



**LUÍS GUSTAVO VILELA SILVA**

**MILENA CRISTINA DE PAULA CARVALHO**

**ANÁLISE DE RUPTURA HIPOTÉTICA PARA BARRAGENS  
EM CASCATA**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LUÍS GUSTAVO VILELA SILVA**

**MILENA CRISTINA DE PAULA CARVALHO**

**ANÁLISE DE RUPTURA HIPOTÉTICA PARA BARRAGENS EM CASCATA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Orientador

Profª. Ma. Luisa de Moura Leão

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LUÍS GUSTAVO VILELA SILVA**

**MILENA CRISTINA DE PAULA CARVALHO**

**ANÁLISE DE RUPTURA HIPOTÉTICA PARA BARRAGENS EM CASCATA**

**DAM BREAK ANALYSIS FOR CASCADE DAMS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 28 de outubro de 2022.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

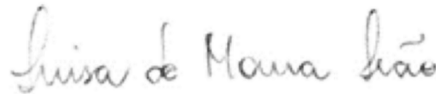
Profa. Ma. Luisa de Moura Leão

Profa. Dra. Fátima Resende Luiz Fia



---

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido  
Orientador



---

Profa. Ma. Luisa de Moura Leão  
Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2022**

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus e à Nossa Senhora, por nos concederem essa graça.

À nossa família que foi suporte e acolhida em todos os momentos, nossos agradecimentos por toda compreensão e por nos possibilitar a chegada até aqui, sem vocês nada seria possível! Obrigado por todas as orações, conselhos e incentivos, amamos vocês.

Ao nosso orientador, Professor Eduardo, sem sua ajuda, compreensão e paciência não conseguiríamos concluir este trabalho. Obrigado por nos apresentar esse horizonte maravilhoso e de infinitas oportunidades que é a geotecnia aplicada a barragens.

À nossa coorientadora Luísa Leão, que pacientemente nos ajudou em todo o processo técnico deste trabalho e que contribuiu de forma fundamental transmitindo seus conhecimentos na área.

Ao pessoal da DQMA e também da PROINFRA, em especial à Fátima Fia, Dyego Maradona Ataíde de Freitas, Gustavo Botelho e Leandro Coelho Naves, que se colocaram à disposição para nos ajudar, cedendo seu tempo e informações cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Jéssica Assaid e aos membros do NEGEO, em especial à Bruna, que não mediram esforços em nos auxiliarem, dando todo o suporte técnico necessário para a manipulação do terreno, indicando ferramentas mais assertivas e contribuindo para o bom êxito dos resultados.

À Giovanna, à Maria do Socorro e ao Matheus, por disponibilizarem seu tempo e seus computadores para que pudéssemos rodar toda a simulação.

Aos nossos colegas e amigos que direta ou indiretamente nos auxiliaram nessa caminhada, em especial à Joice Sthefanie Lourenço Teixeira, Michel Coutinho de Souza, Maria Clara Rodrigues e Lucas Freitas Marques. Vocês tornaram os fardos mais leves e suportáveis com todos os momentos de suporte, auxílio e descontração.

## RESUMO

As barragens sempre tiveram grande importância no desenvolvimento das civilizações. Porém, apesar de toda a sua importância e dos benefícios proporcionados, o rompimento de uma barragem pode gerar consequências catastróficas. A Lei nº 12.334 (2010) criou a Política Nacional de Segurança de Barragens, que estabeleceu normativas para mitigar riscos e nortear a gestão de barragens no Brasil, mas acontecimentos tais como o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana – MG (2015), e também da Barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho – MG (2019), fizeram com que as normas relacionadas a essas estruturas fossem repensadas e enrijecidas com a Lei nº 14.066 (2020). De acordo com a legislação, as barragens devem ser cadastradas junto ao SNISB e classificadas quanto ao risco e ao dano potencial associado, devendo, dentre outras medidas, conter um Plano de Ação Emergencial (PAE) em caso de risco alto ou dano potencial médio ou alto. Diante do disposto, objetiva-se elaborar um estudo de *Dam Break*, o qual é fundamental na elaboração do PAE, para o rompimento hipotético das barragens Condomínio Montante e Condomínio, ambas situadas na Universidade Federal de Lavras, bem como delimitar as Zona de Autossalvamento (ZAS) a partir do mapa de inundação gerado. O hidrograma de ruptura foi criado a partir do *software* HEC-HMS 4.10, obtendo-se a vazão máxima (ou de pico) de 15,7 m<sup>3</sup>/s para o cenário simulado. A mancha de inundação foi gerada a partir do *software* HEC-RAS 6.3.1, baseada no modelo digital de elevação Alos Palsar, o qual possui resolução de 12,5 m, e abrangeu uma parte do Condomínio dos Ipês, um trecho da Avenida Luiz Gomide, bem como as residências que ficavam à margem deste trecho. A ZAS foi delimitada de acordo com a Lei nº 23.291, que estabelece a Política Estadual de Segurança de Barragens para Minas Gerais. Concluiu-se que, apesar de não atingir uma grande área, a onda de inundação abrange pontos de infraestrutura, tal como a Avenida Luiz Gomide, e residências familiares, seja no Condomínio dos Ipês ou às margens da Avenida, impactando aproximadamente 50 pessoas, tendo capacidade para danificar veículos e apresentando perigo para crianças e idosos. Concluiu-se também que, devido às limitações que o modelo apresentou e às simplificações que foram realizadas, o mapa de inundação gerado nesse trabalho é de uso estritamente acadêmico e não deve ser utilizado como base da elaboração do PAE para as barragens.

**Palavras-chave:** Dam Break, Ruptura Hipotética, Mancha de Inundação, PAE.

## ABSTRACT

Dams have always had great importance in the development of civilizations. However, despite all its importance and the benefits provided, the failure of a dam can have catastrophic consequences. Law No. 12.334 (2010) created the National Policy on Dam Safety, which established regulations to mitigate risks and guide the management of dams in Brazil, but events such as the rupture of the Fundão Dam, in Mariana - MG (2015), and also the Córrego do Feijão B1 Dam, in Brumadinho – MG (2019), caused the rules related to these structures to be rethought and strengthened with Law No. 14.066 (2020). According to the legislation, dams must be registered with the SNISB and classified according to risk and associated potential damage, and must, among other measures, contain an Emergency Action Plan (PAE) in case of high risk or medium or high potential damage. In view of the above, the objective is to elaborate a Dam Break analysis, which is fundamental in the elaboration of the PAE for the hypothetical rupture of the Condomínio Montante and Condomínio dams, both located at the Federal University of Lavras, as well as delimiting the Auto Rescue Zones (ZAS) from the flood map. The rupture hydrograph was created using the HEC-HMS 4.10 software, obtaining a maximum flow (or peak flow) of 15,7 m<sup>3</sup>/s for the simulated scenario. The flood spot was generated using the HEC-RAS 6.3.1 software, based on the Alos Palsar digital elevation model, which has a resolution of 12.5 m, and covered a part of the Condomínio dos Ipês, a stretch of Avenida Luiz Gomide, as well as the residences that were on the edge of this stretch. The ZAS was delimited in accordance with Law No. 23.291, which establishes the State Dam Safety Policy for Minas Gerais. It was concluded that, despite not reaching a large area, the flood wave covers infrastructure points, such as Avenida Luiz Gomide, and family residences, either in the Condominium of Ipês or on the banks of the Avenue, impacting approximately 50 people, having the ability to damage vehicles and presenting danger to children and the elderly. It was also concluded that, due to the limitations that the model presented and the simplifications that were carried out, the flood map generated in this work is strictly for academic use and should not be used as a basis for the elaboration of the PAE for the dam.

**Keywords:** Dam Break, Hypothetical Rupture, Flood Spot, EAP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação quanto ao risco.....	16
Figura 2 - Classificação quanto ao dano potencial associado.....	17
Figura 3 - Seção típica da brecha de ruptura em barragens de aterro.....	23
Figura 4 - Formação da brecha por <i>piping</i> .....	23
Figura 5 - Formação da brecha por galgamento.....	23
Figura 6 - Localização barragens.....	34
Figura 7 - Área de estudo.....	35
Figura 8 - Parâmetros do escoamento.....	39
Figura 9 – Terreno – Valores em Metros.....	40
Figura 10 - Geometria da malha bidimensional criada, representação no terreno. ....	40
Figura 11 - Geometria da malha bidimensional criada – representação satélite. ....	41
Figura 12 - Geometria da brecha Barragem Condomínio – Valores em metros. ....	41
Figura 13 - Hidrograma de ruptura hipotética das Barragens do Condomínio.....	42
Figura 14 - Envoltória de inundação - Profundidade.....	43
Figura 15 - Envoltória de inundação - Velocidade.....	43
Figura 16 - Envoltória de inundação - Tempo de chegada da onda. ....	44
Figura 17 - Pontos analisados. ....	45
Figura 18 - Delimitação da ZAS.....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores característicos da brecha de ruptura (Continua).....	24
Quadro 2 - Expressões para a largura da brecha.....	24
Quadro 3 – Valores do fator compensatório.....	25
Quadro 4 - Critérios de tempo de formação da brecha.....	25
Quadro 5 - Equações para determinar a vazão de pico.....	26
Quadro 6 - Formas do hidrograma de ruptura.....	28
Quadro 7 - Dados das barragens.....	33
Quadro 8 - Parâmetros para análise da inundação.....	45
Quadro 9 - Danos associados ao risco hidrodinâmico.....	46
Quadro 10 - Risco hidrodinâmico calculado.....	48
Quadro 11 - Nível de perigo para seres humanos.....	48
Quadro 12 - Nível de perigo para edificações.....	48



## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
2.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	12
2.1.	<b>Barragens</b> .....	12
2.2.	<b>Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)</b> .....	13
2.3.	<b>Segurança de Barragens</b> .....	14
2.3.1.	<b>Cadastro de barragens junto ao SNISB</b> .....	15
2.3.2.	<b>Classificação de barragens</b> .....	15
2.3.3.	<b>Plano de Ação Emergencial (PAE)</b> .....	18
2.4.	<b>Estudo de <i>Dam Break</i></b> .....	19
2.4.1.	<b>Cenários de Ruptura</b> .....	21
2.4.2.	<b>Formação da Brecha de Ruptura</b> .....	22
2.4.3.	<b>Vazão de pico</b> .....	26
2.4.4.	<b>Hidrograma de ruptura</b> .....	28
2.4.5.	<b>Mapa de inundação</b> .....	30
2.5.	<b>O modelo hidrodinâmico HEC-RAS</b> .....	30
3.	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	33
3.1.	<b>Área de estudo</b> .....	33
3.2.	<b><i>Softwares</i> utilizados</b> .....	35
3.3.	<b>Base topográfica do terreno</b> .....	36
3.4.	<b>Geometria da simulação</b> .....	36
3.5.	<b>Cenários de ruptura</b> .....	36
3.6.	<b>Definição da geometria da brecha</b> .....	37
3.7.	<b>Hidrograma de ruptura</b> .....	37
3.8.	<b>Condições de contorno e escoamento</b> .....	38
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	40

<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>51</b>
	<b>5.1. Conclusão.....</b>	<b>51</b>
	<b>5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens sempre tiveram grande importância no desenvolvimento das civilizações. De acordo com Rodrigues (2014), tais estruturas surgiram como uma maneira de armazenar água para os períodos de seca e hoje, milênios depois de sua criação, ainda são utilizadas para amortecer cheias, aumentar a disponibilidade hídrica do local onde se encontram, armazenar rejeitos de mineração ou industriais, gerar energia hidrelétrica, promover fontes de lazer e possibilitar a irrigação.

Apesar de toda a sua importância e dos benefícios proporcionados, o rompimento de uma barragem pode gerar consequências catastróficas ao meio ambiente e aos seres que o habitam, causando perdas e danos irreparáveis.

Diante desse cenário, surge a importância da análise de *Dam Break* (estudo de ruptura hipotética), que avalia os potenciais impactos gerados pela ruptura de uma barragem. Com essa análise, é possível realizar aproximações das diversas situações e formas de rompimento de uma barragem, sua envoltória de inundação, bem como a área e a população afetadas.

