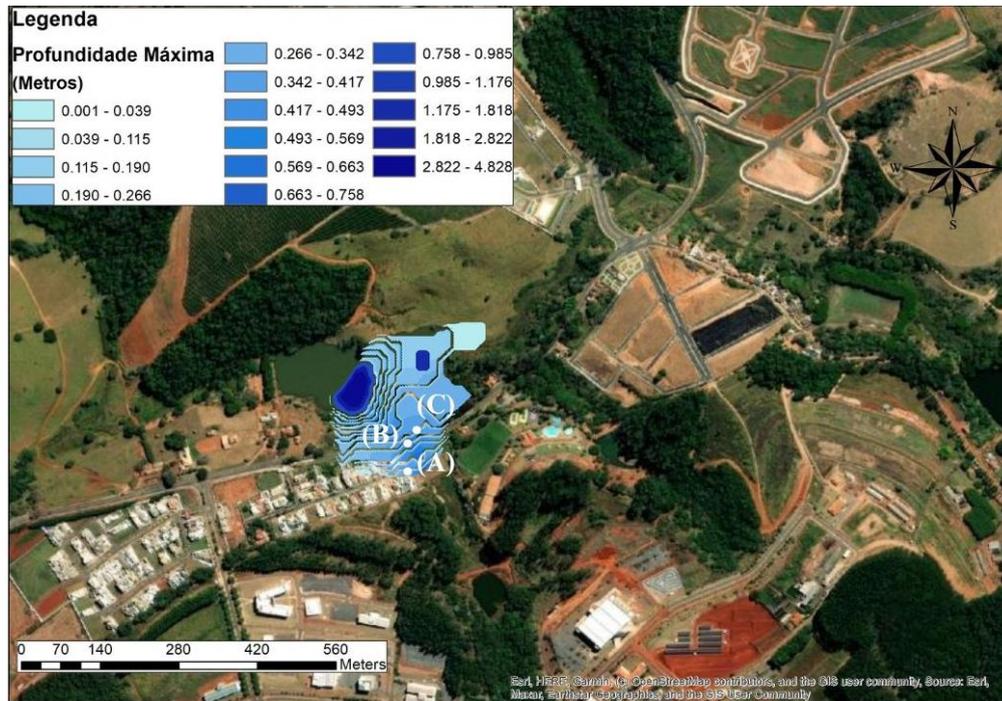


Figura 07: Pontos analisados

Em cada ponto, foram tomados parâmetros importantes à análise da inundação, tais como altura máxima que a água atinge, velocidade com que a onda de inundação chega e tempo de chegada da onda.

Os dados aferidos em cada ponto podem ser visualizados no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros para análise da inundação.

Pontos	Altura máxima (m)	Velocidade (m/s)	Tempo de chegada (min)
A	0,11	0,52	5
B	0,33	1,05	6
C	0,50	0,47	7

Fonte: Dos autores (2022).

A partir dos dados obtidos pode-se realizar uma análise quanto ao risco hidrodinâmico (RH), o qual é calculado pela Equação 4 e mede os danos que a onda de cheia pode causar, de acordo com os intervalos apresentados no Quadro 4.

$$RH = V \times H \tag{4}$$

Nos quais: V é a velocidade da onda (em m/s); e H é a altura da onda (em m).

Quadro 4 - Danos associados ao risco hidrodinâmico

Classificação	Danos	Critério de classificação
H1	Normalmente (não se tratando de exceções) área segura para veículos, pessoas e benfeitorias.	$V < 2,0$ m/s; $H < 0,3$ m; $(H \times V) \leq 0,3$ m ² /s
H2	Veículos pequenos (exceto SUV e afins) sujeito a dano.	$V < 2,0$ m/s; $H < 0,5$ m; $(H \times V) \leq 0,6$ m ² /s
H3	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para crianças e idosos.	$V < 2,0$ m/s; $H < 1,2$ m; $(H \times V) \leq 0,6$ m ² /s
H4	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas.	$V < 2,0$ m/s; $H < 2,0$ m; $(H \times V) \leq 1,0$ m ² /s

