

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM JAZIGO, SITUADA NO SERTÃO DE PERNAMBUCO

Alexson Caetano da Silva¹ ; Natalia Fernanda Jeronimo de Santana²; Amanda Machado Pereira³; José Roberto Gonçalves de Azevedo⁴; Anna Elis Paz Soares⁵ ; Simone Rosa da Silva⁶ & Fernandha Batista Lafayette⁷

RESUMO - O trabalho tem por objetivo apresentar a simulação hipotética do rompimento da barragem e a determinação e análise dos indicadores de perigo de escoamento, através do estudo realizado para a Barragem de Jazigo, localizada no município de Serra Talhada, no sertão de Pernambuco. A metodologia consistiu na caracterização da barragem; construção do hidrograma de ruptura através de software HEC-HMS 4.3; realização da simulação do rompimento com o software HEC-RAS 6.0 Beta; elaboração dos mapas de inundação de profundidade, velocidade e intensidade; e, por fim, classificação dos níveis de alerta. Verificou-se o impacto do rompimento e a variação temporal da inundação em locais estratégicos no município de Serra Talhada, onde o primeiro imóvel seria atingido pela onda de cheia 15 minutos após o início do rompimento. Espera-se que os resultados apresentados possam contribuir com a redução dos riscos oferecidos por barragens, tendo em vista a preparação de ações de mitigação de danos materiais, humanos e ambientais a partir da elaboração e análise de mapas de inundação.

Palavras-chave: Segurança de barragem; Mapa de inundação; Modelagem computacional.

ABSTRACT - The work aims to present a hypothetical simulation of the dam rupture and a determination and analysis of runoff hazard indicators, through the study carried out for the Jazigo Dam, located in the municipality of Serra Talhada, in the semi-arid region of Pernambuco. The methodology consisted of the dam characterization; construction of the rupture hydrograph using HEC-HMS 4.3 software; conducting the breakout simulation with the HEC-RAS 6.0 Beta software; elaboration of depth, speed and intensity flood maps; and, finally, classification of alert levels. The impact of the disruption and the temporal variation of the flood were verified in strategic locations in the municipality of Serra Talhada, where the first property would be hit by the flood wave 15 minutes after the beginning of the disruption. It is hoped that the results presented can contribute to

¹) Doutorando da Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE, alexsoncaetano@hotmail.com.

²) Graduanda em Engenharia Civil POLI/UPE, Rua Benfica, 455, Madalena, Recife - PE, (81) 3184-7500, nfjs@poli.br

³) Graduanda em Engenharia Civil POLI/UPE, Rua Benfica, 455, Madalena, Recife - PE, (81) 3184-7500, amp@poli.br

⁴) Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, UFPE, jrga@ufpe.br

⁵) Doutoranda da Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE, anna.elis@ufpe.br

⁶) Professora Associada da Universidade de Pernambuco, (81) 3184-7566, simonerosa@poli.br

⁷) Doutoranda da Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE, ufpe.fernandha@gmail.com

the reduction of risks offered by dams, given the preparation of actions to mitigate material, human and environmental damage from the elaboration and analysis of flood maps.

Keywords: Dam safety. Flood map. Computational modeling.

1. INTRODUÇÃO

O rompimento de barragens é particularmente preocupante, pois sua ocorrência pode caracterizar uma catástrofe, capaz de causar mortes e destruição, principalmente quando essas se localizam a montante de regiões urbanizadas. Isso ocorre por causa do poder destrutivo inerente da onda de inundação que é liberada devido ao colapso repentino da estrutura (WRACHIAN E MAMBRETTI, 2009). Dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura (MOTA, 2017).

No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi instituída através da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, atualizada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (BRASIL, 2010, 2020). A referida lei define que para barragens que apresentam uma das seguintes condições, acima de 15m de altura do maciço ou com capacidade total do reservatório de 3.000.000m³, reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis ou categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, devem ser elaborados pelo empreendedor da barragem o Plano de Segurança de Barragem (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE).