Os estudos de *dam break* são fundamentais na elaboração dos Planos de Ações Emergenciais (PAE), um dos documentos que fazem parte do Plano de Segurança de Barragens (PSB), exigido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que foi estabelecida pela Lei nº 12334/2010 e alterada pela Lei nº 14066/2020, para todas as barragens que sejam classificadas junto ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) como risco alto ou dano potencial médio ou alto.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) possui atualmente oito barragens em sua propriedade, das quais duas, que se encontram em cascata, estão classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) médio, enquadrando-as na PNSB. Logo, para essas barragens é exigido, dentre outras medidas a serem tomadas, a elaboração do Plano de Ação Emergência (PAE).

Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo hipotético de *Dam Break* das barragens classificadas com DPA médio situadas na UFLA, obtendo a partir deste, o mapa de inundação em caso de rompimento e a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e Salvamento Secundário (ZSS); os quais poderão ser utilizados posteriormente na elaboração do PAE.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Barragens**

Uma barragem é uma 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. Podem ser de diversos tipos e tamanhos, desde pequenas represas para uso localizado até gigantescas estruturas com inúmeras finalidades (ANA, 2021).

Segundo Romanini (2020), as barragens podem ser classificadas quanto ao material de construção em dois tipos: barragens de concreto e barragens de aterro. Ainda segundo Romanini (2020), essas últimas podem ser divididas entre: barragens de terra, barragem de terra/enrocamento ou barragem de enrocamento; sendo as barragens de terra as mais utilizadas no Brasil.

De acordo com ANA (2021), essas estruturas ainda podem ser divididas quanto ao uso, podendo desempenhar uma ou múltiplas funções, sendo as mais comuns: irrigação, hidrelétrica, defesa contra inundações, dessedentação de animais, recreação, regularização de vazões, proteção do meio ambiente, industrial, contenção de resíduos industriais e contenção de rejeitos de mineração.

No caso das barragens de mineração, a Agência Nacional de Mineração (ANM) define as tais estruturas como estruturas projetadas para a contenção e acumulação de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos, provenientes dos processos para beneficiamento de minérios. Esses barramentos são usualmente construídos com aterro ou com os próprios rejeitos da atividade mineradora, podendo ser erguidos em etapa única, na qual o barramento consiste em um único dique, construído de uma só vez. Podem também ser alteadas (ter sua altura aumentada), seja à jusante, por linha de centro ou à montante. Ressaltando que este último método foi proibido em todo o território brasileiro a partir da Lei nº 14.066/2020 e conseguinte pela Resolução ANM nº 95/2022 vigente.

As barragens, compreendendo o barramento, as estruturas associadas e o reservatório, são obras necessárias para uma adequada gestão dos recursos hídricos e contenção de rejeitos de mineração ou de resíduos industriais. Sua construção e operação podem, no entanto, envolver danos potenciais para as populações e aos bens materiais e ambientais existentes no entorno (ANA, 2016).

## **2.2 Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)**

Em 20 de setembro de 2010 foi decretada pelo Congresso Nacional a Lei nº 12.334, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais; e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A PNSB foi alterada em 2020 pela Lei nº 14.066, após a ocorrência de dois notáveis desastres envolvendo barragens no Brasil, sendo o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana (2015) e da barragem B1 do Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), ambas eram barragens de mineração.

Pela Lei nº 14.066/2020, a PNSB aplica-se a barragens que apresentem pelo 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 3.000.000m<sup>3</sup> (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 desta Lei; e (V) categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei.

A PNSB determina diversos conceitos, parâmetros e obrigações aos empreendedores e aos órgãos que fiscalizam a gestão de sua segurança. De acordo com a Portaria nº 02 do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), publicada em 26 de fevereiro de 2019, cabe, no âmbito estadual, ao IGAM e à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e, no âmbito nacional, à ANA cadastrar e classificar as barragens destinadas ao acúmulo de água, de acordo com os riscos referentes à sua operação e a sua capacidade de causar danos ambientais e socioeconômicos, fiscalizar a gestão da segurança das barragens de acumulação de água em todo o país, elaborar normas relativas à segurança deste tipo de estruturas e assegurar que os empreendedores cumpram rigorosamente a legislação federal de segurança e suas normas complementares.

De acordo com o Art. 3º da Lei nº 14.066/2020, dentre os objetivos atribuídos à PNSB estão a prevenção e a redução de possibilidades de acidentes envolvendo barragens, a regulamentação das ações de segurança em todas as fases dessas estruturas, bem como o monitoramento e o acompanhamento das mesmas, visando fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

A PNSB tem como instrumentos o sistema de classificação de barragens, o Plano de Segurança de Barragens (PSB), o qual inclui o PAE, e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), dentre os demais citados no Artigo 6º da Lei nº 14.066/2020.

Segundo o estabelecido na PNSB, cabe ao SNISB o registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional, compreendendo o sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações e deve contemplar barragens em construção, em operação e desativadas.

No Relatório de Seguranças de Barragens 2020, publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em 2021, verifica-se que grande parte das barragens submetidas à PNSB têm altura inferior a 15 metros, volume inferior a 3 hm<sup>3</sup> e foram executadas em terra. Como altura e volume são inferiores aos descritos nos incisos do parágrafo único, do art. 1º, da Lei nº 14.066/2020, é possível inferir que tais barragens acabam sendo submetidas à PNSB devido à classificação quanto ao DPA como médio ou alto, já que poucas barragens com resíduos perigosos foram cadastradas até o momento, uma vez que a normatização das mesmas é recente e se encontra em processo de adaptação.

Complementar à legislação nacional, existe também a Lei nº 23.291 de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, a qual apresenta condições mais conservadoras quanto ao porte das barragens que nela se enquadram.

### **2.3 Segurança de Barragens**

Segurança de barragem é uma condição que visa a manter a sua integridade estrutural e operacional, de modo a minimizar o risco de incidentes ou acidentes, para que cumpra sua finalidade e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. Uma barragem segura é uma barragem bem cuidada, na qual esforços, energia, atenção, recursos e profissionais capacitados são direcionados para uma boa concepção, um bom projeto, uma construção que siga as boas práticas da engenharia e para as etapas posteriores à construção: primeiro enchimento, manutenção, operação e desativação, se for o caso. O responsável pela segurança de uma barragem é o empreendedor (ANA, 2021).

Dos instrumentos estabelecidos pela PNSB, pode-se destacar o cadastro das estruturas junto ao SNISB, a classificação de barragens e o PAE, que faz parte do PSB.

### **2.3.1 Cadastro de barragens junto ao SNISB**

Segundo o estabelecido na Lei nº 14.066/2020, cabe ao SNISB o registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional, compreendendo o sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações e deve contemplar barragens em construção, em operação e desativadas. Cabe salientar que, de acordo com o disposto na Lei nº 14.066/2020, o SNISB deve manter informações sobre incidentes que possam colocar em risco a segurança de barragens, acidentes e desastres.

De acordo com os dados disponibilizados no painel de informações do SNISB (2022), existem atualmente 23.178 barragens cadastradas. Desse total, apenas 3.789 possuem ótima completude das informações. Também é possível perceber no painel que houve um salto no número de barragens cadastradas entre os anos de 2018, com 1.405 cadastros, e 2019, com 13.166 barragens cadastradas.

### **2.3.2 Classificação de barragens**

Segundo o Artigo 7º da Lei nº 14.066/2020, as barragens serão classificadas por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) na Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012.

Pelos dados disponibilizados no painel de informações do SNISB (2022) pode-se perceber que o ano de 2020 foi, de longe, o ano em que houve o maior número de classificação de barragens, totalizando 32.025.583 barragens classificadas.

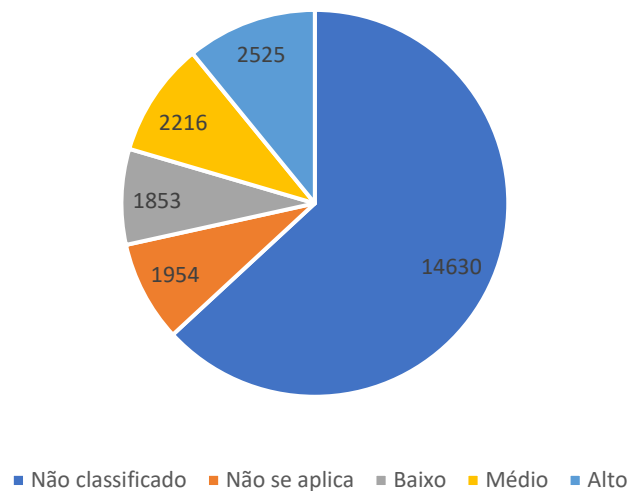
A classificação quanto ao risco (CRI), de acordo com a Lei nº 14.066/2020, se dá em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação e da idade do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem, bem como de outros critérios definidos pelo órgão fiscalizador.

Conforme consta no CNRH nº 143 (2012), para a classificação quanto ao risco leva-se em consideração os aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, tais como: altura do barramento, comprimento do coroamento da barragem, tipo de barragem quanto ao material de construção, tipo de fundação da barragem, idade da barragem, tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro, confiabilidade das estruturas extravasoras, confiabilidade das estruturas de captação, eclusa, percolação, deformações e recalques, deterioração dos taludes, existência de documentação de projeto, estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da

barragem, procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento, regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem, relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação, dentre outros.

A Figura 1 mostra o número de barragens por categoria de risco com valores atualizados em junho de 2022 pelo SNISB.

Figura 1 - Classificação quanto ao risco.



Fonte: Adaptado de SNISB (2022).

A classificação por categoria de dano potencial associado (DPA) à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (BRASIL, 2020).

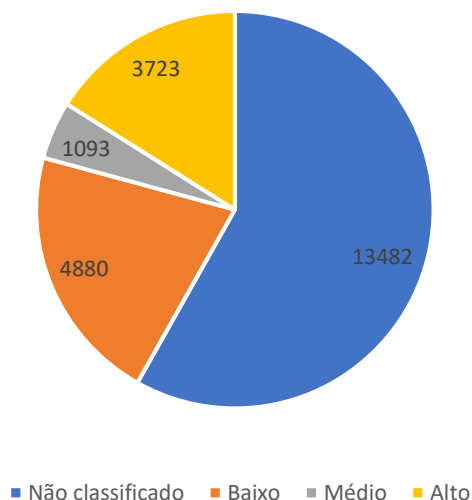
Em concordância com o CNRH nº 143 (2012), entende-se por dano potencial associado o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

Para a classificação quanto ao DPA, de acordo com o CNRH nº 143 (2012), são observados: existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas, existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários, existência de infraestrutura ou serviços, existência de equipamentos de serviços públicos essenciais, existência de áreas protegidas definidas em legislação, natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados e volume.



A Figura 2 mostra o número de barragens por categoria de dano potencial associado com valores atualizados em junho de 2022 pelo SNISB.

Figura 2 - Classificação quanto ao dano potencial associado.



Fonte: Adaptado de SNISB (2022).

De acordo com os dados disponibilizados no Painel de Informações do SNISB (2022), de todas as barragens cadastradas, 1218 são classificadas simultaneamente como Categoria de Risco (CRI) e DPA altos, e outras 255 possuem CRI alto e DPA médio.

Quanto ao volume, para barragens de acumulação de água, considera-se segundo o CNRH nº 143(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 inferior ou igual 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. Em se tratando de barragens para disposição de rejeito mineral e/ou resíduo industrial, quanto ao volume de seu reservatório, segundo o CNRH nº 143 (2012), a barragem será considerada: (I) muito pequena, se o reservatório tiver um volume total inferior ou igual a 500 mil metros cúbicos; (II) pequena, se o reservatório possuir volume total superior a 500 mil metros cúbicos e inferior ou igual a 5 milhões de metros cúbicos; (III) média, se o reservatório tiver um volume total superior a 5 milhões de metros cúbicos e inferior ou igual a 25 milhões de metros cúbicos; (IV) grande, se o reservatório contar com um volume total superior a 25 milhões e inferior ou igual a 50 milhões de metros cúbicos; e (V) muito grande, em caso de reservatório com volume total superior a 50 milhões de metros cúbicos.

### 2.3.3 Plano de Ação Emergencial (PAE)

O PAE é uma medida não-estrutural de mitigação do risco. Essa medida deve ser preparada em uma fase anterior à emergência decorrente de uma inundação a fim de se fazer frente ao risco imposto pela barragem ao vale. Consiste de cinco componentes: detecção, tomada de decisões, notificação, alerta/aviso e evacuação (BALBI, 2008).