H5	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas. Todas as benfeitorias estão sujeitas a danos estruturais e benfeitorias com estruturas menos reforçadas* estão sujeitas a dano total.	$V < 4,0 \text{ m/s};$ $H < 4,0 \text{ m};$ $(H \times V) \leq 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$
H6	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas. Todas as benfeitorias estão sujeitas a dano total.	$(H \times V) > 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$

*benfeitorias que não foram dimensionadas para suportar os seguintes esforços (forças hidrostáticas, empuxo, forças hidrodinâmicas, impulso, impactos de sólidos).

Fonte: Adaptado de Smith et. al (2014).

Uma vez calculado tal parâmetro para os pontos analisados (Quadro 5), pode-se observar que a situação mais crítica quanto ao risco hidrodinâmico se encontra no ponto B, o qual possui maior velocidade máxima observada, onde veículos pequenos estão sujeitos a dano.

Quadro 5 - Risco hidrodinâmico calculado

Ponto analisado	Risco Hidrodinâmico (m^2/s)
A	0,0572
B	0,3465
C	0,2350

Fonte: Dos autores (2022).

Apesar de o ponto C não obter o maior valor quanto ao risco hidrodinâmico, é o ponto que possui maior inundação estática (H) e, de acordo com o critério de classificação de Smith et al. (2014), ele se enquadra na classificação H3, a qual indica que todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e há perigo para crianças e idosos.

De acordo com Viseu (1998), que estabeleceu critérios para graduação do risco em função da profundidade e da velocidade para seres humanos e para edificações (Quadros 6 e 7), pode-se perceber que apesar de ser o ponto mais crítico, o ponto B, assim como os demais, se enquadram no nível reduzido de risco (classe verde), tanto para seres humanos quanto para edificações.

Quadro 6 - Nível de perigo para seres humanos

Nível	Classe	Inundação Estática – H (m)	Inundação Dinâmica – H x V (m^2/s)
Reduzido	Verde	< 1	< 0,5
Médio	Amarelo	1 – 3	0,5 – 0,75
Importante	Laranja	3 – 6	0,75 – 1,0
Muito importante	Vermelho	> 6	> 1,0

Fonte: Adaptado de Viseu (1998).

Quadro 7 - Nível de perigo para edificações

Nível	Classe	Inundação Estática – H (m)	Inundação Dinâmica – H x V (m^2/s)
Reduzido	Verde	< 3	< 2
Médio	Amarelo	3 – 5	2 – 4
Importante	Laranja	5 – 7	4 – 5,5
Muito importante	Vermelho	> 7	> 5,5

Fonte: Adaptado de Viseu (1998).

Outra questão a ser analisada refere-se às pessoas que podem ser impactadas com a inundação ocasionada pela ruptura hipotética. Pode-se analisar nos mapas resultantes do estudo que a envoltória de inundação afeta em torno de 16 edificações, das quais 8 situam-se no Condomínio C, e 8, às margens da Avenida L. As edificações se tratam de residências e são predominantemente de 1 pavimento em alvenaria, podendo ter até 2 pavimentos. De acordo com os dados obtidos pelo Censo de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para cada residência no estado de Minas Gerais vivem aproximadamente 3,2 pessoas, o que resulta em aproximadamente 50 pessoas afetadas pelo rompimento hipotético das barragens A e B.