Para a avaliação de segurança de barragens, é necessário o estudo e caracterização de diversos parâmetros que influenciam na sua estabilidade, devido a isto, o estudo das possíveis falhas se tornou imprescindível. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) estabeleceu, em 2016, manuais para os empreendedores sobre segurança de barragens, constituído em oito volumes, que orientam e determinam diretrizes sobre a formulação do PSB, do PAE, das Inspeções de Segurança Regulares e Especiais, entre outros guias (ANA, 2017). Os Planos de Segurança devem conter toda a caracterização das barragens, seja topográfica, estrutural, operacional, hidrológica e hidráulica e, em especial no PAE, a simulação hipotética de rompimento da barragem, apresentando, inclusive, os mapas de inundação.

Esses mapas são essenciais para a determinação da zona de autossalvamento - ZAS, definida como o trecho do vale a jusante da barragem em que não haja tempo suficiente para intervenção da autoridade competente em situação de emergência (BRASIL, 2020). Além disso, os mapas de inundação servirão de base para que as prefeituras e os órgãos de defesa civil elaborem seus Planos de Contingência, considerando a hipótese de ruptura da barragem, com o objetivo de facilitar a notificação e a evacuação de áreas afetadas por essa situação.

A modelagem computacional se constitui em importante ferramenta para a modelagem da propagação de cheia em condição de ruptura de barragens, pois delimita mapas de inundação com indicadores de perigo e determina a variação temporal e espacial da onda de cheia (CESTARI JUNIOR, 2013).

A barragem de Jazigo fica a 7 km do centro do município de Serra Talhada/PE, assim uma ruptura da sua estrutura acarretaria em grandes danos à cidade. Outro fato importante é a inspeção técnica realizada pelo empreendedor, a Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos de Pernambuco, em 2020, que enquadrou o reservatório como nível de perigo global 2 (alerta). Devido a isto, a simulação hipotética de rompimento da barragem, se tornou de total importância para a segurança da barragem e da população.

Nesse contexto, o presente trabalho visa simular matematicamente o rompimento hipotético da barragem de Jazigo, situada no sertão de Pernambuco, no município de Serra Talhada, e apresentar o respectivo mapa de inundação, estabelecendo as áreas de perigo e analisando a variação temporal e espacial da profundidade do escoamento.