Segundo Vianna (2015), o PAE é um dos pilares da gestão voltada para o risco. Partindo do princípio que a segurança absoluta não pode ser garantida e que existe o risco de ruptura da barragem, o PAE visa estabelecer um conjunto de ações de resposta para atuação em situações críticas, a fim de evitar a ocorrência de acidentes ou minimizar suas consequências (VIANNA, 2015).

A Lei nº 14.066/2020 exige o PAE como um dos documentos do PSB para todas as barragens que estejam classificadas como risco alto, DPA médio ou alto, ou acumule rejeitos de mineração.

Consoante com ANA (2021), das 5.591 barragens submetidas à PNSB, cerca de 28% possuem o PSB e 18% foram objeto de ao menos uma inspeção de segurança no ano de 2020. Para as 3.724 barragens com DPA Alto que deveriam possuir o PAE, em 34% esse documento se encontra concluído. A maioria dos PSB e seus componentes elaborados referem-se às barragens destinadas à geração de energia hidrelétrica e contenção de rejeitos de mineração.

O PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência (Art. 12º, L14.066/2020).

Segundo o Artigo 12º da Lei nº 14.066/2020, o PAE deverá conter a descrição das instalações da barragem e das possíveis situações de emergência, procedimentos para identificação e notificação do mau funcionamento, de condições potenciais de ruptura da barragem ou de outras ocorrências anormais, procedimentos preventivos e corretivos e ações de resposta às situações emergenciais identificadas nos cenários acidentais, programas de treinamento e divulgação para os envolvidos e para as comunidades potencialmente afetadas, realizando-se exercícios simulados periódicos, as atribuições e responsabilidades dos envolvidos e fluxograma de acionamento, medidas específicas, em parceria com o poder público, para o resgate de atingidos, sejam eles pessoas ou animais, para mitigar impactos ambientais, assegurar o abastecimento de água potável e para resgatar e salvaguardar o patrimônio cultural, o dimensionamento dos recursos humanos e materiais necessários para resposta ao pior cenário identificado.

Também cabe ao PAE a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e da Zona de Salvamento Secundário (ZSS). Conforme ANA (2022), a ZAS pode ser definida como sendo a região do vale a jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar para a sua delimitação, caso não haja manifestação do sistema de defesa civil quanto ao tempo necessário para sua atuação, a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

Já de acordo com a Lei nº 23.291, para a delimitação da extensão da zona de autossalvamento, será considerada a maior entre as duas seguintes distâncias a partir da barragem: (I) 10km (dez quilômetros) ao longo do curso do vale; (II) a porção do vale passível de ser atingida pela onda de inundação num prazo de trinta minutos.

A ZSS pode ser definida como sendo o trecho constante do mapa de inundação não definido como ZAS.

O PAE deverá conter ainda, de acordo com o Artigo 12º da Lei nº 14.066/2020, um levantamento cadastral e mapeamento atualizado da população que vive na ZAS, incluindo a identificação de vulnerabilidades sociais, sistema de monitoramento e controle de estabilidade da barragem integrado aos procedimentos emergenciais, plano de comunicação, incluindo contatos dos responsáveis pelo PAE no empreendimento, da prefeitura municipal, dos órgãos de segurança pública e de proteção e defesa civil, das unidades hospitalares mais próximas e das demais entidades envolvidas, previsão de instalação de sistema sonoro ou de outra solução tecnológica de maior eficácia em situação de alerta ou emergência, com alcance definido pelo órgão fiscalizador, planejamento de rotas de fuga e de pontos de encontro, com a respectiva sinalização.

Segundo Juliastuti e Setyandito (2017), o foco principal do PAE é o gerenciamento de desastres baseado no mapa de inundação e a identificação das zonas de risco de inundação é o passo principal para sua formulação.

#### **2.4 Estudo de *Dam Break***

De acordo com Paiva e Filho (2020), o estudo de *dam break* é um item fundamental do PAE e prevê o comportamento da inundação decorrente da ruptura da barragem. Segundo Rossi (2020), tais estudos permitem estimar certos parâmetros específicos do dano causado pelo

rompimento, como cotas atingidas e velocidades da onda proveniente da ruptura em pontos de interesse.

Do Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência (ANA, 2016), sabe-se que o estudo de *Dam Break* se baseia na simulação da cheia induzida e tem como resultado o mapa de inundação, que possibilita identificar as áreas afetadas no caso de rompimento da barragem bem como auxiliar na classificação da barragem quanto ao dano potencial associado (DPA).

A necessidade de informações para a realização desse tipo de estudos varia conforme as particularidades de cada área. No entanto, destaca-se que para a maioria dos estudos são necessárias, além das informações referentes à barragem objeto de análise, dados quanto às configurações da brecha, volume do reservatório e topografia do vale de jusante (ROSSI, 2020).

O *Dam Break* pode ser realizado através de *softwares* computacionais, ou por meio da literatura, embasada em teorias e estudos de caso de ruptura de diversas barragens espalhadas pelo mundo (TERCINI *et al*, 2020).

Em geral são usados nesta avaliação modelos hidrodinâmicos. A critério da entidade fiscalizadora, pode ser utilizada uma metodologia simplificada para o estudo de inundação para as barragens classificadas como de dano potencial alto, mas com altura do maciço menor que 15 metros e com capacidade total do reservatório menor que 3.000.000 m<sup>3</sup> (ANA, 2016).

Nos modelos simplificados, a onda de cheia gerada pela ruptura de uma barragem é usualmente estimada por meio de equações empíricas. Embora envolvam graus de incerteza que podem ser significativos, os resultados dos modelos simplificados constituem um auxílio precioso na estimativa do nível máximo da inundação e têm-se revelado frequentemente coerentes quando comparados com os que resultam de modelos mais complexos (PEREIRA *et al*, 2017).

Consoante com Ferla (2018), tais modelos simplificam o número de graus de liberdade ao máximo, sem perder a veracidade dos resultados e são sumariamente fundamentados nas equações de balanço de massa. Contudo, ressalta-se que o uso de métodos simplificados não deve subsidiar a elaboração de um Plano de Ação Emergencial (PAE), uma vez que os resultados provenientes destes métodos não possuem o grau de detalhamento necessário para compor este plano (ROSSI, 2020).

Os modelos hidrodinâmicos, de acordo com Coutinho (2015), utilizam as equações completas de Saint Venant. Por esse motivo, apresentam resultados mais confiáveis e próximos

da realidade, sendo, segundo Rossi (2020), usualmente exigidos na elaboração de estudos de *dam break* que orientam a formulação de PAEs.

De modo geral, o estudo de *Dam Break*, seja pelo uso da tecnologia ou aplicação da literatura, irá definir a brecha de ruptura de acordo com o material construtivo, calcular o tempo e a vazão de ruptura a partir das características técnicas, e gerar o hidrograma de ruptura para propagação das ondas de inundação (TERCINI *et al*, 2020).

#### **2.4.1 Cenários de Ruptura**

De acordo com o que consta no Guia de Orientação e Formulários do PAE (ANA, 2016), deve-se optar por construir o menor número possível de cenários, devendo, para garantir uma adequada segurança associada aos diferentes tipos de barragens, ser definidos dois tipos de cenários: (i) cenário de operação hidráulica extrema, que, sem conduzir à ruptura, pode dar origem a descargas importantes e, de igual forma, colocar em risco pessoas e bens no vale a jusante; e (ii) cenário de ruptura (cheia seguida de galgamento, erosão interna, etc.).

O primeiro caso, ainda de acordo com ANA (2020), é um cenário típico de acidente e resulta da abertura rápida e simultânea de todas as comportas, para barragens com vertedouro dotado de tais elementos, ou ao evento da cheia de projeto, para o caso de barragens com vertedouros sem comportas.

O cenário de ruptura, deve, por outro lado, ser sujeito a uma classificação mais rigorosa que contemple igualmente (ANA, 2016) o cenário de ruptura mais provável e o cenário de ruptura mais desfavorável ou extremo.

De acordo com Rossi (2020), o cenário de ruptura mais provável deve ser definido em função das características da barragem e das possíveis causas de ruptura, fatores também dependentes das características e situação atual da barragem.

Nesse cenário, podem ser considerados dois tipos de ruptura quanto a causa predominante: falha por mecanismos estruturais (ruptura em dia de sol) e ruptura por mecanismo hidráulico. Para rupturas em dias de sol considera-se que, no instante inicial, o reservatório encontra-se no nível normal, enquanto nas rupturas por mecanismos hidráulicos o nível no reservatório no instante inicial deve corresponder ao menos ao nível máximo *maximorum*. Contudo, pode-se considerar que o nível do reservatório inicie na própria crista da barragem nos casos em que é necessário considerar-se uma afluência para que ocorra o galgamento da barragem (ROSSI, 2020).

Ainda segundo Rossi (2020), caso as causas da ruptura não estejam claras, deve se adotar o cenário mais extremo, para que as piores condições possíveis sejam simuladas.

Quanto ao cenário de ruptura extremo ou mais desfavorável, de acordo com o Guia de Orientação e Formulários do PAE (ANA, 2016), este pressupõe a ruptura rápida e total do barramento, agravando, em sua simulação, os valores de todos os parâmetros da brecha e maximizando as afluências à represa, de modo a calcular a pior cheia induzida que possa ocorrer e registrando os níveis mais elevados no reservatório.

#### **2.4.2 Formação da Brecha de Ruptura**

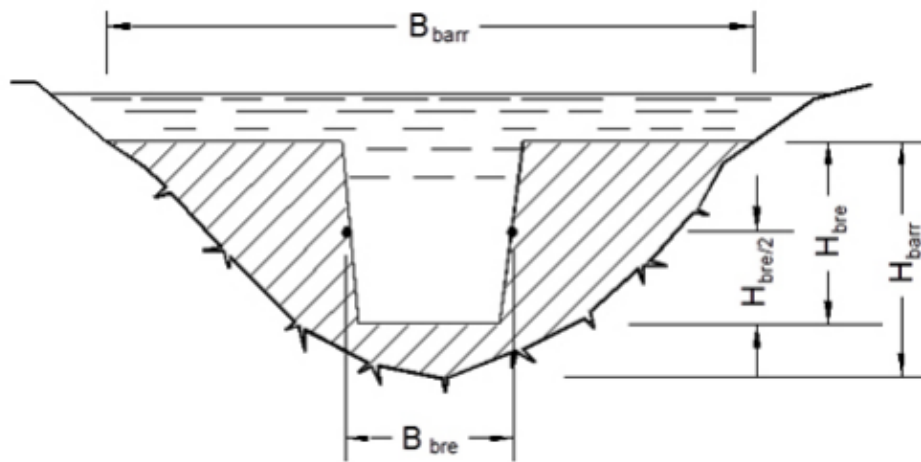
A brecha corresponde ao espaço formado no maciço da barragem após sua falha por onde o volume presente no reservatório escoar, o que corresponde ao hidrograma de ruptura (ROSSI, 2020). De acordo com o mesmo autor, existem muitas incertezas envolvidas neste processo pois os reais mecanismos de ruptura não são totalmente compreendidos, mas, apesar das incertezas, a formação pré-determinada da brecha é a estratégia de simulação mais utilizada nos dias de hoje para estudos de rompimento.

Uma brecha é caracterizada por três parâmetros: a sua configuração geométrica, as suas dimensões (nomeadamente, a largura e a altura) e o tempo de ruptura, fatores que, no seu conjunto, influenciam os valores das vazões, dos níveis e dos tempos de chegada da onda de inundação às diferentes zonas da área de inundação e afetam os intervalos de tempo disponíveis para a implementação do plano de emergência (ANA, 2016).

Segundo Juliastuti e Setyandito (2017), a dimensão da brecha de ruptura para barragens de concreto em arco compreende toda a seção da barragem, já para barragens de aterro essa dimensão é apenas parte da seção total da barragem. Tal fato complementa o exposto pela ANA (2016), que afirma que o desenvolvimento da brecha de ruptura em barragens de concreto em arco é rápido, enquanto que nas barragens de aterro essa ruptura é lenta e parcial. O texto ainda traz como características da brecha de ruptura de barragens de aterro o formato trapezoidal, com altura aproximadamente igual à altura da barragem. A Figura 3 representa a seção típica da brecha de ruptura em uma barragem de aterro.