De posse do mapa de inundação e dos dados obtidos por ele, pode-se definir a ZAS. Como é

possível perceber, a delimitação é função direta do tempo de chegada da onda, que por sua vez depende do tempo de formação da brecha. Aqui cabe salientar que o tempo de formação da brecha de ruptura hipotética utilizado neste trabalho, proposto por Xu e Zhang (2009), se trata de uma equação mais técnica, relacionada à qualidade do maciço e sua erodibilidade, tendendo a retardar o tempo de formação da brecha e conseqüentemente, o tempo de chegada da onda em cada ponto. Porém, como a distância, em relação à barragem, dos pontos em que a onda tem um tempo de chegada de trinta minutos é menor do que dez quilômetros, utiliza-se esta última para a delimitação da ZAS, agindo a favor da segurança e em concordância com a PESB de Minas Gerais.

A ZAS delimitada para a simulação está representada em vermelho na Figura 8.



Figura 08: Delimitação da ZAS

CONCLUSÃO

Neste estudo, realizou-se a análise de ruptura hipotética das barragens A e B, considerando *piping* como modo de falha da primeira, o que ocasiona o galgamento da segunda barragem. Foi considerada ruptura em dia de sol para a elaboração do hidrograma de ruptura e obtenção do mapa de inundação.

Analisando-se a envoltória de inundação, foi possível perceber que a mesma pode vir a impactar aproximadamente 50 pessoas, uma vez que abrange residências do Condomínio C e às margens da Avenida L. Pode-se concluir que apesar de todos os pontos analisados possuírem risco reduzido, a onda de inundação obtida nas análises apresenta a capacidade para danificar veículos e apresenta perigo para crianças e idosos.

A ZAS foi delimitada seguindo o disposto na Lei nº 23.291 (2019), observando a extensão exigida para o estudo em questão, abrangendo uma distância de dez quilômetros. Por fim, conclui-se que para a área de estudo existem duas soluções a serem tomadas: (i) a implementação de medidas de mitigação de riscos e danos associados à situação, bem como a elaboração do PAE para ambas as barragens e a implementação de um sistema de auscultação das estruturas, ou (ii) a descaracterização das barragens, uma vez que estas não são utilizadas para abastecimento e tendo em vista o fato de que a Barragem B já se encontra vazia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE**. Brasília, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2020**. Brasília, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução nº 121, de 9 de maio de 2022**. Altera a Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017. Brasília, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Ruptura de Barragem: manual e vídeo aulas – HEC-RAS 5.0.3**. Brasília, 2018.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti-MG**. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/REPA-7PUFXY>>. Acesso em 28 jan. 2023.

BHARATH, A. *et al.* Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India. **Environmental Challenges**. v. 5, n. 100401, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100401>>. Acesso em 28 jan. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em 28 jan. 2023.

BRASIL. 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). **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 30 de setembro de 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm>. Acesso em: 28 jan. 2023.

CAMPOS, R. **Proposta de uma metodologia para obtenção de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata utilizando modelagem física**. 2020. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/46264>>. Acesso em 28 jan. 2023.

COLLISCHONN, W; TUCCI, C. Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina. **RBRH**. Porto Alegre, v. 2, n. 2, 191-206, 1997. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/56/1fbd11d4bde7bb4c20f7ca506ed74d63_e8d2ce992f2878126a6ec20c894ae44b.pdf>. Acesso em 28 jan. 2023.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**.

Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, 2012.

Coordenadoria Estadual de Defesa Civil (CEDEC). **Ofício Circular nº02, de 26 de junho de 2019**. Belo Horizonte, 2019.

FABIANI, A. L. T. **Contribuição ao estudo das ondas geradas pela ruptura de barragens**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995. Disponível em: <<https://www.periodicos.ufpr.br/handle/1884/74153>>. Acesso em 28 jan. 2023.

FARIA, F. *et al.* Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, p. 31-37, 2019. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/CT/article/view/3246/2614>. Acesso em 28 jan. 2023.

FERLA, Rute. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hidráulicos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/180112>>. Acesso em 28 jan. 2023.