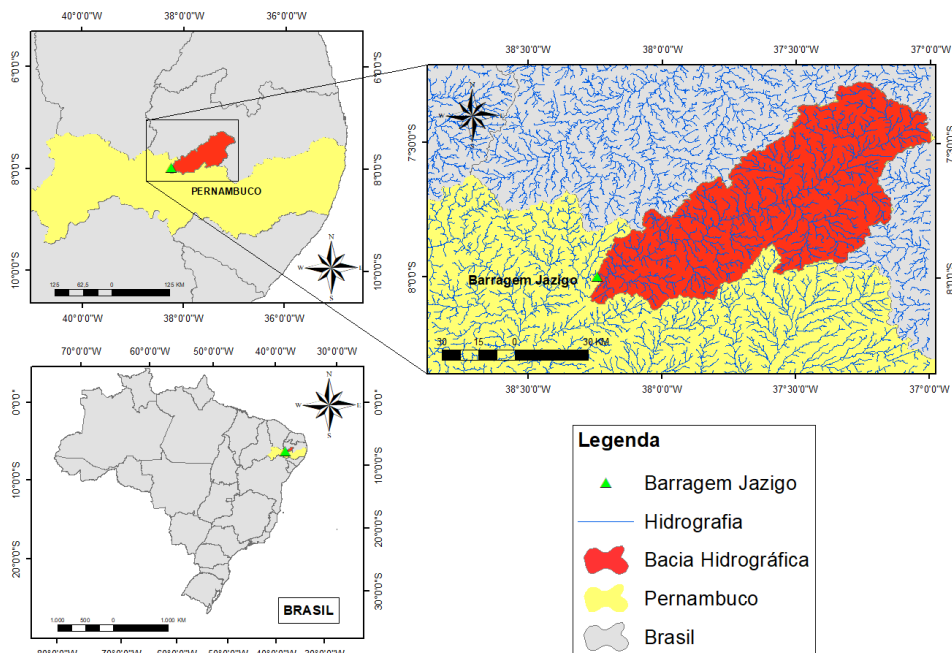
2. MATERIAIS E MÉTODOS

A definição do estudo de ruptura hipotética da barragem de Jazigo, em Pernambuco, se baseou na seguinte metodologia, resumida em quatro etapas: definição das características da brecha; definição do hidrograma de ruptura, utilizando o software hec-hms; determinação do modelo hidrodinâmico de onda de cheia através de software de domínio público, HEC-RAS 6.0 beta; e mapeamento das áreas inundáveis, com o programa de geoprocessamento. A base topográfica utilizada no estudo foi a do Pernambuco Tridimensional (PE3D), o qual apresenta nível de precisão de 1:1.000.

2.1 Área de estudo

A barragem Jazigo está localizada no município de Serra Talhada, no sertão pernambucano, estando acerca de 405 km da capital do Estado, Recife. O município possui 79.232 habitantes (IBGE, 2010), com uma área territorial de 2.980 km² (IBGE, 2010). A barragem de alvenaria de pedra argamassada, com altura de 16 metros e uma extensão de 360 metros, pertence à bacia hidrográfica do rio Pajeú. Construído em 1983, o barramento possui usos múltiplos (SEINFRA, 2020).

Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica da barragem de Jazigo



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2 Parâmetros de brecha

Para a determinação das características geométricas da brecha foi utilizada a equação Froehlich, que foi desenvolvida com base em 63 casos de ruptura de barragens, em 1995. Em 2016, os estudos

foram revisados considerando 111 casos de ruptura de barragens. Assim, através da Equação 1, estimou-se a largura média da brecha e o tempo de formação (FROEHLICH et al., 2016):

$$B_{ave} = 0,23k_0V_w^{1/3} \quad (1)$$

Onde:

Bave : Largura média da brecha (m);

Vw : Volume do reservatório no momento da ruptura (m³);

K₀ : Constante equivalente a 1,5 para casos de rompimento por galgamento.

Para simular a ruptura do reservatório por desestabilização do maciço principal foi utilizada a formulação de galgamento descrita por FROEHLICH et al. (2016).

O tempo de abertura da brecha adotado foi o menor valor 0,1h, conforme orienta o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume IV – Guia de Orientação e Formulário do Plano de Ação de Emergência – PAE (ANA, 2016). A Tabela 1 apresenta os valores característicos da brecha de ruptura.

Tabela 1- Valores característicos da brecha de ruptura

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

Fonte: ANA (2016, p. 37).

2.3 Hidrograma de ruptura

Para a geração do hidrograma de ruptura foi utilizado o software Hec-hms 4.3. Foram obtidos os principais dados de entrada: a curva cota-volume do reservatório; os parâmetros de formação da brecha; e a curva intensidade-duração-frequência (IDF) do posto conhecido mais próximo da barragem, neste caso, foi utilizado o Posto Triunfo, caracterizado por Silva *et al.* (2012).

O cenário considerado foi o de ruptura por galgamento, com uma chuva de projeto de tempo de retorno de 100 anos (cenário de ruptura em dia de sol), sendo o vertedouro obstruído com uma lâmina d'água na cota 85,5 m.

2.4 Modelo hidrodinâmico de onda de cheia

Para o modelo hidrodinâmico de propagação de cheia, foi utilizado o HEC-RAS 6.0 Beta (Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System). O modelo se baseia na resolução das equações de Saint-Venant uni ou bidimensionais, na versão 6.0, considerando regimes permanentes ou não permanentes.