Sabendo que o processo de formação da brecha se diferencia de acordo com o tipo e o material da barragem, o mecanismo de ruptura, as características do reservatório, dentre outros fatores, as Figuras 4 e 5 mostram o processo de evolução da brecha de acordo com o mecanismo de ruptura.

Figura 3 - Seção típica da brecha de ruptura em barragens de aterro.



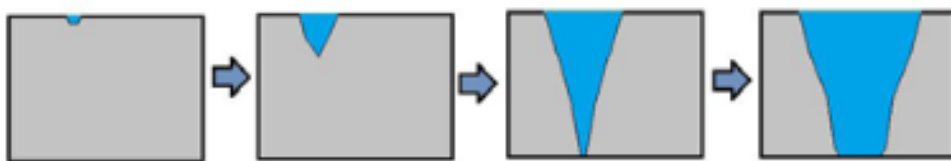
Fonte: ANA (2016).

Figura 4 - Formação da brecha por *piping*.



Fonte: Faria *et al* (2019).

Figura 5 - Formação da brecha por galgamento.



Fonte: Faria *et al* (2019).

O Quadro 1 apresenta os valores característicos dos parâmetros da brecha para cada tipo de barramento. De acordo com Mascarenhas (1990) e Ladeira (2007), a brecha ocasionada por *piping* apresenta uma angulação mais fechada, uma vez que se forma devido a uma erosão interna que progride de jusante para montante, com escoamento preferencial (entubamento), já a brecha ocasionada por galgamento, segundo Collischonn (1997) é mais aberta, uma vez que a erosão se inicia no ponto mais fraco na crista da barragem.

Especificamente para a largura da brecha, tem-se os seguintes critérios dos principais autores utilizados atualmente na literatura (QUADRO 2).

Quadro 1 - Valores característicos da brecha de ruptura (Continua).

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 $\frac{B_{bre}}{0,8B_{barr}} \geq$	$0 \leq Z \leq$ Inclinação do vale	$t_{rup} \leq 0,1$
Concreto gravidade	Múltiplos trechos, usualmente $\frac{B_{bre}}{0,5B_{barr}} \leq$	$Z = 0$	$0,1 \leq t_{rup} \leq 0,3$
Terra/Enrocamento	$\frac{B_{bre}}{5H_{barr}} \leq$	$1/4 \leq Z \leq 1$	$0,5 \leq t_{rup} \leq 3$
Estéreis de minas	$\frac{B_{bre}}{0,8H_{barr}} \leq$	$1 \leq Z \leq 2$	$0,1 \leq t_{rup} \leq 0,3$

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Onde  $B_{barr}$  representa a largura da barragem em metros.

Quadro 2 - Expressões para a largura da brecha.

Autores	Largura da brecha [m]
U. S. Bureau of Reclamation (USBR, 1988)	$B_b = 3H_w$
Von Thun e Gillette (1990)	$B_b = 2,5H_w + C_b$
Wahl (1998) apud Grimaldi et al (2010)	$B_b = 4H_d$

Fonte: Ferla (2018).

Onde:

$B_b$ : largura de brecha retangular (m);

$H_w$ : altura de água no momento da ruptura (m);

$H_d$ : altura da barragem (m); e

$C_b$ : fator compensatório da equação de Von Thun e Gillette (m) (QUADRO 3).



Quadro 3 – Valores do fator compensatório.

Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Cb (m)
< 1,23 x 10 <sup>6</sup>	6,1
1,23 x 10 <sup>6</sup> até 6,17 x 10 <sup>6</sup>	18,3
6,17 x 10 <sup>6</sup> até 1,23 x 10 <sup>7</sup>	42,7
> 1,23 x 10 <sup>7</sup>	54,9

Fonte: Ferla (2018).

Froehlich (2016) também teve sua contribuição no cálculo da largura média da brecha, desenvolvendo sua equação, criada em 1995 a partir do estudo de rompimento de 63 barragens de terra, enrocamento e terra/enrocamento, atualizada em 2008, a partir do estudo de rompimento de 74 barragens, e aprimorando-a à versão final (EQUAÇÃO 1), de 2016, criada a partir do estudo de rompimento de 111 barragens de diversos tipos de materiais: terra homogênea, terra zonada, enrocamento, terra/enrocamento, concreto, etc.

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

Onde:

V<sub>w</sub>: Volume de água no reservatório no momento da ruptura (1000 m<sup>3</sup>);

H: Altura final da brecha (m); e

k<sub>0</sub>: 1,4, para galgamento 1,0 para *piping*.

Quanto ao tempo de formação da brecha, tem-se os seguintes critérios de cálculo listados no Quadro 4.

Quadro 4 - Critérios de tempo de formação da brecha.

Autor	Tempo de formação da brecha (h)
Bureau of Reclamation (1988)	$t_f = 0,011B_b$
Von Thun e Gillette (1990) – altamente erodível	$t_f = 0,015H_w$
Von Thun e Gillette (1990) – resistente à erosão	$t_f = 0,020H_w + 0,25$
Froehlich (2016)	$t_f = 3,84V_w^{0,53}H^{-0,90}$
Xu e Zhang (2009) - erodibilidade	$t_f = 0,304 \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0,707} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w}\right)^{1,228} e^{b3+b4+b5}$

Fonte: Adaptado de Ferla (2018).

Onde:

B<sub>b</sub>: Largura da brecha (m);

$H_w$ : Altura de água acima do fundo da brecha (m);

$H_d$ : Altura da barragem (m);

$H_r$ : Variável de controle utilizada na regressão;

$V_w$ : Volume do reservatório (1000 m<sup>3</sup>).

$$b_3 = \begin{cases} -0,327 & \text{para barragens de enrocamento} \\ -0,674 & \text{para barragens de concreto} \\ 0,189 & \text{para barragens homogêneas ou zonadas} \end{cases}$$

$$b_4 = \begin{cases} -0,579 & \text{para rompimento por galgamento} \\ -0,611 & \text{para rompimento por piping} \end{cases}$$

$$b_5 = \begin{cases} -1,205 & \text{para solo de alta erodibilidade} \\ -0,564 & \text{para solo de média erodibilidade} \\ 0,579 & \text{para solo de baixa erodibilidade} \end{cases}$$

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*.

### 2.4.3 Vazão de pico

A vazão de pico que ocorre em uma situação envolvendo o rompimento de barragens pode ser determinada tanto em função das características geométricas da brecha e do tempo de formação da brecha, quanto em função das características próprias da barragem e do reservatório (FERLA, 2018).

Rossi (2020), fazendo uma adaptação de Pierce *et al* (2010) e Froehlich (2016), lista as diferentes equações para a determinação da vazão de pico de acordo com diferentes autores e em função de diferentes parâmetros, conforme Quadro 5.

Quadro 5 - Equações para determinar a vazão de pico (Continua).

Parâmetros relacionados	Autor (ano)	Equação da vazão de pico $Q_{\text{máx}}$ (m <sup>3</sup> /s)
Função da altura de água represada	Kirkpatrick (1977)	$1,268(H_w + 0,3)^{2,5}$
	Soil Conservation Service – SCS (1981) para $H_d > 31,4\text{m}$	$16,6(H_w)^{1,85}$
	U. S. Bureaus of Reclamation (1982)	$19,1(H_w)^{1,85}$
	Singh e Snorrason (1982)	$13,4(H_w)^{1,89}$

Quadro 5 - Equações para determinar a vazão de pico (Conclusão).

Função do volume do reservatório	Singh e Snorrason (1984)	$1,776(V_f)^{0,47}$
	Evans (1986)	$0,72(V_w)^{0,53}$
	MMC	$0,0039(V_w)^{0,8122}$
Função da altura de água represada e do volume do reservatório	Hagen (1982)	$1,205(V_w H_w)^{0,48}$
	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	$1,154(V_w H_w)^{0,412}$
		$0,763(V_w H_w)^{0,42}$
	Costa (1985)	$0,607(V_w^{0,295} H_w^{1,24})$
	Froehlich (1995)	$0,0443\sqrt{g}(V_w^{0,365} H_w^{1,405})$
	Webby (1996)	$0,038(V_w^{0,295} H_w^{1,24})$
	Pierce (2008)	$0,0166\sqrt{gV_w}H_w$
	Azimi et al (2015)	$\frac{1}{3}(V_w^{0,45} H_w^{0,56})$
Ferla (2018)		

Fonte: Adaptado de Rossi (2020), adaptado de e Pierce *et al* (2010) e Froehlich (2016).

Rossi (2020) ainda traz as seguintes observações quanto às equações listadas: (i) a equação elaborada pela SCS foi criada por observações em barragens de terra; (ii) a equação elaborada por MMC resulta em maiores vazões quando usada para reservatórios com grande volume armazenado, se comparada com a Eq. de Froehlich (1995); (iii) a equação criada por Hagen (1982) obtém melhores resultados para barragens de concreto em arco em vales estreitos; (iv) MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) indicam o uso da equação criada por eles para barragens de terra/enrocamento, mas Froehlich (1995) menciona que a mesma também pode ser utilizada em barragens de concreto; (v) a equação criada por Costa (1985) é válida para barragens de concreto, enrocamento e terra, e tende a superestimar os resultados quando utilizada para barragens de enrocamento e terra; (vi) a equação de Froehlich (1995) é válida para maciços compostos por materiais rochosos, terrosos ou a combinação de ambos; e (vii) a equação desenvolvida por Ferla (2018) foi criada da observação de barragens de terra e enrocamento cuja ruptura foi ocasionada por galgamento.

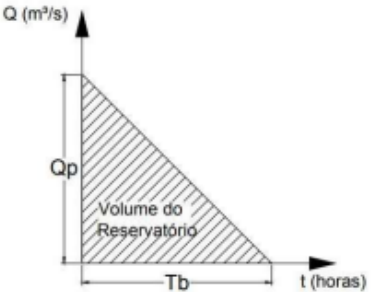
#### 2.4.4 Hidrograma de ruptura

De acordo com Campos (2020), hidrogramas de ruptura são uma função direta do volume e do tipo de material armazenado nos reservatórios das barragens, bem como do tempo e da forma de sua liberação. Tal afirmação complementa o exposto por Faria *et al* (2019), que considera a geometria e o tempo de abertura da brecha como parâmetros fundamentais na estimativa do hidrograma de ruptura.

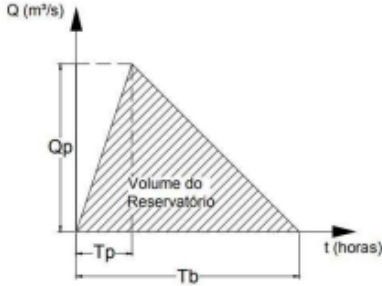
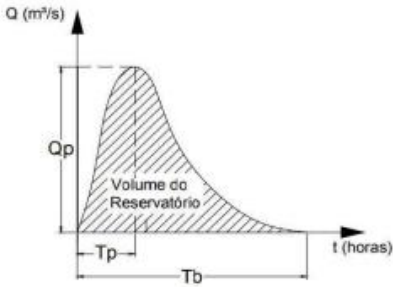
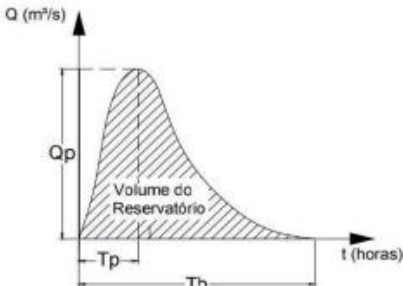
Ferla (2018) ainda justifica a necessidade da determinação do hidrograma como elemento necessário na simulação do evento de ruptura e na elaboração do mapa de inundação a jusante.

Autores como Ferla (2018), Faria *et al* (2019) e Rossi (2020) trazem como referência nessa etapa as duas formas do hidrograma desenvolvidas por Mascarenhas (1990), o hidrograma simplificado e o hidrograma de ruptura gradual linear. Os dois trabalhos mais recentes ainda apresentam duas metodologias que trabalham com o formato de decaimento parabólico: o de Barifield *et al* (1991, apud WALTHER *et al* 2000), referenciado por Rossi (2020) e o de Silva Junior (2013), referenciado por Faria *et al* (2019). Todas as formas já citadas estão ilustradas no Quadro 6.

