

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SIMULAÇÃO DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA DO BAIRRO SÃO PEDRO EM JUIZ DE FORA-MG

Marcos Paulo Santos da Silva¹; Ana Carolina da Silva Araujo² Armando Moreno Neto³ & Celso Bandeira de Melo Ribeiro⁴

Abstract: The São Pedro's dam, popularly known as the São Pedro Reservoir, is a water storage dam located in the western region of the municipality of Juiz de Fora - MG and was built in 1963 for private use. Currently, the facility is managed by the Municipal Sanitation Company (CESAMA) and is part of the municipality's supply system. The soils dam is 200 meters long and 5 meters high, with a layer of water area of 0.04 km². Its watershed has an area of 13 km² and is part of the Paraíba do Sul River basin. Downstream of this dam there is a densely occupied region by the resident population in the urban area of the municipality, which could suffer serious damage with a possible rupture. Thus, this present work aims to evaluate the flood wave behavior in the downstream valley of the dam using the HEC-RAS 6.5 software, analyzing the extent of the flood stain, depth, velocity, arrival time and the potential damage associated with this damming. It is expected, with this, to contribute with managers and public agencies in the adoption of measures to mitigate problems in case of disaster.

Resumo: A barragem de São Pedro, popularmente conhecida como Represa de São Pedro, é uma barragem de acumulação de água localizada na região oeste do município de Juiz de Fora - MG e foi construída em 1963 para uso privado. Atualmente o equipamento é gerido pela Companhia de Saneamento Municipal (CESAMA) e integra o sistema de abastecimento do município. O barramento de terra possui 200 metros de comprimento e 5 metros de altura, com uma área de espelho d'água de 0,04 km². Sua bacia hidrográfica possui uma área de 13 km² e faz parte da bacia do Rio Paraíba do Sul. À jusante desta barragem existe uma região densamente ocupada pela população residente na área urbana do município, podendo sofrer graves prejuízos com um possível rompimento. Desta forma, este presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento onda de cheia no vale de jusante da barragem utilizando o software HEC-RAS 6.6, analisando o alcance da mancha de inundação, bem como profundidade, velocidade e tempo de chegada. Espera-se, com isto, contribuir com os gestores e com órgãos públicos na adoção de medidas para mitigação de problemas em caso de desastres.

Palavras-Chave – Modelagem Hidrodinâmica; Rompimento Hipotético; Barragens

1) Graduando da Universidade Federal de Juiz de Fora, engenhariamarcos.silva@gmail.com

2) Mestranda em Geotecnia na Universidade Federal do Rio de Janeiro, anaraaujo887@gmail.com

3) Graduando da Universidade Federal de Juiz de Fora, armandomoreno.eng@gmail.com

4) Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFJF (DESA/UFJF), celso.bandeira@ufjf.br

INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que as barragens são estruturas de grande importância estrutural e econômica para a humanidade. Neste contexto, é de suma importância a garantia do seu adequado funcionamento a fim de se garantir a segurança das populações que vivem em seu entorno.

Como forma de assegurar as condições de segurança das barragens ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle dessas condições (SANTOS, 2019). Com este intuito, através da Lei 12334 de 2010, foi estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que trata de barragens com a finalidade de acumulação de água, disposição de rejeitos e resíduos industriais. Ela institui ainda a elaboração do Plano de Ação Emergencial (PAE), sob competência do empreendedor com a participação de órgãos de proteção e defesa civil. Este documento deve estabelecer as ações a serem executadas pelo empreendedor na hipótese de o nível de segurança da barragem enquadrar-se como emergência, sendo obrigatória em casos em que o Dano Potencial Associado (DPA) é classificado como alto (BRASIL, 2010).

A fim de se avaliar os danos a jusante da barragem é preciso delimitar zonas que ficarão inundadas pela cheia ocasionada de sua ruptura e, com esta finalidade, se faz necessária a modelagem hidrodinâmica da onda de cheia. Por serem conceitualmente mais corretos, recomenda-se o uso de modelos hidrodinâmicos, de que constituem, talvez, os exemplos mais conhecidos os modelos DAMBRK (BOSS DAMBRK, 1991) ou o software de domínio público HEC-RAS (ANA, 2016).

Desta forma, neste estudo buscou-se compreender o comportamento da onda de cheia do rompimento hipotético da represa de São Pedro, localizada na zona oeste do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. A escolha por esta barragem se deu pela proximidade desta estrutura com a zona urbana, mais especificamente do bairro São Pedro. Assim, pretende-se entender o alcance da onda de cheia, causada por um possível rompimento da barragem, na região a jusante, utilizando-se o software HEC-RAS 6.6. Serão analisados o alcance da mancha de inundação, bem como a profundidade, velocidade e tempo de chegada. Espera-se, com isto, contribuir com os gestores e com órgãos públicos na adoção de medidas para mitigação de problemas em casos de desastre, bem como com o conhecimento da população da região sobre os riscos da ocupação desordenada da região no entorno da represa.