Para a construção do modelo são necessárias informações em relação a geometria, coeficiente de rugosidade, condições de contorno e condições de cálculo. A extensão modelada a jusante do reservatório foi obtida conforme Equação 2, válida nos limites inferiores a 6,7 km e superiores a 100,4 km de distância, para reservatórios entre 0 e 1.000 hm³ (BANCO MUNDIAL, 2014).

$$D_{max} = 8,870 \cdot 10^{-8} \cdot (V_{max})^3 - 2,602 \cdot 10^{-4} \cdot (V_{max})^2 + 2,648 \cdot 10^{-1} \cdot (V_{max}) + 6,737 \quad (2)$$

Se $V_{max} \leq 1.000 \text{ hm}^3$.

Em que,

V_{max} : Volume máximo do reservatório, em hm³;

D_{max} : Distância máxima a jusante do reservatório, em km;

A partir do modelo digital do terreno do programa Pernambuco tridimensional (PE3D) foram obtidas as características topobatimétricas da região.

2.5 Mapa de inundação

Os mapas de inundação foram obtidos através do software de geoprocessamento ArcGis. Através do comando Raster Calculator, foram realizados mapas para descrever a área de influência para diferentes profundidades, velocidades e intensidades, que é produto da profundidade e da velocidade. Os limites de indicadores aplicados na construção dos mapas de perigo são baseados conforme o estudo de Ribeiro Neto *et al.* (2016), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Limites de indicadores para construir um mapa de perigo

Indicador	Baixo	Médio	Alto
Profundidade (m)	0-0,60	0,60-1,20	>1,20
Velocidade (m/s)	0-0,60	0,60-1,20	>1,20
Intensidade(m ² /s)	0-0,36	0,36-1,50	>1,50

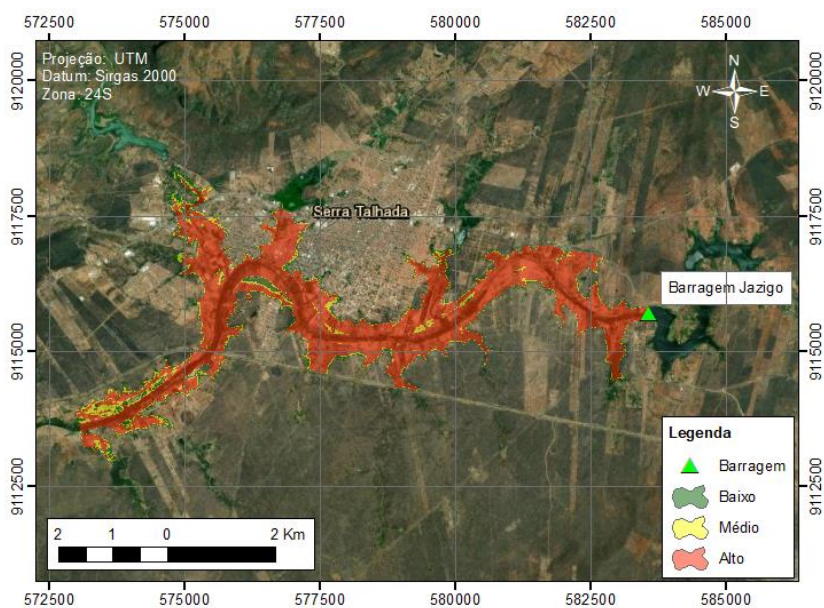
Fonte: Ribeiro Neto *et al.* (2016, p. 384)

Essa classificação possibilita determinar as zonas mais vulneráveis e contribuir para estudos futuros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

