

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL DE RUPTURA HIPOTÉTICA POR GALGAMENTO DA BARRAGEM DO AÇUDE CEDRO, QUIXADÁ – CE, UTILIZANDO MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Rayssa Moraes Brito¹; Samuel Cabral da Silva² & Francisco Delfábio Teixeira de Oliveira³

Abstract: The growing and often disorderly urban expansion downstream of dams increases the need for studies assessing the risks associated with a potential failure. This scenario is exemplified by the Cedro Dam (Quixadá-CE, Brazil), a historic water infrastructure whose downstream valley has undergone a notable transformation in land use, with the urban fabric expanding into potentially flood-prone areas. Given this new configuration, which lacks a corresponding risk analysis, this study aimed to simulate the flood inundation map and characterize the resulting flow from a hypothetical overtopping failure of this dam, induced by a 10,000-year return period rainfall event. A hydrological modeling was performed in HEC-HMS to generate the breach hydrograph, which then served as input for a two-dimensional hydrodynamic simulation in the HEC-RAS software. The results indicated a peak breach discharge exceeding 21,000 m³/s, resulting in a 2.95 km² inundation area, with depths surpassing 14 m in critical areas and velocities exceeding 78 m/s at the breach outlet. The study quantifies the high risk and provides an unprecedented technical basis for the development of land-use policies and emergency action plans for the region.

Resumo: A crescente expansão urbana a jusante de barragens, muitas vezes desordenada, eleva a necessidade de estudos que avaliem os riscos associados a uma eventual ruptura. Este cenário é exemplificado pelo Açude Cedro (Quixadá-CE), obra histórica cujo vale a jusante sofreu uma notável transformação em seu uso e ocupação do solo, com a expansão da malha urbana sobre áreas potencialmente inundáveis. Diante desta nova configuração, que carece de uma análise de risco correspondente, o presente trabalho teve como objetivo simular a mancha de inundação e caracterizar o escoamento resultante de uma ruptura hipotética desta barragem por galgamento, induzida por uma chuva decamilenar. Para tal, foi realizada uma modelagem hidrológica no HEC-HMS para gerar o hidrograma de ruptura, cujos resultados alimentaram uma simulação hidrodinâmica bidimensional no software HEC-RAS. Os resultados indicaram um pico de vazão de ruptura superior a 21.000 m³/s, resultando em uma mancha de inundação de 2,95 km², com profundidades que superam 14 m em áreas críticas e velocidades que ultrapassam 78 m/s na saída da brecha. O estudo quantifica o elevado risco e fornece um subsídio técnico inédito para a elaboração de políticas de ordenamento territorial e planos de ação de emergência para a região.

Palavras-Chave – Mapeamento de inundações; ruptura de barragens; modelagem hidrodinâmica.

1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Quixadá, rayssa.brito8757@gmail.com

2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Quixadá, samuel.cabral.silva07@aluno.ifce.edu.br

3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Quixadá, delfabio.teixeira@ifce.edu.br

INTRODUÇÃO

A segurança de barragens é um tema de relevância contínua no Brasil, onde a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) registra uma média histórica de múltiplos acidentes anuais com essas estruturas (ANA, 2023). Os danos causados por tais rompimentos podem resultar em consequências devastadoras para o meio ambiente, a economia e a sociedade, especialmente devido ao potencial de perdas de vidas humanas associado (Oliveira *et al.*, 2020).

Diante disso, a Lei nº 12.334/2010 instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que prevê a elaboração de Planos de Segurança de Barragens (PSBs), incluindo o Estudo de Ruptura Hipotética para avaliar os riscos e gerar as manchas de inundação, orientando assim as ações de prevenção e mitigação de desastres (Levis; Palús, 2024). Para esses estudos, a modelagem hidrológica e hidráulica, por meio de softwares como o HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) e o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), surge como uma ferramenta essencial, pois permite simular o comportamento de bacias hidrográficas e delimitar as áreas potencialmente afetadas por cheias. Tais simulações fornecem uma base técnica para o planejamento urbano, a gestão de riscos e a elaboração de estratégias de mitigação e resposta a emergências.