REGIÃO DE ESTUDO

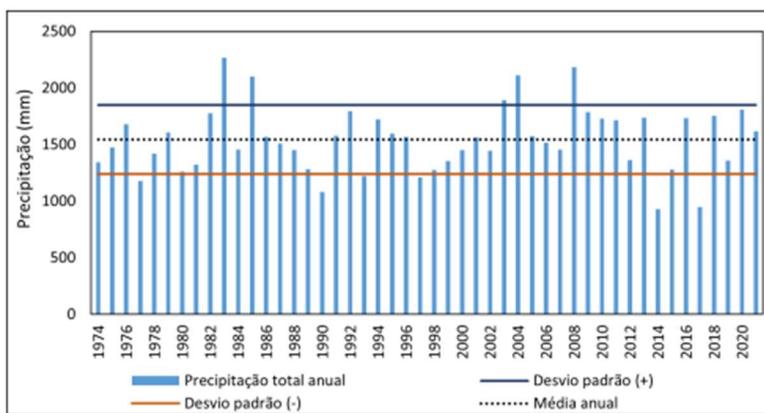
Segundo Duarte (1998), Juiz de Fora está inserida na Bacia do Rio Paraibuna que é afluente do Rio Paraíba do Sul. O município localiza-se na Região da Mantiqueira Setentrional, com média de 800 a 900 metros de altitude. Geologicamente situa-se no contexto do segmento central da Faixa Ribeira, na borda sul/sudeste do cráton do São Francisco.

A área urbana de Juiz de Fora assenta-se sobre rochas diversas, com destaque para duas grandes formações: o Complexo Juiz de Fora a sudeste e o Complexo da Mantiqueira ao norte. Essas unidades, caracterizadas por uma grande variedade de rochas metamórficas (que foram, ao longo do tempo, submetidas à inúmeros processos de dobramentos, falhamentos e fraturamentos), são separados por um extenso sistema de falhamentos de empurrão, conferindo à região uma significativa fragilidade geológica (ROCHA, 2005). Segundo o mesmo autor, quanto aos solos, constata-se a presença de Latossolos vermelhoamarelos álicos e distróficos, Cambissolos e Neossolos distróficos e Gleissolos. Do ponto de vista geomorfológico, observa-se que o relevo é bastante dissecado, tornando-se acidentado, declivoso e de aspecto serrano. Esta configuração se apresenta bastante instável, favorecendo movimentos de massas e alta ocorrência de erosão laminar nos topo de morros

(GUIMARÃES *et al.*, 2018). Rocha (2005) destaca ainda a presença de formas convexas nas vertentes, responsáveis pela formação de planícies intermontanas e feições em anfiteatro, associadas a processos erosivos. A rede hidrográfica encontra-se encaixada nos lineamentos estruturais que segmentam a área. A cobertura vegetal é composta predominantemente por pastagens e capoeiras, observando-se também uma ocupação humana intensa nos entornos da represa.

Com relação ao clima, Ferreira (2023) destaca que Juiz de Fora se localiza em uma área de clima tropical com duas estações definidas pela distribuição das precipitações, sendo outono e inverno secos, com 20% da precipitação anual e primavera e verão são chuvosos concentrando os 80% restante das precipitações anuais. Analisando-se a série de dados pluviométricos do município no período de 1974 a 2021 observa-se um valor médio anual de 1542,9 mm, com um desvio padrão de 304,5 mm para a série (FERREIRA, 2023). A figura 1 mostra os totais pluviométricos anuais para Juiz de Fora no período de 1974 a 2021.