Quadro 6 - Formas do hidrograma de ruptura (Continua).

Autor (ano)	Tipo de hidrograma	Hidrograma
Mascarenhas (1990)	Simplificado	$Q(t) = Q_p - \frac{Q_p}{T_b} \times t$ 

Quadro 7 - Formas do hidrograma de ruptura (Conclusão).

Mascarenhas (1990)	Ruptura gradual linear	$Q(t) = Q_p \times \frac{t}{T_b}, \text{ para } 0 \leq t \leq T_p$ $Q(t) = Q_p - Q_p \times \left( \frac{t - T_p}{T_b - T_p} \right), \text{ para } t \geq T_p$ 
Barifield et al (1991, apud WALTHER et al 2000)	Decaimento parabólico	$Q(t) = Q_p \left[ \left( \frac{t}{T_p} \right) \times e^{\left( 1 - \frac{1}{T_p} \right)} \right]$ 
Silva Junior (2013)	Decaimento parabólico	$Q(t) = Q_p \left[ \left( \frac{t}{T_p} \right) \times e^{\left( 1 - \frac{1}{T_p} \right)^k} \right]$ 

Fonte: Adaptado de Faria *et al* (2019) e Rossi (2020).

Onde:

k: Constante relacionada ao volume, varia de 0,1 a 0,5;

$Q(t)$ : Vazão do hidrograma ( $m^3/s$ );

$Q_p$ : Vazão de pico ( $m^3/s$ );

$T_p$ : Tempo de pico do hidrograma (s);

$T_b$ : Tempo de base do hidrograma (s); e

$t$ : Variável independente relacionada ao tempo (s).

O amortecimento do hidrograma ocorre, com maior ou menor intensidade, em função, principalmente, das características topográficas das regiões a jusante do barramento e das interações dinâmicas do escoamento (FERLA, 2018).

#### **2.4.5 Mapa de inundação**

De acordo com a ANA (2022), o mapa de inundação é o produto do estudo de inundação que compreende a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por eventos extremos, eventual vazamento ou ruptura parcial ou total da barragem e seus possíveis cenários associados, que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas, devendo conter 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.

A Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que instituiu a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB) em Minas Gerais, estabelece que o mapa de inundação para a delimitação da ZAS deve abranger a maior das duas distâncias a partir da barragem, sendo: (I) 10km (dez quilômetros) ao longo do curso do vale; ou (II) a porção do vale passível de ser atingida pela onda de inundação num prazo de trinta minutos.

Complementar à PESB, o Ofício Circular 02-2019 GMG/CEDEC, publicado em 26 de junho de 2019, bem como 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), estabelecem as orientações para o estudo de ruptura hipotética de barragens. Dentre os termos, ressalta-se que a propagação da onda deve ser feita em modelo bidimensional.

### **2.5 O modelo hidrodinâmico HEC-RAS**

Como destacado anteriormente, existem diversos modelos para a propagação do hidrograma de ruptura ou onda de cheia, sendo o modelo hidrodinâmico o mais recomendado na elaboração de estudos de *dam break* utilizados para a elaboração do PAE.

De acordo com Ferla (2018), os modelos hidrodinâmicos são baseados na modelagem hidráulica e hidrodinâmica das equações de Saint-Venant, que constituem as Equações de Conservação de Massa (EQUAÇÃO 1) e Conservação da Quantidade de Movimento, equação dinâmica, (EQUAÇÃO 2). Ferla (2018) complementa ainda que a maioria dos modelos utiliza a solução das equações de Saint-Venant (EQUAÇÕES 2 E 3) para fluxo unidimensional, embora existam metodologias já lançadas que empregam considerações de fluxo bidimensional.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (3)$$

Onde:

Q: vazão (m<sup>3</sup>/s);

t: tempo (s);

A: área da seção (m<sup>2</sup>);

x: distância ao longo do rio no sentido longitudinal (m);

y: profundidade do escoamento (m);

S<sub>0</sub>: declividade do fundo do rio (m/m);

S<sub>f</sub>: declividade da linha de energia (m/m); e

g: aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Segundo Fan (2014), os diferentes termos da equação dinâmica representam aspectos diferentes das forças que atuam sobre um pequeno volume de controle. O primeiro termo apresentado na Equação 2, representa a força de atrito com o fundo e com as margens do rio, que tende a desacelerar o escoamento. O segundo termo da Equação 2 representa a força resultante do peso da massa da água no volume de controle. O terceiro termo que é apresentado na Equação 2 representa a força associada à diferença de pressão entre os contornos de montante e jusante do volume de controle. O quarto termo representa a advecção de quantidade de movimento para dentro do volume de controle. Por fim, o último termo representa a aceleração local da água no volume de controle.

Um dos *softwares* mais conhecidos e utilizados no Brasil para a geração do mapa de inundação segundo o modelo hidrodinâmico é o HEC-HAS, *software* de domínio público desenvolvido pela *United States Army Corps of Engineers* (USACE).

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers; River Analysis Systems*) realiza cálculos unidimensionais de escoamento em regime permanente e não permanente, transporte de sedimentos, modelagem de cabeceiras e análise da temperatura da água. O *software* trabalha com uma rede inteira de canais, sistemas dendríticos ou um único rio (MARANGONI *et al*, 2017). Recentemente também foi lançada pela USACE a versão do *software* que possibilita análises bidimensionais. Para análises de *Dam Break*, a solução da simulação se dá a partir da resolução das Equações de Saint-Venant (FERLA, 2018).

Ferla (2018) ressalta ainda que o *software* HEC-RAS não se limita, no caso de análises de *Dam Break*, à propagação do hidrograma de ruptura a jusante, uma vez que o modelo também possibilita a análise de formação da brecha e o desenvolvimento do hidrograma de ruptura, conforme especificações do usuário.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do Ribeirão Vermelho, no município de Lavras, Minas Gerais. Os objetos de estudo são as barragens de acumulação de água Condomínio e Condomínio Montante, de coordenadas geográficas 21°13'19'' S; 44°58'38'' W e 21°13'24'' S; 44°58'35'' W, respectivamente. As barragens estão situadas no campus da UFLA (FIGURA 6), que é a proprietária das mesmas, se encontram em cascata e interceptam um dos afluentes do Ribeirão Vermelho, sendo o uso principal de ambas o controle de cheias.

Ambos os barramentos são de terra homogênea com fundação em rocha sã e foram construídos entre as décadas de 80 e 90. Porém, como não haviam registros de projetos e execução, no ano de 2011 foi realizado um *As Is* em ambas as barragens para que estas pudessem funcionar com segurança. A reestruturação foi feita incorporando o talude existente em cada barramento ao talude construído, utilizando-se solo homogêneo com controle de compactação.

A barragem de montante possui extravasor de terra escavada - que atualmente não se encontra em boas condições de manutenção - enquanto que a barragem de jusante possui um monge como estrutura de descarga de fundo.

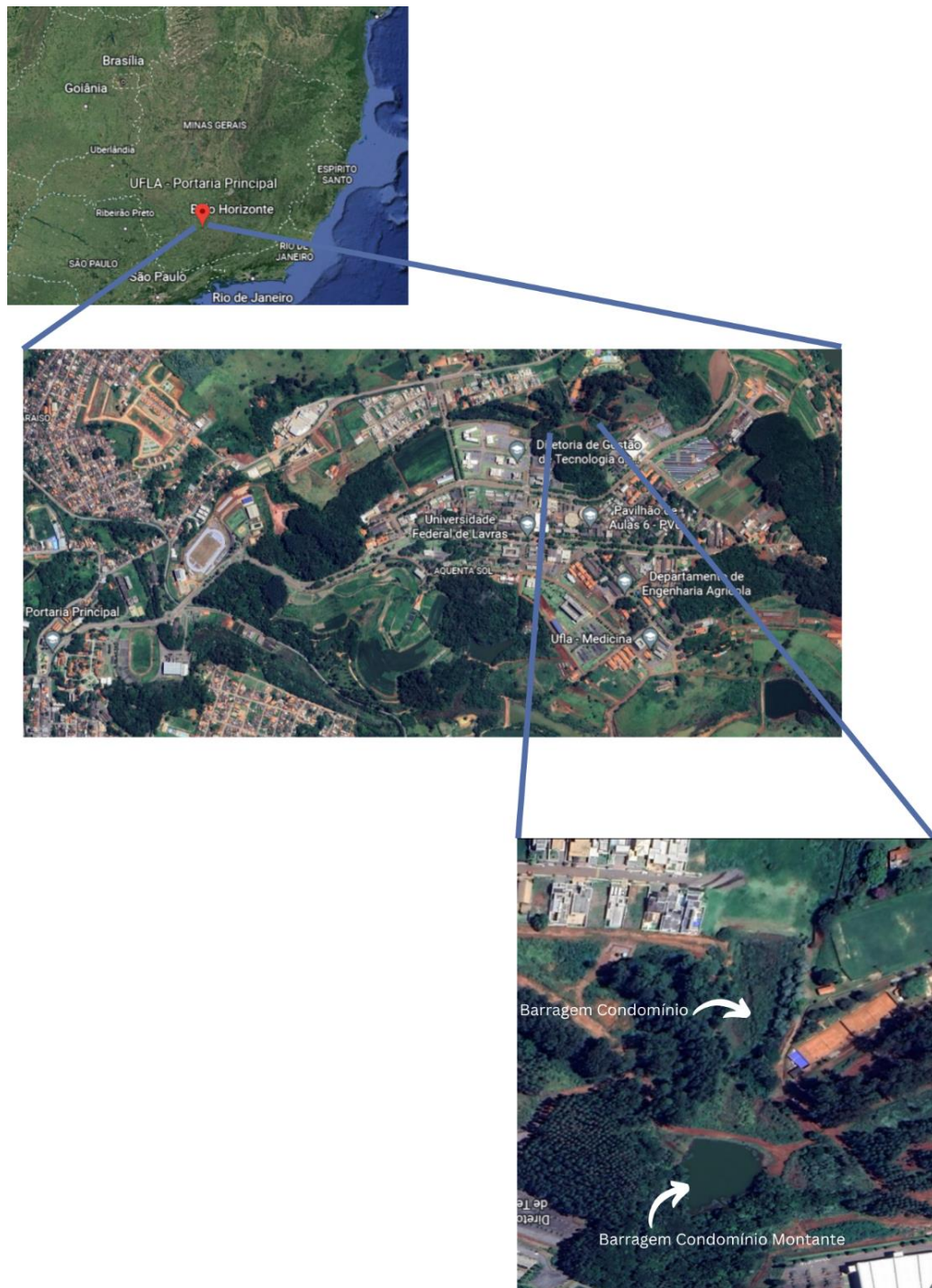
O Quadro 7 traz os dados referentes à altura das barragens e ao volume dos reservatórios de acordo com os documentos disponibilizados pelo Departamento do Meio Ambiente (DQMA) – UFLA.

Quadro 8 - Dados das barragens.

Barragens	Condomínio	Condomínio Montante
Altura máxima do maciço acima da base da fundação (m)	6	5
Volume total do reservatório (m <sup>3</sup> )	7943,77	5185,48
Largura da crista (m)	10	10

Fonte: Adaptado de DQMA-UFLA (2022).

Figura 6 - Localização das barragens.



Fonte: Dos autores (2022).

À jusante da barragem do Condomínio, na outra margem da Avenida Luiz Gomide, ainda existe uma terceira barragem em cascata, como é possível visualizar na Figura 7. Este barramento não é de propriedade da UFLA, portanto, para ele não será realizado o estudo de *dam break*.

Figura 7 - Área de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022).

A previsão de operação das barragens Condomínio e Condomínio Montante é até o ano de 2048, porém, como também é possível visualizar na Figura 7, a Barragem Condomínio foi esvaziada no ano de 2019 por motivos de segurança, contendo apenas uma lâmina d'água, proveniente do volume vertido da barragem de montante, em seu reservatório.

Apesar das características apresentadas por si só não submeterem as barragens à PNSB, ambas são classificadas junto ao SNISB com DPA médio, o que as inclui na Política. Uma vez submetidas à PNSB, essas estruturas devem apresentar, juntamente a outros elementos estabelecidos na Lei nº14.066/2020, o PSB, incluindo o PAE.