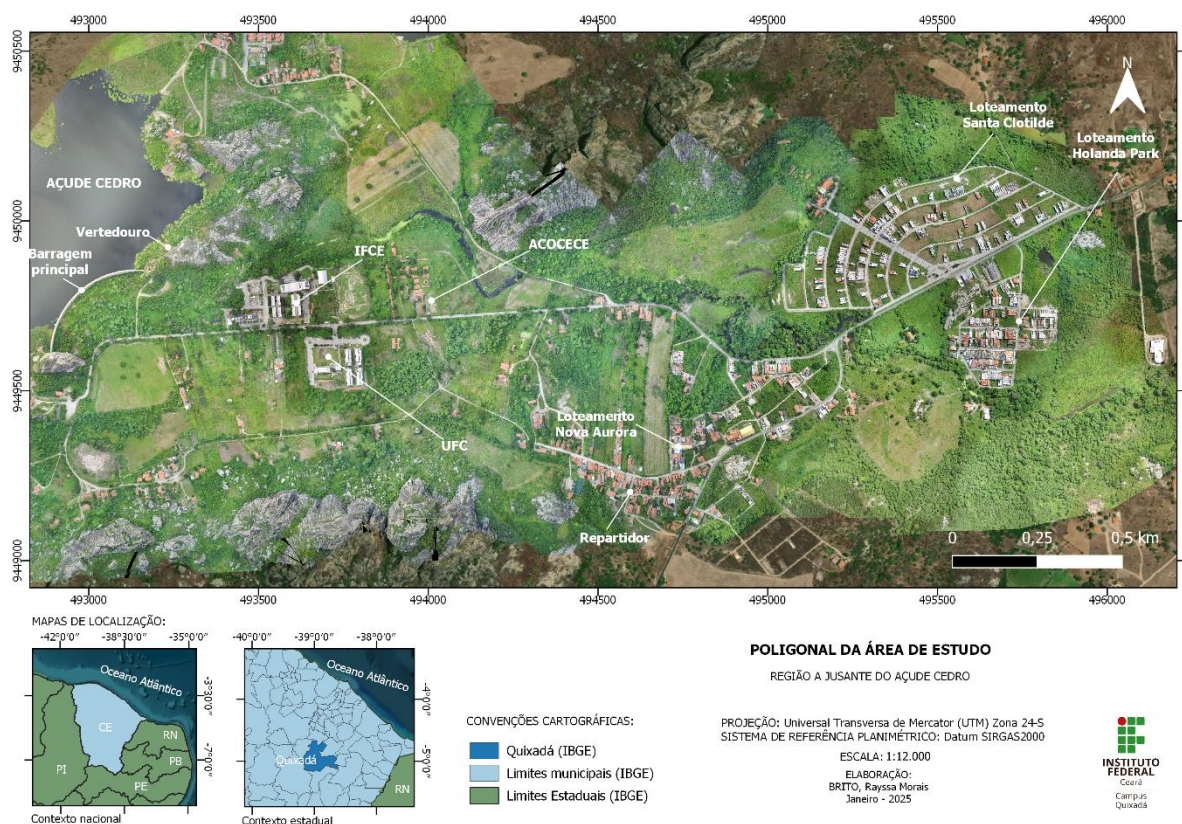
O Açude Cedro, localizado no município de Quixadá, Ceará, representa um caso de particular interesse. Sendo uma das mais antigas e simbólicas obras hídricas do país, sua área a jusante tem experienciado nas últimas décadas uma significativa expansão urbana. Essa ocupação inclui a instalação de equipamentos sociais de grande porte, como um campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e da Universidade Federal do Ceará (UFC), além de novos loteamentos residenciais e pontos comerciais. Contudo, não há registros de estudos públicos que tenham avaliado as consequências de uma eventual ruptura desta barragem para o novo cenário de ocupação.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal simular a mancha de inundação e caracterizar o escoamento resultante de um cenário hipotético de ruptura da barragem do Açude Cedro por galgamento. Para tal, foi realizada uma modelagem hidrodinâmica bidimensional com o auxílio do software HEC-RAS, a partir de um hidrograma de ruptura gerado no HEC-HMS. O estudo busca fornecer um subsídio técnico para a análise de risco na região, com potencial para orientar futuras ações de planejamento e gestão da segurança.