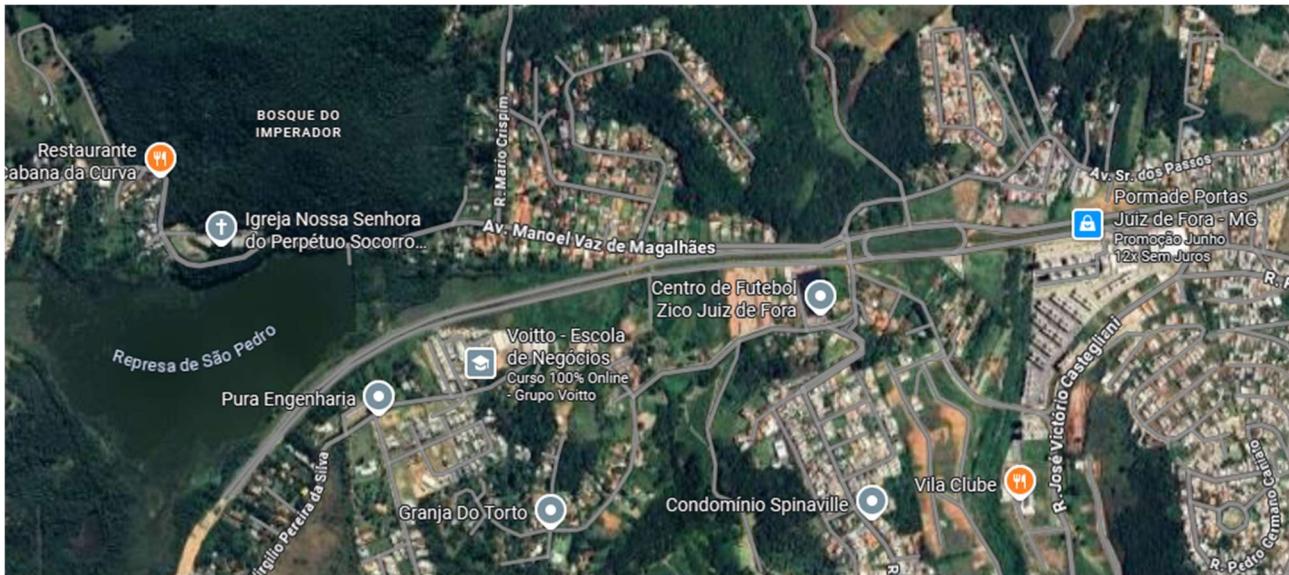
Figura 1: Totais Pluviométricos do Município de Juiz de Fora no período de 1974 a 2021 (Ferreira, 2023)



Assim, neste contexto, localiza-se a Represa de São Pedro, também conhecida como Represa dos Ingleses ou Cruzeiro de Santo Antônio. A barragem fica, mais especificamente, no bairro homônimo de São Pedro, zona oeste do município. O barramento encontra-se em área particular cedida ao município, sendo seus principais afluentes os córregos de São Pedro e Grotão do Pinto. A barragem é de pequeno porte, possuindo 200 metros de comprimento e 5 metros de altura, com uma área de espelho d'água 0,04 km². A estação de tratamento instalada no local tem capacidade de produção de 120 litros de água por segundo e abastece cerca de 8% do município (CESAMA, 2019).

A bacia do córrego São Pedro é uma das 156 sub-bacias que drenam a área urbana de Juiz de Fora. Esta bacia apresenta um dos mais ricos processos de ocupação urbana e consolidação territorial. Sua ocupação pode ser dividida em duas fases principais, dados pelas décadas de 1960/1970, onde a partir deste período uma série de intervenções na estrutura urbana da cidade incentivaram a ocupação local (MACHADO, 2010). Ainda segundo o autor, a implantação da Avenida Independência, ligando a zona oeste com o centro, a instalação da UFJF no bairro São Pedro e elaboração do Projeto Cidade Alta, visando a ocupação desta região, a localização do aeroporto e do estádio municipal, além da implementação da Rodovia BR 040, tornou toda a região uma área de franco processo de expansão urbana. A figura 2 apresenta uma imagem de satélite com o atual cenário de ocupação da região da Represa.

Figura 2: Ocupação da região da Represa de São Pedro



Da figura 2 é possível observar que atualmente há uma densa região de ocupação a jusante da barragem, o que é preocupante em casos de desastres, fazendo assim com que a Represa de São Pedro seja classificada como de DPA alto. Destaca-se a região, que aqui será denominada como imediatamente a jusante da barragem, onde existem imóveis de alto padrão e empreendimentos esportivos, bem como equipamentos públicos de esporte e lazer.

METODOLOGIA

Para a simulação dos cenários de ruptura hipotética foi utilizado o software HEC-RAS 6.6. Muitos pesquisadores compararam modelos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais, entre os quais o HEC-RAS é o modelo mais comumente usado para análise de rompimento de barragens devido à sua previsão confiável e por ser uma ferramenta de código aberto (BARATH *et al.*, 2021).

Na delimitação da bacia foi utilizado o modelo digital do terreno disponível no acervo do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Faculdade de Engenharia da UFJF, que compreende toda área da bacia até sua foz no rio Paraibuna.

Além do MDT, foi utilizada também a curva cota volume do reservatório, disponibilizada pela Companhia de Saneamento Municipal (CESAMA) para a modelagem do nível d'água, sendo o nível inicial estimado na cota 846, com um volume de 100.000,00 m³ e o volume antes do galgamento de 1.171.000,00 m³, dando-se na cota 850. O tempo total de simulação utilizado foi de 7 dias.