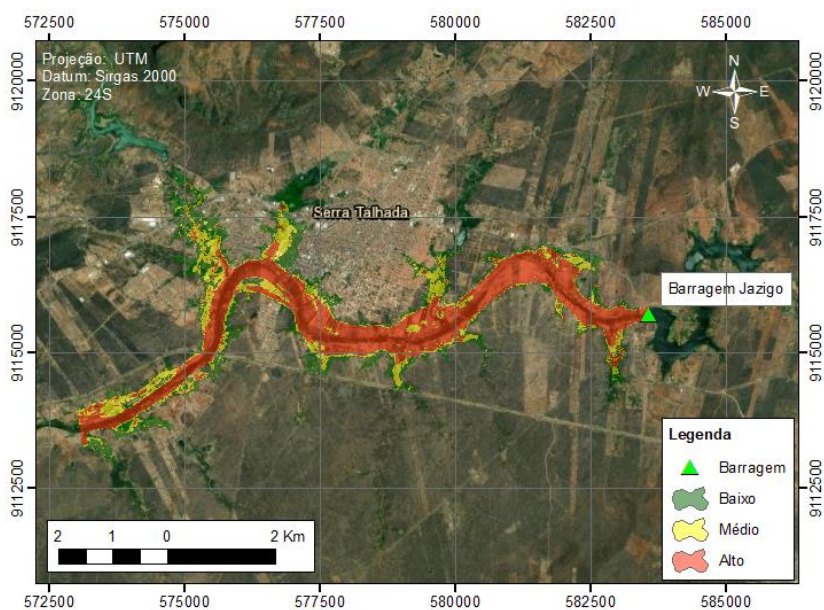
A partir dos mapas de profundidade, velocidade e intensidade gerados, foi possível delimitar e classificar os indicadores de perigo decorrentes da cheia de rompimento da barragem Jazigo no município de Serra Talhada-PE (Figuras 2 a 4).

Figura 2 – Mapa de profundidade



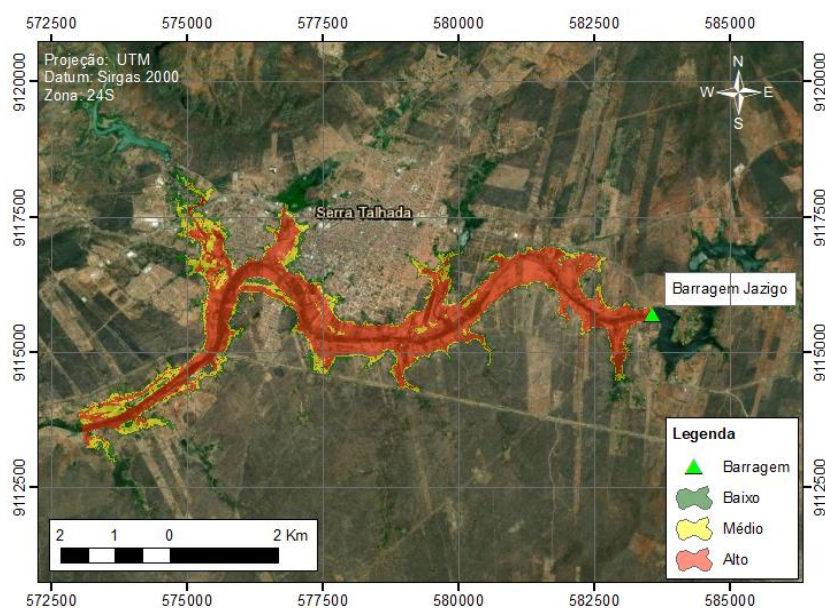
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Mapa de velocidade



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Mapa de intensidade



Fonte: Elaborado pelos autores.