METODOLOGIA

O Açude Cedro, localizado no município de Quixadá, no estado do Ceará, foi selecionado como objeto de estudo para a simulação de mancha de inundação decorrente de uma ruptura hipotética. A barragem, construída em alvenaria de pedra argamassada no final do século XIX, possui altura de 19,93 m, coroamento com 416,34 m de comprimento e capacidade de armazenamento de 126 hm³ (FUNCME, 2024). A área modelada corresponde a uma porção da região a jusante da barragem, no vale do rio Sitiá. A Figura 1 apresenta a localização do açude e o trecho a jusante considerado na simulação.

Figura 1 – Mapa da área de estudo.



Fonte: Autores (2024).

Base de dados topográficos

A base topográfica utilizada no estudo consistiu em um Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução espacial de 0,0787 x 0,0787 m, obtido por aerolevantamento realizado pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) em 2024. Todo o geoprocessamento e a criação da geometria para a modelagem foram realizados utilizando o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM Zona 24S.

Modelagem hidrológica

O hidrograma de ruptura da barragem foi gerado através do software HEC-HMS (v. 4.10). A geração do hidrograma foi alimentada por um evento de chuva decamilenar (tempo de retorno de 10.000 anos), cujo hietograma de projeto foi elaborado a partir da equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) proposta por Batista (2025) para a região (Equação 1).

$$i = \frac{19,054 * (Tr - 2,150)^{0,112}}{(t + 11,070)^{0,787}} \quad (1)$$

Onde, i corresponde a intensidade da chuva (mm/min), Tr ao tempo de retorno (anos) e t ao tempo de duração da precipitação (horas).

Considerando a tipologia construtiva da barragem – alvenaria de pedra argamassada – a ruptura por galgamento foi considerada o cenário mais plausível. O modelo foi configurado com a curva cota-volume do reservatório (FUNCEME, 2024), que foi extrapolada até a cota de coroamento para abranger o evento extremo. Para estimar os parâmetros da brecha, foram utilizadas as equações empíricas de Fread e Harbaugh (1984) (ENGECON, 2012), que determinam o tempo de formação (Equação 2) e a largura da brecha (Equação 3).

$$T = 0,00714 * V^{0,47} * H^{-0,9} \quad (2)$$

$$B = 2,15764 * k_0 * (V * H)^{0,25} \quad (3)$$

Onde, T é o tempo de ruptura (h), V é o volume do reservatório (m^3), H é a profundidade a montante, acima do fundo da brecha (m), B é a largura média da brecha (m) e k_0 é uma constante que varia com o tipo de rompimento, sendo atribuído o valor de 0,7 para *piping* e 1,0 para galgamento.

Os valores resultantes dos cálculos, bem como os demais parâmetros hidráulicos e geométricos utilizados como dados de entrada no modelo estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada para a modelagem hidrológica no HEC-HMS.

PARÂMETRO	VALOR	FONTE/MÉTODO
Vertedouro		
Largura da Soleira	75,27 m	FUNCEME (2024)
Cota da Soleira	114,5 m	FUNCEME (2024)
Coefficiente de Descarga	2	FUNCEME (2024)
Barragem		
Cota do Topo (Coroamento)	116,5 m	FUNCEME (2024)
Ruptura (Brecha)		
Cota de Gatilho	115,5 m	Premissa
Cota de Fundo	98,9 m	Premissa
Largura Média	468,22 m	Equação 3
Tempo de Formação	3,467 h	Equação 2

Fonte: Autores (2025).

Modelagem hidrodinâmica

A propagação da onda de ruptura foi simulada no HEC-RAS (v. 6.0), em regime bidimensional (2D). A geometria do modelo foi construída no ambiente RAS Mapper a partir do MDS, com malha computacional de 50×50 m e coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,035. As condições de contorno incluíram, a montante, o hidrograma de ruptura gerado no HEC-HMS, e, a jusante, a profundidade normal com declividade média de 0,002 m/m.