Salienta-se que para esta simulação não foram computadas variações no coeficiente de Manning ao longo da região, adotando-se o valor constante de 0,3 para toda a região. Esta decisão baseou-se na premissa de que o rompimento afetaria predominantemente uma região de zona urbana. Para tal, foram utilizados os valores adotados por Cunha *et al.* (2023), em seu estudo de análise de sensibilidade do coeficiente de Manning, devido à sua experiência em trabalhos anteriores.

Com relação ao mecanismo de ruptura, foram considerados dois cenários de rompimento que representam as análises de dia de sol e dia chuvoso, como sugere a NBR 17188:2024. A saber: ruptura por *piping* e por galgamento, respectivamente.

O processo de formação da brecha de ruptura foi estabelecido de acordo com o proposto no Guia de orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência (PAE), proposto pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no seu quarto volume.

De acordo com este Guia, uma brecha é caracterizada por três parâmetros: sua configuração geométrica, as suas dimensões (largura) e o tempo de ruptura, fatores que em conjunto influenciam os valores das vazões, dos níveis e dos tempos de chegada da onda de inundação, afetando os intervalos de tempo disponíveis para a implementação do PAE (ANA, 2016).

A seguir, nas figuras 3 e 4, são apresentadas a seção típica da brecha e os valores característicos para a brecha de ruptura, respectivamente.

Figura 3: Seção típica da brecha de ruptura (ANA, 2016)

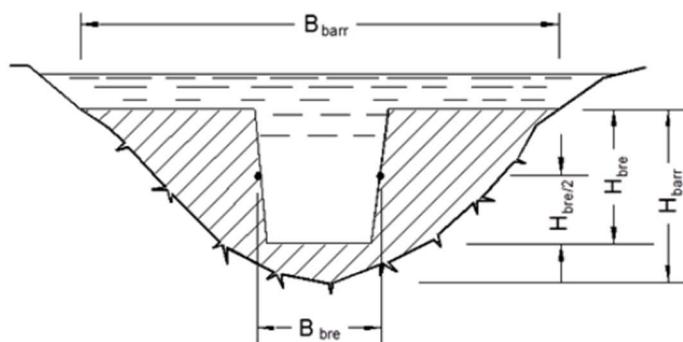


Figura 4: Valores característicos para brechas de ruptura de diferentes tipos de barragem (ANA, 2016)

Tipo de barragem	Largura média da brecha (\bar{B}_{bre})	Componente horizontal da inclinação dos taludes da brecha (IV:ZH)	Tempo de ruptura (horas)
Concreto em arco	Todo o desenvolvimento da barragem ou $\bar{B}_{bre} \geq 0,8 B_{barr}$	$0 \leq Z \leq$ Inclinação do vale	$t_{rot} \leq 0,1$
Concreto gravidade	Um múltiplo de vários blocos, sendo usualmente, $\bar{B}_{bre} \leq 0,5 B_{barr}$	$Z=0$	$0,1 \leq t_{rot} \leq 0,3$
Terra/Enrocamento	$H_{bar} / \bar{B}_{bre} \leq 5 H_{barr}$	$1/4 \leq Z \leq 1$	$0,5 \leq t_{rot} \leq 3$
Estérveis de minas	$\bar{B}_{bre} \leq 0,8 H_{barr}$	$1 \leq Z \leq 2$	$0,1 \leq t_{rot} \leq 0,3$

Logo, foi definida uma largura da brecha de 25 metros, com altura igual a altura da barragem (5 metros), componente horizontal da inclinação dos taludes da brecha igual a 1 metro e tempo de ruptura de 0,5 horas. Com os resultados das simulações, foram feitas as análises do comportamento da onda de cheia e delimitação da mancha de ruptura. Os resultados serão apresentados a seguir.