### 3.2 Softwares utilizados

Conhecidas as barragens, optou-se por utilizar o *software* HEC-RAS, em sua versão 6.3.1, neste trabalho, para simular um rompimento hipotético das estruturas. Utilizou-se a extensão RASMapper para criação do terreno e vetorização dos elementos de estudo. Para a simulação da brecha e geração do hidrograma de ruptura hipotética, considerando *piping* para a barragem de montante e galgamento para a barragem de jusante, utilizou-se o *software* HEC-HMS em sua versão 4.10.

### 3.3 Base topográfica do terreno

Um elemento muito importante para a execução do mapa de inundação é a topografia do terreno com resolução de 1 metro. Dado que, não havia um levantamento topográfico da região feito pela Universidade, optou-se por utilizar neste trabalho o Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR disponibilizado pela *Alaska Satellite Facility* (ASF), o qual possui resolução de 12,5 metros.

Para a obtenção de resultados mais condizentes, o MDE passou por uma interpolação no *software* ArcGIS 10.8®, de modo a obter uma resolução de 1,0 metro. Apesar do procedimento não proporcionar um maior detalhamento da área de estudo, este suaviza os resultados do terreno.

O MDE interpolado foi importado para a extensão RASMapper e georreferenciado de acordo com a zona UTM 23S, do sistema geodésico SIRGAS 2000. A partir dele foi gerado o terreno utilizado na simulação.

### 3.4 Geometria da simulação

Para a simulação bidimensional são necessários ao menos uma malha de fluxo (*2D Flow Area*) e as linhas de condição de contorno (*Boundary Conditions Lines*). 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 10km 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.

### 3.5 Cenários de ruptura

Uma vez que as barragens se encontram em cascata, a barragem situada no vale a jusante será diretamente impactada pela onda de ruptura hipotética da barragem situada a montante. São vários os cenários que podem ser simulados, considerando galgamento, *piping*, instabilização da fundação do maciço ou liquefação, seja esta estática ou dinâmica. Além disso, a ruptura hipotética pode ser considerada com o adicional de cheia (*rainny day*) ou sem (*sunny day*).

O cenário mais crítico seria o rompimento hipotético da primeira barragem por galgamento, considerando dia chuvoso com uma vazão advinda de uma precipitação extrema, que pode ser decamilenar ou Precipitação Máxima Provável (PMP), fazendo com que a

barragem de jusante também galgasse pelo galgamento da de montante. Porém, para a simulação desse cenário, seria necessário o cálculo da precipitação máxima provável a partir de dados pluviométricos de uma estação local.

Para o presente trabalho, simulou-se o rompimento hipotético em dia de sol (*piping*) para a barragem de montante (Barragem Condomínio Montante), o qual ocasionaria o rompimento hipotético por galgamento da “Barragem Condomínio”, estando ambas em sua capacidade total de armazenamento.

Mesmo que esse não seja o cenário mais crítico de ruptura hipotética, é o cenário de operação mais provável.

### **3.6 Definição da geometria da brecha**

A geometria da brecha foi calculada de acordo com os critérios de Froehlich (2016), o qual utiliza a Equação 1 do tópico 2.4.2 para o cálculo da largura média. Para o tempo de formação da brecha, utilizou-se o critério de Xu e Zhang (2009), cuja expressão se encontra no Quadro 4 do tópico 2.4.2. Ambos os autores obtiveram os melhores resultados em relação aos parâmetros para os quais foram utilizados seus critérios, justificando assim a escolha dos respectivos métodos.

Para aplicação destes métodos fez-se as seguintes considerações iniciais: (i) altura final da brecha igual à altura total do barramento -6m-; (ii) volume de água no reservatório igual à capacidade total para borda livre de 1m -Volume B1: 5.185,48m<sup>3</sup>, volume B2: 7.943,77m<sup>3</sup>, volume propagado: 13.129,25m<sup>3</sup>-; e (iii) *piping* para a barragem de montante e galgamento para a barragem de jusante.

### **3.7 Hidrograma de ruptura**

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

### 3.8 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 será 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, gerado de acordo com o tópico 3.7. Para o *outflow* utilizou-se a declividade do terreno (*normal deph*), 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 de acordo com o ilustrado pela Figura 8.

Para garantir a confiabilidade dos resultados foi utilizado o número de *Courant*, dado pela Equação 4. 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.

$$C_r = \frac{|u| \times \Delta t}{\Delta x} \quad (4)$$

Onde:

|u|: magnitude da velocidade da onda de inundação no ponto analisado(m/s);

$\Delta t$ : intervalo de tempo adotado para cálculo (s); e

$\Delta x$ : comprimento da face da célula adotada na simulação (m).

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

Figura 8 - Parâmetros do escoamento.

The screenshot displays the 'Unsteady Flow Analysis' window with the following settings:

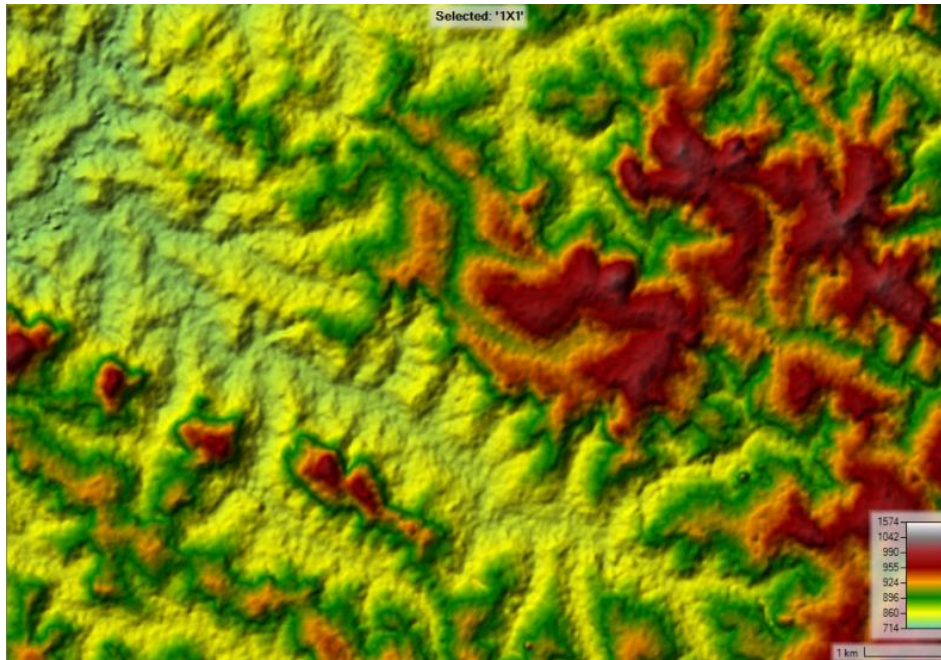
- Plan:** Plan 02
- Short ID:** Plan 01
- Geometry File:** GEOMETRIABARRAGENS2
- Unsteady Flow File:** UNSTEADYFLOW
- Programs to Run:**
  - Geometry Preprocessor
  - Unsteady Flow Simulation
    - Sediment
  - Post Processor
  - Floodplain Mapping
- Simulation Time Window:**
  - Starting Date:** 08SEP2022
  - Ending Date:** 08SEP2022
  - Starting Time:** 0000
  - Ending Time:** 2359
- Computation Settings:**
  - Computation Interval:** 1 Second
  - Hydrograph Output Interval:** 1 Minute
  - Mapping Output Interval:** 1 Minute
  - Detailed Output Interval:** 1 Minute
  - Project DSS Filename:** C:\Users\mlen\Desktop\HECRAS\ARQUIVORAS\BARRAGEN!
- Time Step is controlled by courant condition.**
- Compute** button

Fonte: Dos autores (2022).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

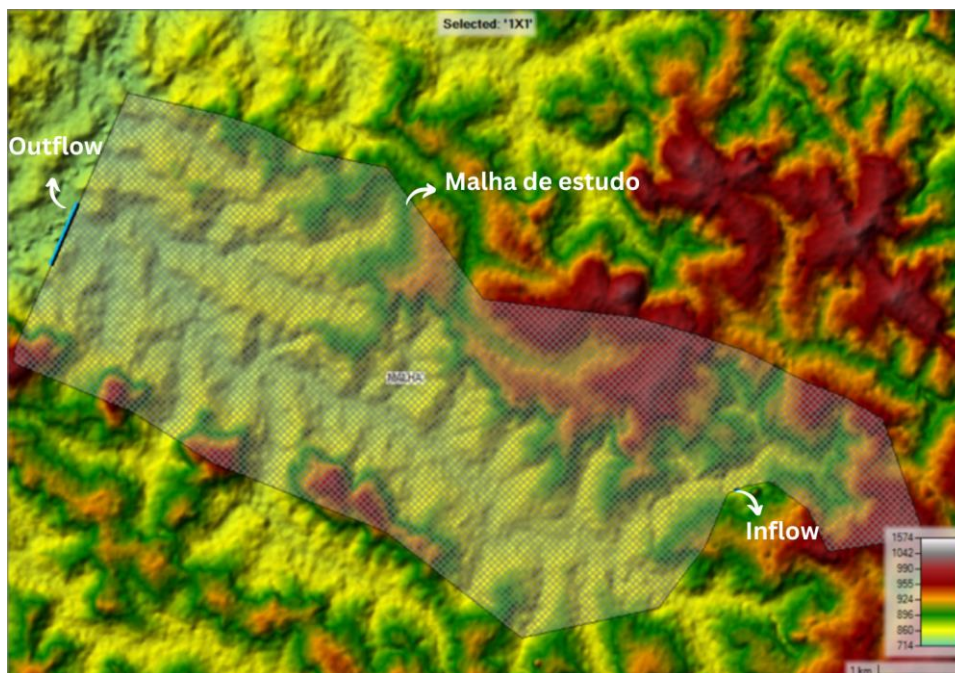
Do processo de criação da geometria de estudo na extensão RASMapper obteve-se como resultado o terreno e a geometria propriamente dita, apresentados nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 – Terreno – Valores em Metros.



Fonte: ASF DATASEARCH VERTEX (2022).

Figura 10 - Geometria da malha bidimensional criada, representação no terreno.



Fonte: Dos autores (2022).



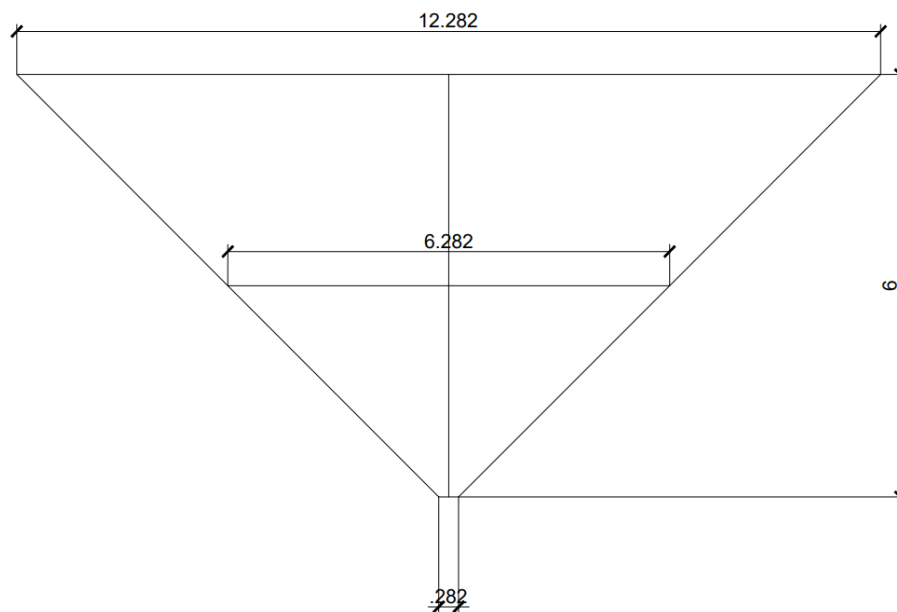
Figura 11 - Geometria da malha bidimensional criada – representação de satélite.



Fonte: Dos autores (2022).

Seguindo o modelo de Froehlich (2016), obteve-se a geometria da brecha conforme Figura 12.