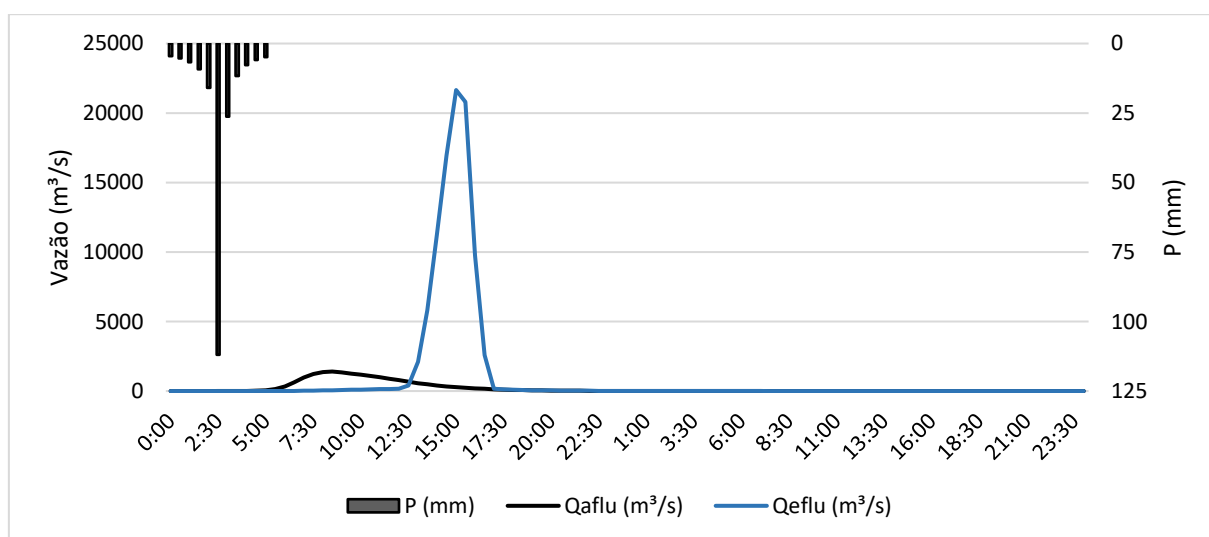
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Modelagem hidrológica

A Figura 2 apresenta o resultado da modelagem hidrológica para o evento de chuva decamilenar. O gráfico expõe o hietograma da chuva de projeto, com uma precipitação total de aproximadamente 210,3 mm, e os hidrogramas de vazão afluente (Q_{afllu}) e de ruptura do reservatório (Q_{eflu}).

A análise do gráfico revela que o hidrograma afluente, resultante da chuva na bacia de contribuição, atinge seu pico aproximadamente 8 horas e 30 minutos após o início do evento de chuva, chegando a 1.404,7 m³/s. A cheia é amortecida pelo reservatório por algumas horas, até que cerca de 12 horas e 30 minutos após o início da precipitação, a ruptura por galgamento se deflagra. Nesse momento, a vazão efluente salta para 400 m³/s e evolui rapidamente, com o hidrograma de ruptura atingindo seu pico máximo de 21.652,8 m³/s por volta de 15 horas após o início da precipitação. Ao simular o mesmo evento de chuva para um cenário de vertimento (sem ruptura), Brito (2024) obteve um pico de vazão efluente de 189,5 m³/s. A falha estrutural, portanto, eleva a vazão de pico em mais de 114 vezes em comparação ao cenário de vertimento, evidenciando o potencial de dano da onda de cheia gerada.

Figura 2 - Hietograma e hidrogramas de vazão afluente e de ruptura do reservatório mediante chuva decamilenar.