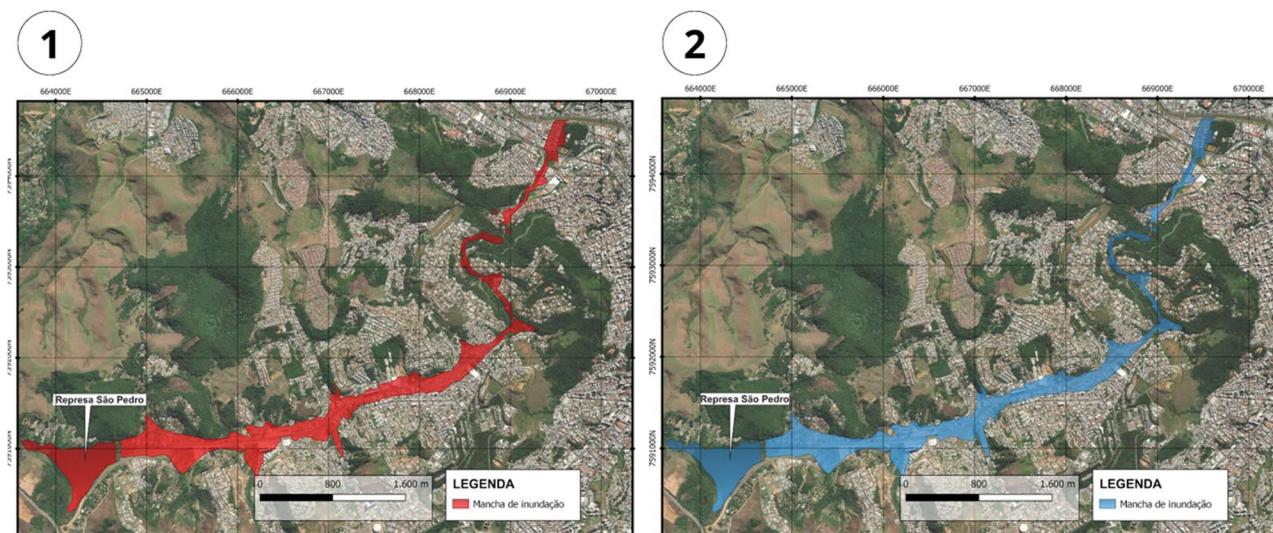
Ademais, foi utilizada uma malha de 50x50 metros. A modelagem realizada foi bidimensional, que segundo o USACE (2024) consiste em uma melhor abordagem ao modelar situações de galgamento/rompimento de diques e planícies de inundação em que a água pode escoar em várias direções. O regime de fluxo considerado foi o não permanente (*Unsteady flow*). A equação definida para a realização dos cálculos foi a equação de Águas Rasas, que segundo o USACE (2024)

na modelagem bidimensional do rompimento de barragens, deve ser utilizada, pois é capaz de representar, com precisão, a geração de ondas de inundação altamente dinâmicas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

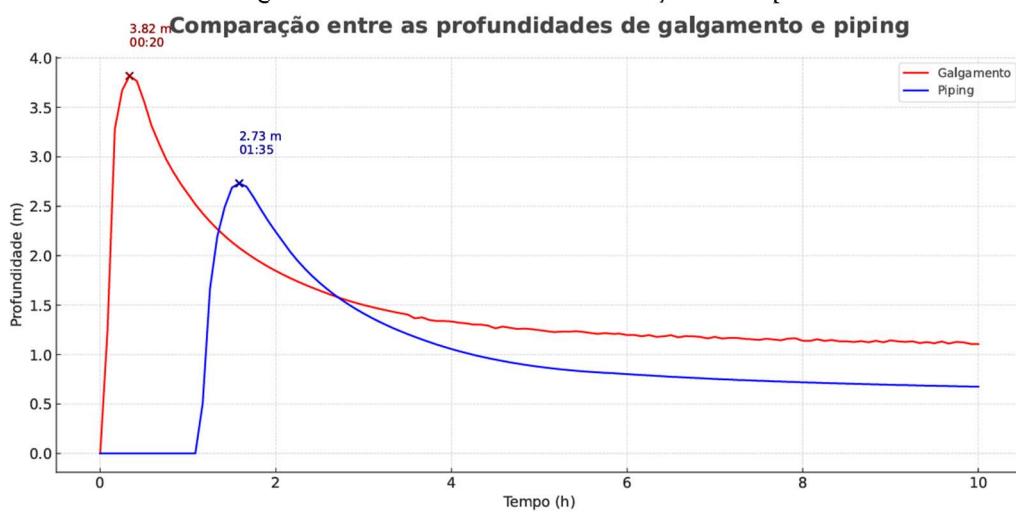
De posse dos resultados, inicialmente analisou-se a distribuição espacial das manchas de ruptura por galgamento e por *piping* e observou-se que não há grandes diferenças entre a distribuição das manchas e que estas distribuem se ao longo da zona urbana do bairro São Pedro. Porém, nesta análise foi possível observar que há um grande perigo de inundação para a região habitada imediatamente a jusante da barragem localizadas as margens da Avenida Manoel Vaz de Magalhães e por isso serão o foco das análises realizadas. Na figura 5 é possível observar a distribuição das manchas de rupturas ocasionadas pelo rompimento por galgamento e por *piping*, respectivamente.