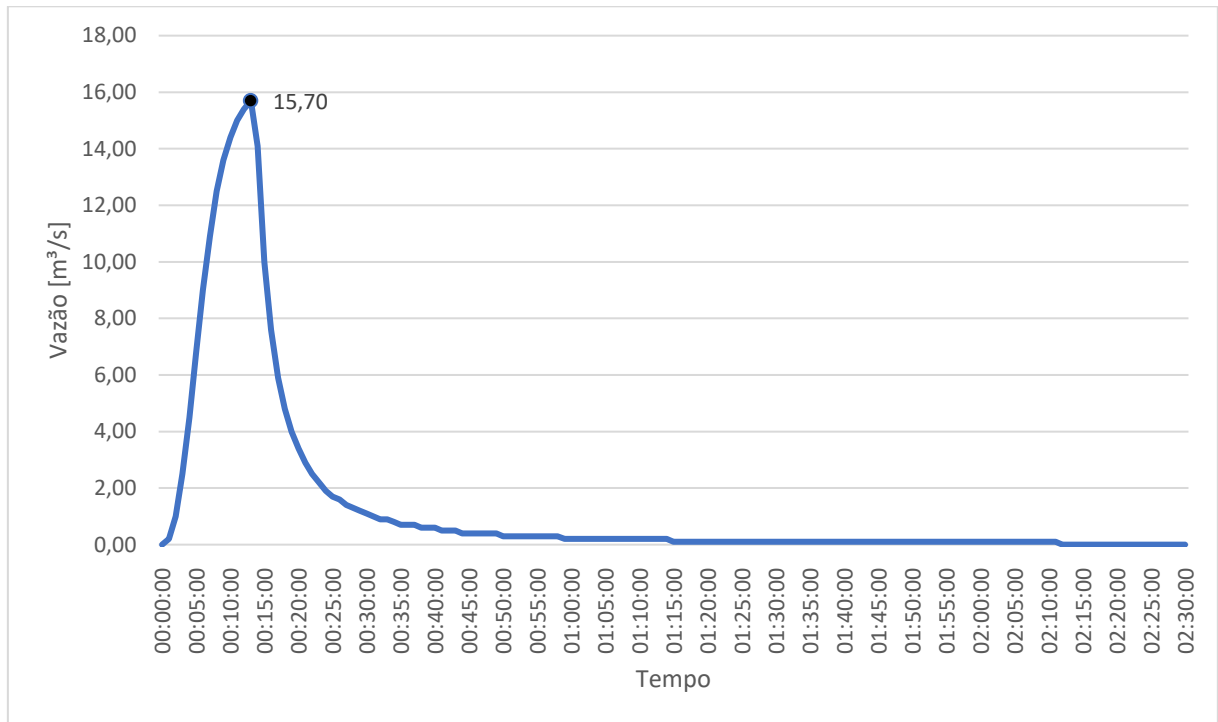
Figura 12 - Geometria da brecha Barragem Condomínio – Valores em metros.



Fonte: Dos autores (2022).

Utilizando o tempo de formação da brecha de Xu e Zhang (2009) e considerando todo o volume das duas barragens apenas na barragem de jusante (Barragem Condomínio), obteve-se o hidrograma de ruptura mostrado na Figura 13.

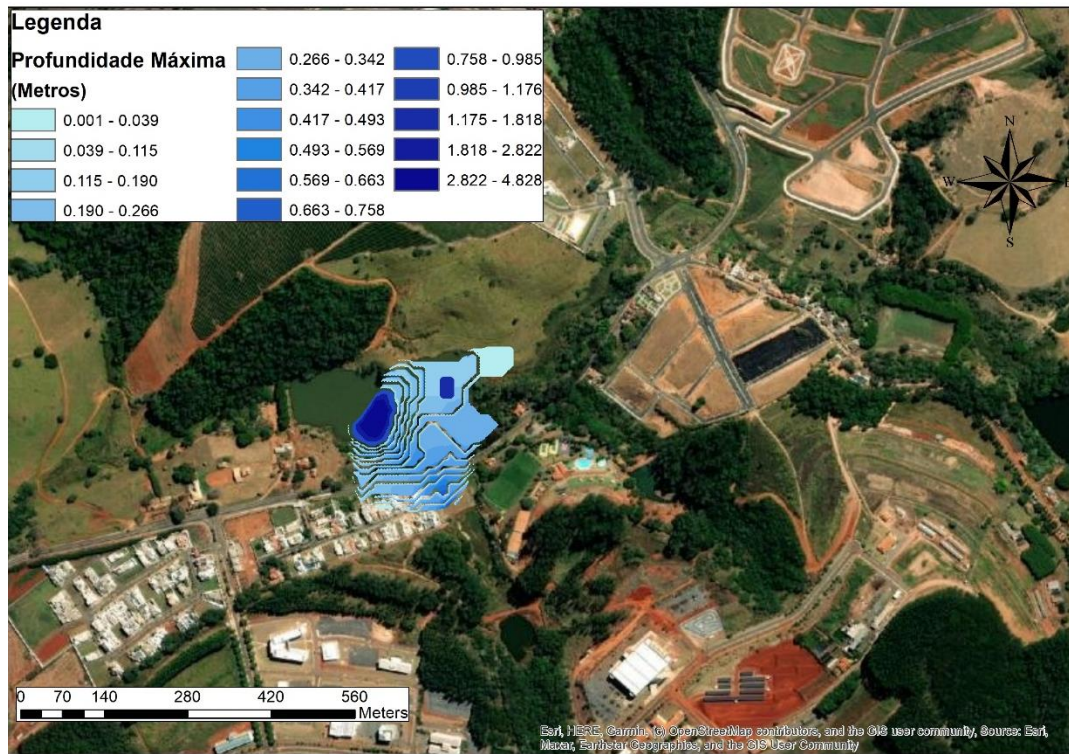
Figura 13 - Hidrograma de ruptura hipotética das Barragens do Condomínio.



Fonte: Dos autores (2022).

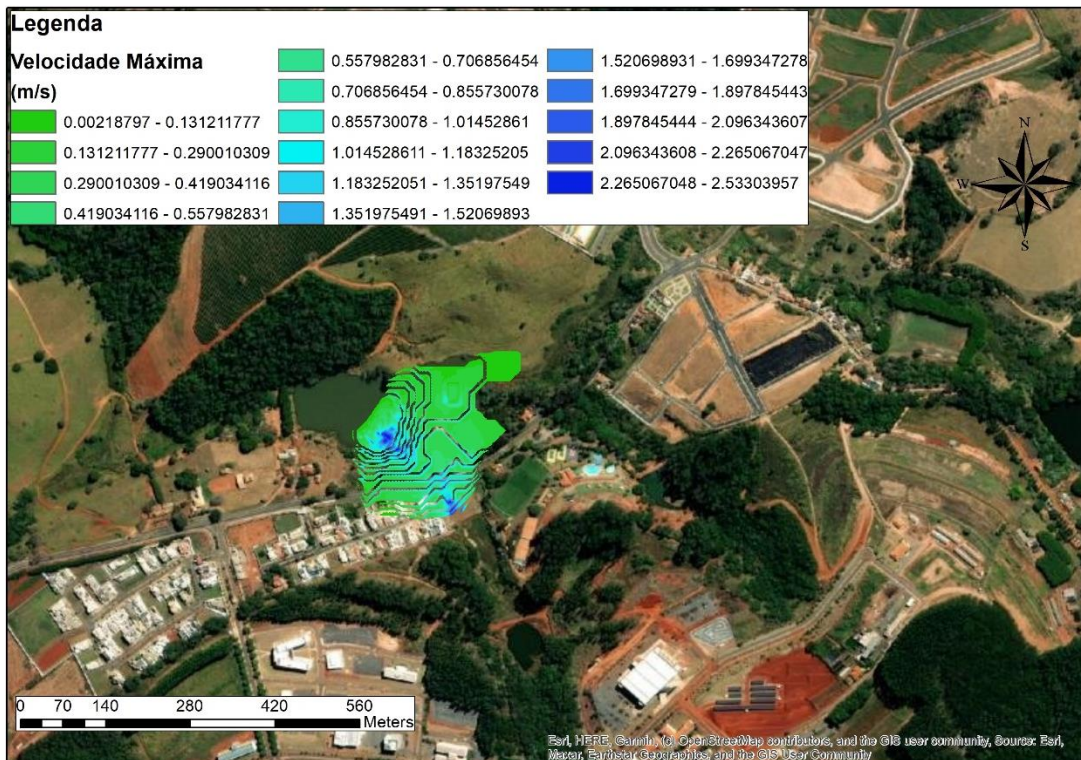
Como resultado da simulação no HEC-RAS obteve-se o mapa de inundação gerado pelo rompimento de ambas as barragens, conforme Figuras 14 a 16. As imagens foram trabalhadas utilizando-se o *software* ArcGis® para uma melhor visualização dos dados.

Figura 14 - Envoltória de inundação - Profundidade.



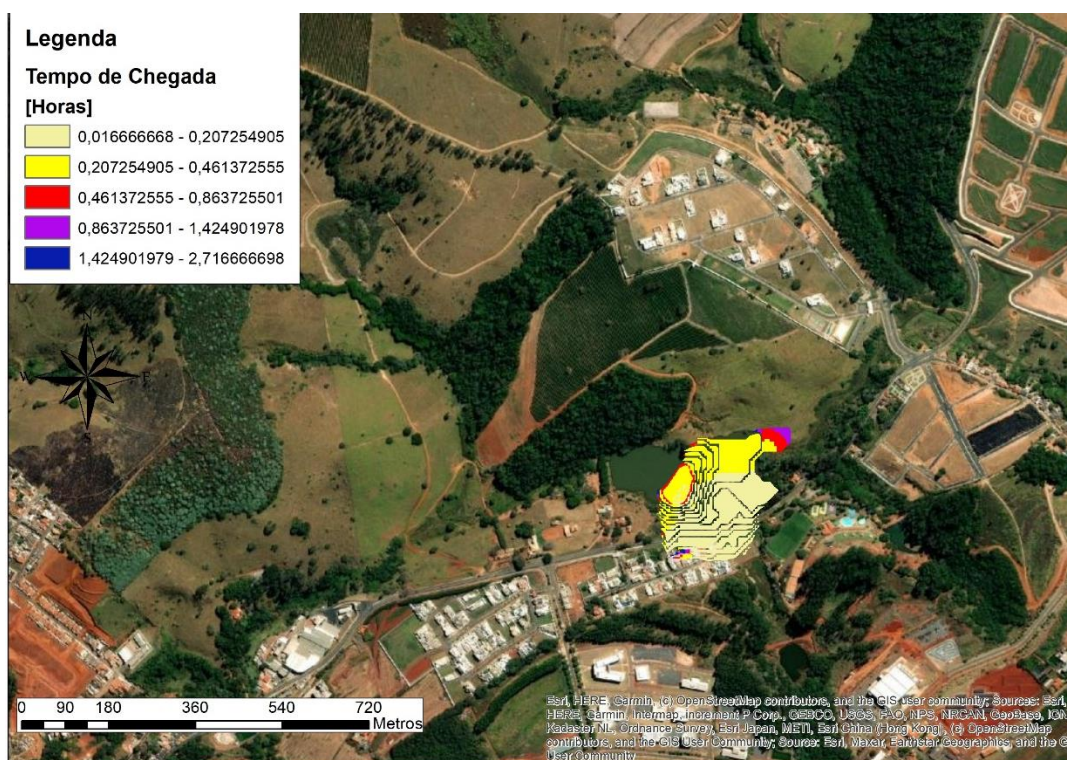
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 15 - Envoltória de inundação - Velocidade.



Fonte: Dos autores (2022).

Figura 16 - Envoltória de inundação - Tempo de chegada da onda.



Fonte: Dos autores (2022).

Como pode-se perceber, a mancha de inundação é pequena em relação à dimensão da geometria da simulação, porém, abrange pontos de infraestrutura, tal como a Avenida Luiz Gomide, e residências familiares, seja no Condomínio dos Ipês ou às margens da Avenida. É importante ressaltar que a simulação do rompimento hipotético foi feita sem considerar a Cheia Máxima Provável (CMP), advinda de um episódio de precipitação extrema sobre a subbacia à qual pertencem as barragens, logo a envoltória pode estar sendo minorada.