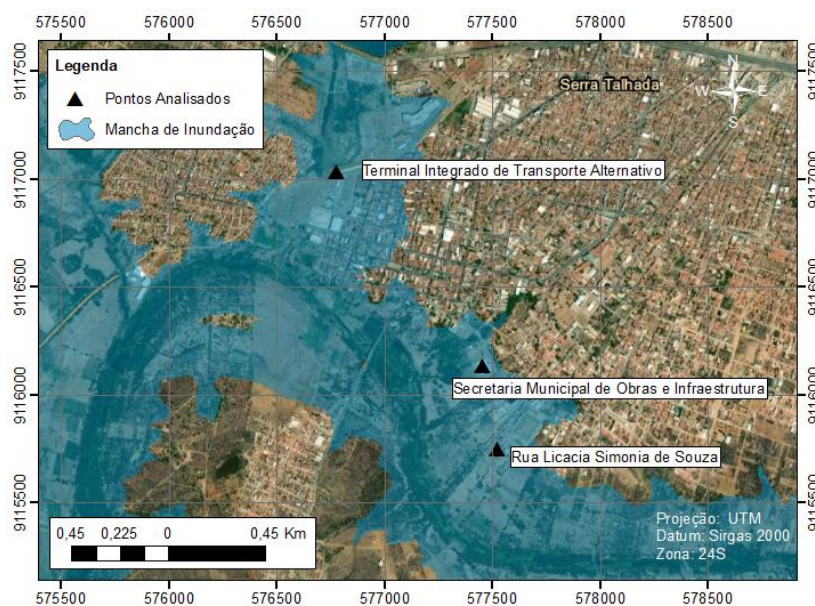
A partir dos indicadores de perigo propostos por Ribeiro Neto *et al.* (2016), foram analisados os indicadores de profundidade, velocidade e intensidade do fluxo ocasionado pelo rompimento da barragem. Como resultado, o indicador de profundidade da água teve praticamente na maior parte da área um nível de perigo alto. O indicador velocidade da água, apesar de também apresentar a predominância da área como nível de perigo alto, foi, entre os três indicadores, o que apresentou a maior região dentro de um indicador de nível de perigo classificado como baixo. Segundo Wright (2008), cheias com velocidade de escoamento acima de 1,2 m/s e profundidades maiores que 0,60 m são perigosas para as pessoas. Por fim, foi gerado o índice de perigo de intensidade de escoamento. Verificou-se que a maior parte da área atingida pela cheia possui o indicador de perigo de intensidade maior ou igual a 1,5 m²/s, que indica grande potencial de danos, tanto à infraestrutura atingida como riscos às pessoas.

Outra verificação realizada foi a variação temporal da inundação, que pode auxiliar na gestão do risco pelos órgãos gestores. O primeiro imóvel do município de Serra Talhada é atingido pela onda de cheia 15 minutos após o início do rompimento. Ainda, foram selecionados três locais de referência, a Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura, o Terminal Integrado de Transporte Alternativo e a Rua Licácia Simônia de Souza, que está em um bairro com um grande número de residências atingidas pela cheia, todos no município de Serra Talhada (Figura 5), para analisar a variação temporal da profundidade do escoamento decorrente da ruptura do reservatório (Figuras 6 a 8).

O pico da onda de cheia atinge a Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura, o Terminal Integrado de Transporte Alternativo e a Rua Licácia Simônia de Souza, 1 hora e 40 minutos, 1 hora e 50 minutos e 1 hora e 35 minutos, respectivamente, após o início do rompimento.