Figura 5: Mancha de ruptura da barragem de São Pedro: (1) Cenário Galgamento; (2) Cenário *Piping*



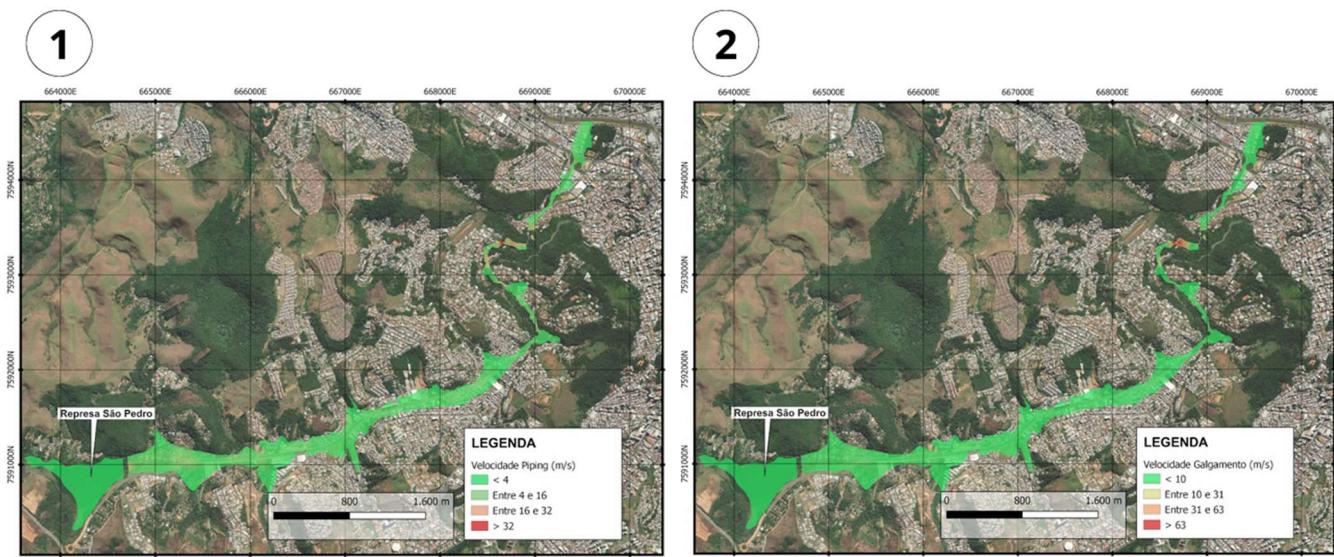
Foram traçados gráficos comparativos com os valores de profundidade das ondas em função do tempo de chegada na região imediatamente a jusante. Observou-se que a profundidade de pico para o galgamento nesta área foi de 3,82 m, que se dá 20 minutos após o rompimento. Para o cenário *piping*, observou-se que este pico se dá de forma retardada, em relação ao tempo observado para o galgamento, sendo a profundidade de pico de 2,73 m e que acontece 01:35 horas após o rompimento. Esses dados são de suma importância, uma vez que mostram que a passagem da onda de cheia, ocasionada da ruptura da barragem, pode alcançar valores significativos de profundidade. Estas informações podem auxiliar na evacuação dos locais de risco, sendo de grande importância na preservação de vidas. A figura 6 mostra o gráfico da profundidade da onda na região imediatamente a jusante da barragem, com destaque para os valores de pico.

Figura 6: Profundidade da onda em função do tempo



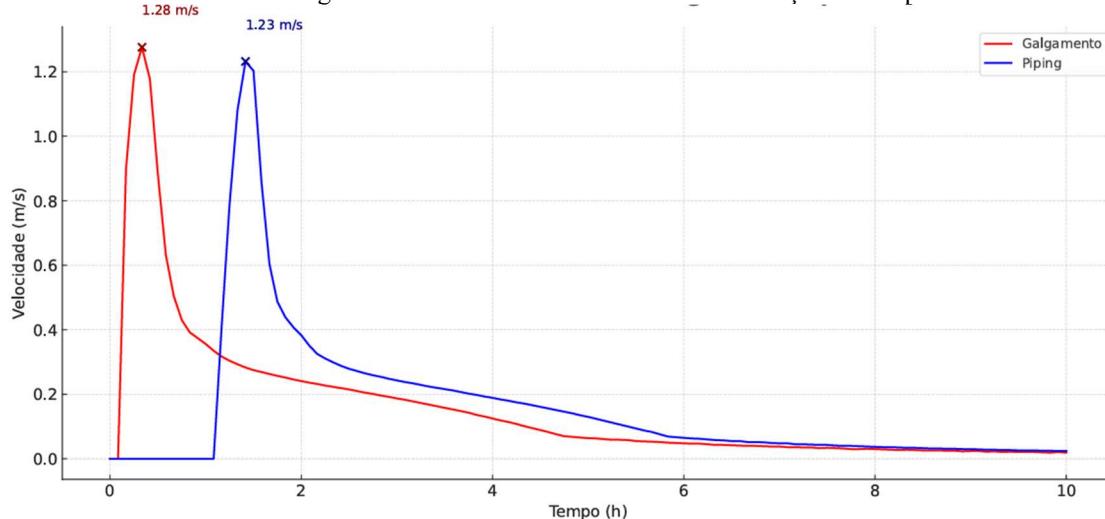
Analisou-se ainda a velocidade da onda de cheia com o intuito de se entender o risco associado a sua passagem. Segundo Wright (2008), inundações com profundidade de lâmina d'água superior a 0,6 m ou velocidade de fluxo maior que 1,2 m/s configuram risco significativo para pessoas, sendo este um fator de grande relevância a ser considerado. No mapa da figura 7 é possível observar a distribuição das velocidades ao longo da mancha de ruptura.