Deve-se ressaltar também que a equação de Froehlich (2016) utilizada para calcular a geometria da brecha, segundo o próprio autor, não fornece uma descrição completa ou detalhada do processo físico de erosão que ocorre quando uma barragem de terra falha, uma vez que não considera fatores tais como composição do solo, proteção de taludes, dentre outros. Segundo Froehlich (2016), o modelo fornece uma metodologia simplificada para estimar as consequências de um rompimento de barragens de terra.

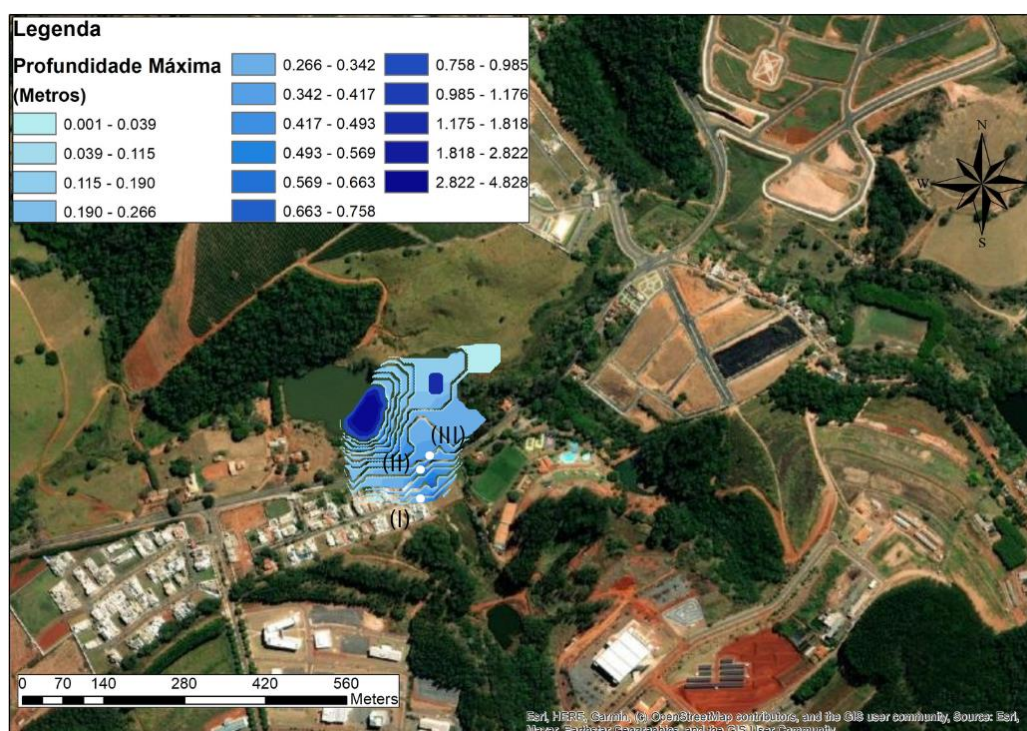
Para melhor analisar os resultados da simulação, tomou-se três pontos de destaque (FIGURA 17): (i) um dentro do Condomínio dos Ipês, que faz divisa com a UFLA; (ii) um ponto na Avenida Luiz Gomide, que liga a cidade de Lavras-MG à cidade de Ijaci-MG e que

também conecta alguns bairros da cidade de Lavras; e (iii) um terceiro ponto na região das residências que se encontram à margem da Avenida Luiz Gomide.

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 8.

Figura 17 - Pontos analisados.



Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 9 - Parâmetros para análise da inundação.

Pontos	Altura máxima (m)	Velocidade (m/s)	Tempo de chegada (h)
1	0,11	0,52	0,0833
2	0,33	1,05	0,1000
3	0,50	0,47	0,1167

Fonte: Dos autores (2022).

Como pode-se observar, a água atinge uma profundidade maior no ponto 3, que, dentre os demais, é o ponto mais baixo em relação às barragens, porém, nesse ponto a água chega com uma velocidade menor e com um tempo maior que nos demais locais analisados. O ponto que possui menor tempo de chegada é o primeiro, referente às residências do Condomínio dos Ipês, que se situa imediatamente à jusante da Barragem Condomínio, porém pode-se perceber que a lâmina d'água que atinge o mesmo é baixa. Pode-se perceber também que a maior velocidade de propagação da onda se dá na Avenida Luiz Gomide.

A partir dos dados obtidos pode-se realizar uma análise quanto ao risco hidrodinâmico, o qual é calculado pela Equação 5 e mede os danos que a onda de cheia pode causar, de acordo com os intervalos apresentados no Quadro 9.

$$RH = v * h \quad (5)$$

Onde:

v: Velocidade da onda (m/s);

h: Altura da onda (m);

Quadro 10 - Danos associados ao risco hidrodinâmico (Continua).

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

Quadro 11 - Danos associados ao risco hidrodinâmico (Conclusão).

H4	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas.	$V < 2,0 \text{ m/s};$ $H < 2,0 \text{ m};$ $(H \times V) \leq 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Verde Claro
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.	$V < 4,0 \text{ m/s};$ $H < 4,0 \text{ m};$ $(H \times V) \leq 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Amarelo
H6	Todos os tipos de veículos estão sujeitos a danos e perigoso para todas as pessoas. Todas as benfeitorias estão sujeitas a dano total.	$(H \times V) > 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Vermelho

\*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 10), pode-se observar que a situação mais crítica quanto ao risco hidrodinâmico se encontra no ponto 2, o qual possui maior velocidade máxima observada, onde veículos pequenos estão sujeitos a dano.

Apesar de o ponto 3 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 (QUADROS 11 e 12), pode-se perceber que apesar de

ser o ponto mais crítico, o ponto 2, assim como os demais, se enquadram no nível reduzido de risco (classe verde), tanto para seres humanos quanto para edificações.

Quadro 12 - Risco hidrodinâmico calculado.

Ponto analisado	Risco Hidrodinâmico (m <sup>2</sup> /s)
I	0,0572
II	0,3465
III	0,2350

Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 13 - Nível de perigo para seres humanos.

Nível	Classe	Inundação Estática – H (m)	Inundação Dinâmica – H x V (m <sup>2</sup> /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 14 - Nível de perigo para edificações.

Nível	Classe	Inundação Estática – H (m)	Inundação Dinâmica – H x V (m <sup>2</sup> /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).



Uma outra análise interessante a ser realizada é quanto 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 dos Ipês, e 8, às margens da Avenida Luiz Gomide. 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 Condomínio Montante e Condomínio.

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

A Resolução ANA nº 121, como dito no tópico 2.3.3 deste trabalho, define a ZAS como sendo a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos. Já de acordo com o disposto na Política Estadual de Segurança de Barragens de Minas Gerais, para a delimitação da extensão da ZAS, deve ser considerada a maior entre as duas distâncias a partir da barragem: (I) 10km (dez quilômetros) ao longo do curso do vale; (II) a porção do vale passível de ser atingida pela onda de inundação num prazo de trinta minutos.

Como é possível perceber, a delimitação da ZAS 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 de rompimento hipotético das barragens do Condomínio está representada em vermelho na Figura 18.



## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Conclusão**

Neste trabalho, realizou-se o estudo de ruptura hipotética das barragens Condomínio Montante e Condomínio, ambas situadas na UFLA, considerando *piping* como modo de falha da primeira, o que ocasiona o galgamento da segunda barragem. Foi considerada ruptura em dia de sol, ou seja, sem contribuição da CMP, 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 dos Ipês e às margens da Avenida Luiz Gomide. 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 é necessária 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.

### **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão de melhoria e continuidade para este trabalho, recomenda-se a utilização de uma base topográfica com melhor resolução (1x1m) que abranja toda a região do vale à jusante das barragens numa extensão de 10km.

O volume utilizado para o cálculo da brecha e do hidrograma de ruptura hipotética não corresponde ao volume real de água nas barragens, uma vez que a Barragem Condomínio já foi esvaziada e a Barragem Condomínio Montante também passa por um processo de esvaziamento. Para a simulação, utilizou-se o volume que consta nos documentos cedidos pela DQMA-UFLA, porém recomenda-se a realização de uma batimetria nas barragens de modo a mensurar o volume real de água contida em cada barragem.

O cenário simulado, apesar de mais factível, não representa o pior cenário possível. Este é dado pelo rompimento hipotético em dia de chuva, ou galgamento, de ambas as barragens devido a uma chuva decamilenar, que deve ser calculada de acordo com o histórico de chuvas da região. Logo, seria interessante a realização da simulação para o cenário mais crítico,

fazendo-se o cálculo da CMP, baseado nos histogramas da estação mais próxima, para obtenção do hidrograma de ruptura hipotética.

Sugere-se também a simulação simultaneamente 1D e 2D, para uma maior precisão dos resultados obtidos, bem como uma análise referente ao risco hidrodinâmico para a envoltória de inundação hipotética encontrada.

É imprescindível ressaltar que o mapa de inundação gerado nesse trabalho é de uso estritamente acadêmico, não devendo ser utilizado para outros fins, uma vez que foram realizadas simplificações em sua simulação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

ASF DATA SEARCH VERTEX. Alos Palsar. 2015. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 25 ago. 2022.

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.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Resolução nº 121, de 9 de maio de 2022. [Altera a Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017]. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. 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]. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF.

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. Brasília, DF.

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). Brasília, DF.

CAMPOS, Rubens Gomes Dias. **Proposta de uma metodologia para obtenção de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata utilizando modelagem física [recurso eletrônico]**. 2020. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2020.

COLLISCHONN, W. Análise do Rompimento da Barragem de Enerstina. 213 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 1997.

COUTINHO, Marlon Marques. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 2015. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DEPARTAMENTO DO MEIO AMBIENTE DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. **Formulário técnico para cadastro de barragem**. [Lavras: UFLA], 2022.

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.

FAN, F. M. *et al.* Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.

FARIA, Fábio *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.

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.

FROEHLICH, D.C. Embankment Dam Breach Parameters Revisited. In: **Water Resources Engineering, ASCE**. p. 887-891. 1995.

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.

JULIASTUTI; SETYANDITO, Oki. Dam break analysis and flood inundation map of Krisak dam for emergency action plan. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2017. p. 100005.

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. 210 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

MARANGONI, T. T. *et al.* A utilização do HEC-RAS determinar cota de inundação na ruptura hipotética de uma barragem – estudo de caso da PCH Salto Buriti. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXII, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017, p. 1-8.

MASCARENHAS, F. C. B. Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens. 291 f. 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.

MINAS GERAIS. Coordenadoria Estadual de Defesa Civil. Ofício Circular nº02, de 26 de junho de 2019. [Solicitação de informações complementares ao PAEBM, preenchimento do questionário de pesquisa e encaminhamento de Termo de Referência para elaboração dos estudos de cenários de ruptura hipotética de barragens]. **Gabinete Militar do Governador**. Belo Horizonte, MG.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 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]. **Diário do Executivo**. Belo Horizonte, MG.

MINAS GERAIS. **Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019**. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens. Belo Horizonte, MG.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (MPMG). Minas Gerais. **Ata de reunião – Ref: TAC Dam Break**, realizada no dia 07 de janeiro de 2020.

MOTA, K. R. R. **Rompimento hipotético 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, Uberlândia, 2017.

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.

PEREIRA, Carlos Eugênio et al. Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. **Recursos Hídricos**, v. 38, n. 1, 2017.

RODRIGUES, Sofia Ana Batista. **Alqueva e Foz Côa: as memórias e o espaço-contributos cinematográficos**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora, Évora, 2014.

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

ROSSI, C. L. C. U. **Proposta de abordagem simplificada para avaliação dos efeitos oriundos da ruptura de barragens**. 2020. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SMITH, G., DAVEY, E., COX, R. (2014). **Flood hazard** (WRL Technical Report 2014/07). Sydney: UNSW.

TERCINI, Olavo Tozete; ANDREETTA, Arthur Bucciarelli; JUNIOR, Euclides Cestari. ESTUDOS DE DAM BREAK.

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.

WISEU, T.; MARTINS, R. Safety risks of small dams. In- BERGA, L. (Ed.) Dam Safety. Rotterdam- Balkema, 1998. p. 283-288.