FROEHLICH, D.C. Embankment dam breach parameters revisited. In: INTERNATIONAL WATER RESOURCES ENGINEERING CONFERENCE, 1, 1995, Texas. **Proceedings...** Nova York: ASCE, 1995. p. 887-891. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239964974_Embankment_dam_breach_parameters_revisited. Acesso em 28 jan. 2023.

FROEHLICH, D.C. Enhanced Predictions for Peak Outflow from Breached Embankment Dam. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 11, p. 04016041-1 - 04016041-15. 2016. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000288>>. Acesso em 28 jan. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria nº02, de 26 de fevereiro de 2019**. Dispõe sobre a regulamentação dos artigos 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. Belo Horizonte, 2019.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE – São Simão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/FRPC-78HHUG>>. Acesso em 28 jan. 2023.

LIMA, R.P. *et al.* Assessment of digital terrain models in dam break simulation studies. **Bulletin of Geodetic Sciences**. v. 27, spe, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000100005>>. Acesso em 28 jan. 2023.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens**.

1990. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: <https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000171587&local_base=UFR01>. Acesso em 28 jan. 2023.

MINAS GERAIS. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens. **Diário do Executivo**, Poder Legislativo, Belo Horizonte, MG, de 26 de fevereiro de 2019. Disponível em: <http://agendaambiental.com.br/Portal/Arquivos/iArquivos/LEI%20N%c2%ba%2023.291%20DE%2025%20DE%20FEVEREIRO%20DE%202019_1732.pdf>. Acesso em 28 jan. 2023.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (MPMG). **Ata de reunião – Ref: TAC Dam Break**. Belo Horizonte, 2020.

PAIVA, C. A.; FILHO, J. F. do P. Gestão empresarial de emergências: uma análise dos Planos de Ação Emergencial de barragens de alto dano potencial associadas no município de Ouro Preto/MG. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas (GEPROS)**, Bauru, v. 15, n. 2, p. 111-134, 2020. Disponível em: <<https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/2451/pdf>>. Acesso em 28 jan. 2023.

RODRIGUES, B. O.; NASCIMENTO, N. Análise de Parâmetros em Modelagens de Rupturas de Barragens de Rejeito: Os casos de Mariana e Brumadinho. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 2, 2020, online, **Anais...** Virtual: ABRH, 2020. Disponível em: <<https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=7307>>. Acesso em 28 jan. 2023.

ROMANINI, A. **Introdução ao projeto de barragens de terra**. 1. ed. Sinop: Edição do autor, 2020.

ROSSI, C. *et al.* Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach. **Brazilian Journal of Water Resources**. Porto Alegre, v. 26, n. 02, 1-15, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbrh/a/8BnG3BNbncVgqYG7Sd3hGqF/?format=pdf&lang=en>>. Acesso em 28 jan. 2023.

SMITH, G., DAVEY, E., COX, R. **Flood hazard**: WRL Technical Report 2014/07. Sydney: UNSW, 2014. Disponível em: <<https://knowledge.aidr.org.au/media/2334/wrl-flood-hazard-technical-report-september-2014.pdf>>. Acesso em 28 jan. 2023.

TERCINI, O. T.; ANDRETTA, A. B.; JUNIOR, E. C. Estudos de Dam Break. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 2, 2020, online, **Anais...** Virtual: ABRH, 2020. Disponível em: <<https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=7333>>. Acesso em 28 jan. 2023.

VIANNA, L. F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A52MKQ>>. Acesso em 28 jan. 2023.

VINAY K. *et al.* Dam break analysis and flood inundation mapping using HEC-RAS for piping failure.

International Journal of Chemical Studies. v. 8, n. 5, p. 1989-1992, 2020. Disponível em: <10.22271/chemi.2020.v8.i5aa.10596>. Acesso em 28. jan. 2023.

WISEU, T.; MARTINS, R. Safety Risks of Small Dams. In: BERGA, L. **Dam Safety**. ed. Rotterdam: Balkema, 1998. v. 1, p. 283-288.