Figura 7: Distribuição de velocidades da onda de cheia ao longo da região a jusante da barragem: (1) Cenário Piping; (2) Cenário Galgamento



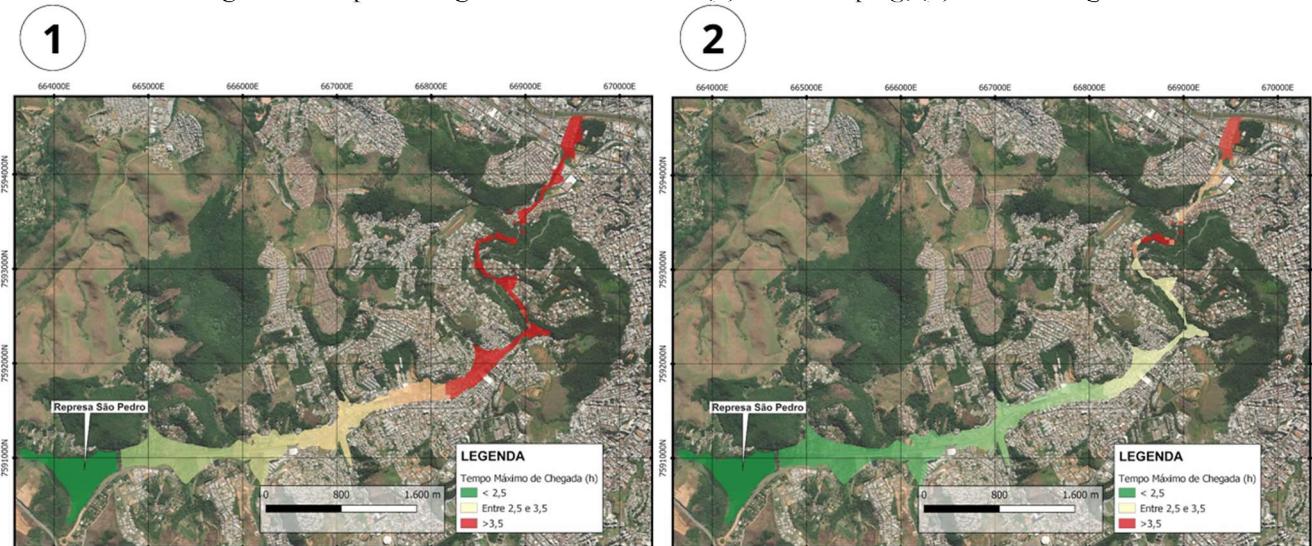
No gráfico da figura 8 é possível observar as velocidades da onda ao longo na região imediatamente a jusante da barragem, onde é possível observar que no pico a onda pode atingir velocidades maiores que 1,2 m/s para os dois cenários, podendo causar danos físicos e materiais para a população ali instalada.

Figura 8: Velocidade da onda de cheia em função do tempo



Outra análise importante diz respeito ao tempo de chegada da onda cheia nos locais afetados. Com essa informação é possível que a população afetada entenda quanto tempo tem para evacuar a zona atingida, caso necessário. Desta forma, foram mapeados os tempos de chegada que podem ser observados na figura 9.

Figura 9: Tempo de chegada da onda de cheia: (1) Cenário Piping; (2) Cenário Galgamento



CONCLUSÃO

Compreende-se que o estudo de modelagem hidrodinâmica deve ser o mais fidedigno à realidade, dada a importância da utilização dos resultados para previsões, estimativas e definição das ações a serem tomadas (SANTOS *et al.*, 2019). Por esse motivo, salienta-se que os estudos realizados buscaram o pior cenário possível dentre as configurações analisadas e utilizaram as informações disponibilizadas e simplificações para tal, como demonstrado anteriormente.