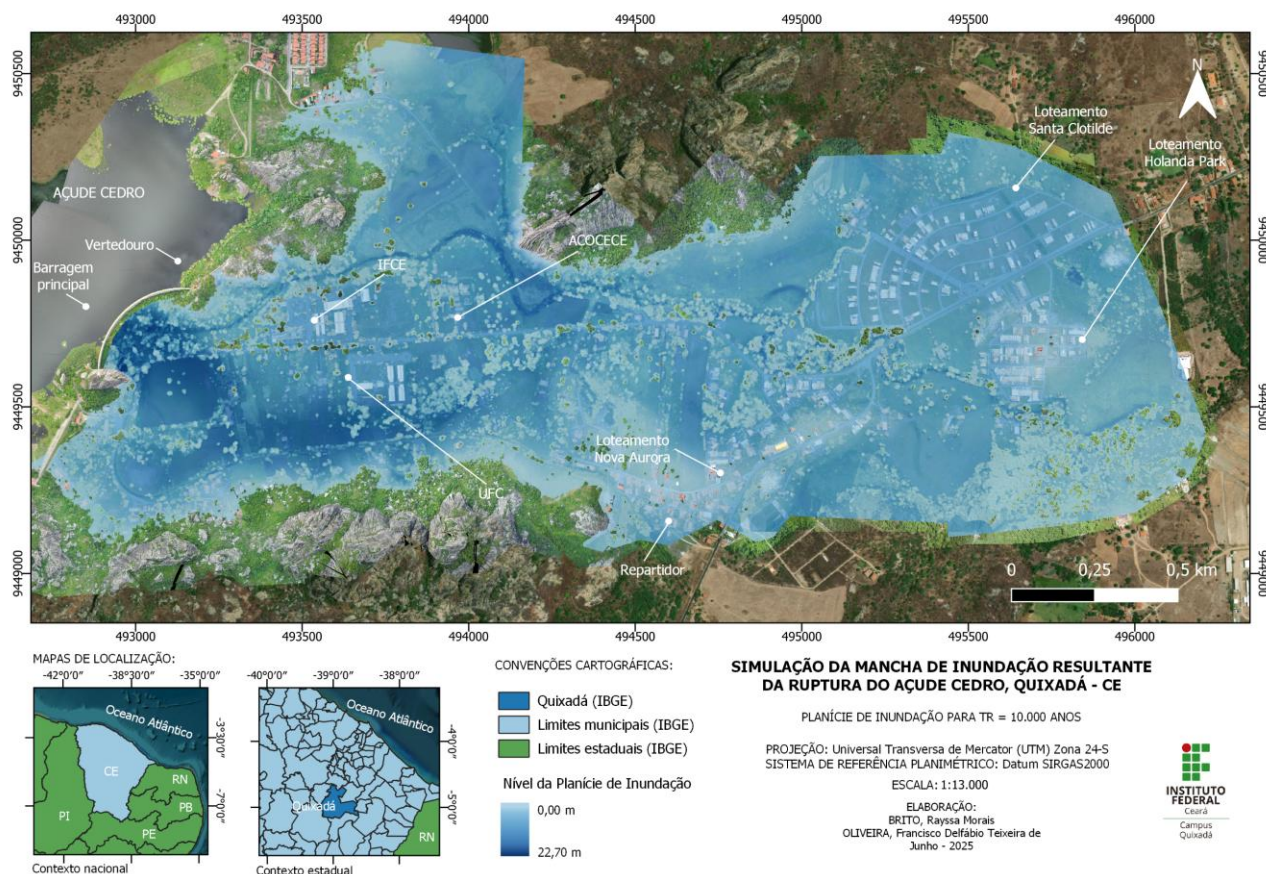
Fonte: Autores (2025).

Modelagem hidrodinâmica

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional, ilustrando, respectivamente, a mancha de inundação em termos de profundidade e a variação da velocidade do escoamento para o cenário de ruptura.

A planície de inundação simulada (Figura 3) cobre uma área total de aproximadamente 2,95 km². A profundidade máxima atinge 22,70 m na porção imediatamente a jusante da barragem, como esperado, e diminui gradualmente à medida que o fluxo se propaga pelo vale. A análise espacial da mancha indica um impacto severo em áreas de interesse social e econômico. Nas instituições de ensino, a simulação aponta profundidades que superam 14 m na área da UFC e 10 m nas proximidades do IFCE. Nos bairros residenciais, o Loteamento Nova Aurora seria atingido por lâminas d'água de 10 m, enquanto os loteamentos Santa Clotilde e Holanda Park, mais a jusante, enfrentariam profundidades superiores a 10 m e 8 m, respectivamente.