Porém, como trata-se de um estudo de caráter preliminar e analisando-se a distribuição espacial da área afetada pelo possível rompimento desta estrutura, é possível dizer que os resultados obtidos são relevantes quanto as informações sobre as áreas afetadas e pode servir de base para tomada de decisão das autoridades competentes, bem como no auxílio a elaboração e composição do PAE.

O foco das análises dos resultados das simulações se deu nas regiões nomeadas como imediatamente a jusante da barragem, pois entende-se que esta área seria a mais afetada e de maior iminência de danos físicos e materiais com um possível rompimento. Percebe-se, também, que não há uma grande preocupação com a ocupação desta área, já que encontra-se em expansão e não há movimentos por parte dos entes públicos em coibir este movimento. Porém, é possível perceber que, além desta área de maior risco, boa parte da área afetada encontra-se em zona urbanizada, podendo representar riscos, ainda que pequenos, e não há na região encontrada na simulação nenhuma menção aos riscos iminentes, como equipamentos de aviso sonoro ou placas de sinalização de área de risco, tornando um possível rompimento um problema ainda mais grave.

Por fim, sugere-se que em estudos posteriores sejam feitas análises com variação do Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de uso e ocupação do solo na área afetada, buscando representar a influência deste fator na distribuição espacial da mancha de inundação. Além disso, sugere-se também a análises de áreas localizadas mais a jusante, buscando entender os riscos associados ao rompimento na zona mais urbanizada, aliando a necessidade de sinalização de risco nestas áreas, buscando criar medidas de prevenção baseadas na evacuação e comunicação de riscos, baseados nos tempos de chegadas obtidos.

REFERÊNCIAS

A BHARATH,; SHIVAPUR, Anand V; HIREMATH, C G; MADDAMSETTY, Ramesh. Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: a case study of hidkal dam, karnataka state, india. Environmental Challenges, [S.L.], v. 5, p. 100401, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2021.100401>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17188: Barragens — Ruptura hipotética — Diretrizes. 1 ed. Rio de Janeiro: 2024. 14 p.

ANA. 2016. Agência Nacional de Águas. *Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE*. Relatório, vol. IV. Brasília. 129 p.

BRASIL. Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. *Política Nacional de Segurança de Barragens*. Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 23 jun. 2025.

CESAMA (Juiz de Fora). *Mananciais: represa de são pedro. Represa de São Pedro*. 2019. Disponível em: <https://www.cesama.com.br/mananciais/represa-de-sao-pedro-2>. Acesso em: 23 jun. 2025.

CUNHA, Gabriel Fonseca *et al.* Análise de Sensibilidade do Parâmetro de Rugosidade de Manning em Modelos Sintéticos de Vale para Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens (Dam Break). In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023, Aracaju. Anais [...]. Aracaju: ., 2023.

DUARTE, B. P. *Evolução tectônica dos ortognaisses dos complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na região de Juiz de Fora, MG: geologia, petrologia e geoquímica.* 1998. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

GUIMARÃES, I. P. M. B.; DIAS, P. H. R.; FELIPPE, M. F. *Áreas úmidas de cabeceira de drenagem: estudo panorâmico na bacia hidrográfica de contribuição da represa de São Pedro, Juiz de Fora - MG.* In: SEMINÁRIO DA PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, 6., 2018, Juiz de Fora, MG. Anais [...]. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018. p. 251-256

MACHADO, P. J. O. *A bacia hidrográfica do Córrego São Pedro (BHCSP).* In: MACHADO, P. J. O. (org.). Diagnóstico físico-ambiental da bacia hidrográfica do córrego São Pedro: um exercício acadêmico de gestão dos recursos hídricos. Ubá: Geographica, 2010. p. 11-18.

MARTINS, Virginia Amaralinda Calabrez; FERNANDES, Ludmilla Alves; ROCHA, Geraldo César. *Avaliação de Risco a Rompimento da Represa de São Pedro, Juiz de Fora – MG, por meio dos Métodos de Árvore de Falhas e Causa e Consequência.* 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2020v29n2p143>. Acesso em: 23 jun. 2025.

SANTOS, L. F.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. A. G. M.. *Simulation of the Hypothetical Rupture of the Juturnaiba Dam, Located in Rio de Janeiro State.* Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj, [S.L.], v. 42, n. 3, p. 299-310, 30 set. 2019. Instituto de Geociencias - UFRJ. http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_299_310.

USACE. United States Army Corps of Engineers. *HEC-RAS river analysis system: user's manual, version 6.6.* Davis: USACE, 2024.

WRIGHT, J. M. *Floodplain management: principles and current practices.* Knoxville: The University of Tennessee, 2008.