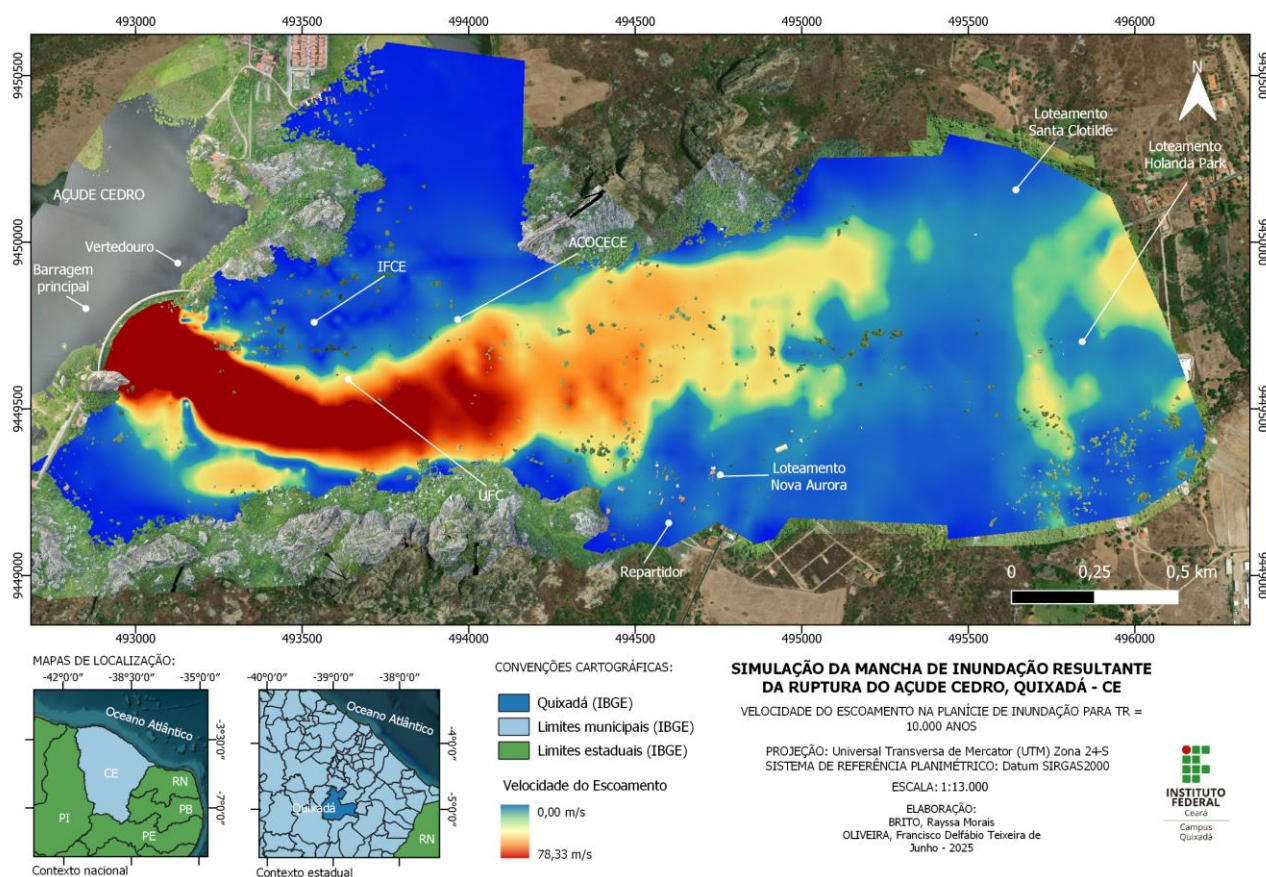
Figura 3 – Mapa da planície de inundação.



Fonte: Autores (2025).

A distribuição das velocidades (Figura 4) complementa a análise de risco. A simulação indica um pico de 78,33 m/s na saída da brecha, com o fluxo mais rápido concentrado no eixo principal do escoamento. A magnitude desse resultado é crítica, pois a velocidade é um fator primordial no agravamento de danos estruturais (Kreibich *et al.*, 2009). Segundo McBean (1988), um fluxo com velocidade superior a 3 m/s e profundidade de 1 m é suficiente para superar a capacidade de projeto de uma parede residencial. Sendo assim, as velocidades obtidas no estudo indicam potencial para comprometer a integridade da vasta maioria das estruturas civis e causar processos erosivos profundos. A jusante, observa-se que, conforme o escoamento atinge áreas mais planas, como a região dos loteamentos, ocorre a dissipação de energia, com a redução das velocidades e o consequente espriamento do fluxo.

Figura 4 – Mapa da velocidade do escoamento na planície de inundação.



Fonte: Autores (2025).

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo simular os efeitos hidrológicos e hidrodinâmicos de uma ruptura hipotética do Açude Cedro, considerando o cenário de falha por galgamento decorrente de um evento de chuva extremo. A análise foi motivada pela crescente e desordenada ocupação urbana a jusante do reservatório, que inclui instituições de ensino de grande porte como o IFCE e a UFC, além de pequenos empreendimentos e residências familiares.

A modelagem hidrológica demonstrou que a ruptura da estrutura geraria um hidrograma de vazão com um pico de magnitude extrema, com ordem de grandeza superior a um evento de cheia sem o colapso da barragem. Consequentemente, a simulação hidrodinâmica modelou uma extensa mancha de inundação, com profundidades e velocidades elevadas, capazes de impactar severamente a região à jusante do reservatório.

Os resultados deste trabalho quantificam um cenário com potencial para danos significativos à área de estudo. Embora a análise se baseie em premissas e equações empíricas, o que introduz incertezas, o estudo fornece uma base técnica para a avaliação de risco, especialmente diante da ausência de um plano de segurança para o Açude Cedro. As informações geradas podem subsidiar o planejamento de ações emergenciais na região.

Como trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise de risco por meio do estudo da probabilidade de ocorrência do evento chuvoso que induziria a ruptura. Adicionalmente, sugere-se a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros de brecha, visando compreender e quantificar a influência das incertezas do modelo nos resultados finais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) pela realização e disponibilização dos dados do aerolevantamento, que foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2024). *Relatório de Segurança de Barragens 2023*. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snisd.gov.br/portal-snisd/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- BATISTA, T. L. *et al.* (2025). *Equações IDF dos municípios cearenses geradas a partir de dados pluviométricos*. Revista Brasileira de Geografia Física, 18(1), pp. 702–722. DOI: 10.26848/rbgf.v18.1.p702-722.
- BRASIL. (2010). *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010.
- BRITO, R. M. (2024). *Simulação da mancha de inundação resultante do vertimento do Açude Cedro, Quixadá – CE*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Quixadá, 2024.
- ENGECORPS ENGENHARIA S.A. (2012). *Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias*. Disponível em: http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo_I_Texto.pdf. Acesso em: 07 jun. 2025.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). (2024). *Portal Hidrológico do Ceará*. Fortaleza. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 30 mai. 2024.
- KREIBICH, H. *et al.* (2009). *Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?* Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(5), pp. 1679–1692. DOI: 10.5194/nhess-9-1679-2009.
- LEVIS, J. M.; PALÚ, M. C. (2024). *Simulação de ruptura hipotética da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu utilizando modelagem numérica unidimensional*. In: Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, 2.; Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 16. Anais [...]. [S.l.]: ABRHidro, 2024. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16514>. Acesso em: 7 jun. 2025.

MCBEAN, E. A. *et al.* (1988). *Adjustment Factors for Flood Damage Curves*. Journal of Water Resources Planning and Management, 114(6), pp. 635–646. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:6(635).

OLIVEIRA, L. C. S. de *et al.* (2020). *Análise de risco da Barragem Jaburu I: aplicação do método FMECA*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/59222>. Acesso em: 29 out. 2024.