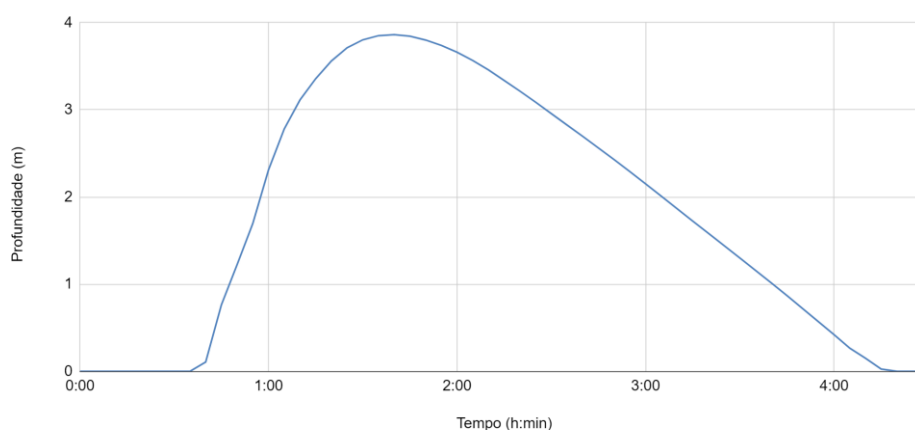
A cheia atinge uma profundidade de 4,20 m no Terminal Integrado de Transporte Alternativo já na Rua Licácia Simônia de Souza, a onda alcança 2,00 m de profundidade. Embora seja um valor inferior aos demais pontos analisados, ainda representa uma faixa de risco para a população.

Figura 5 – Localização dos pontos analisados no município de Serra Talhada-PE



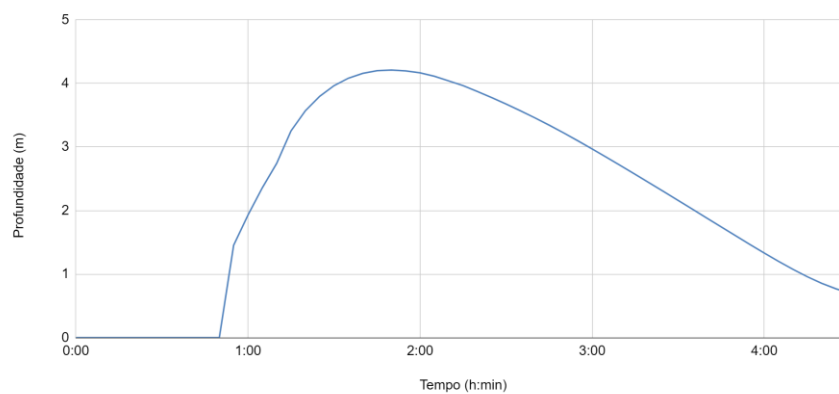
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6 – Variação temporal da inundação na Secretária Municipal de Obras e Infraestrutura de Serra Talhada-PE



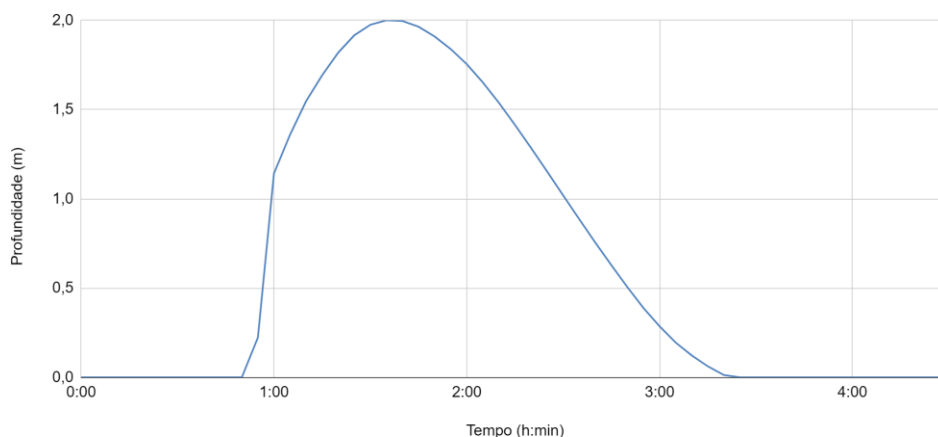
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 – Variação temporal da inundação no Terminal Integrado de Transporte Alternativo de Serra Talhada-PE



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 8 – Variação temporal da inundação na Rua Licácia Simonia de Souza no Município de Serra Talhada-PE



Fonte: Elaborada pelos autores.

4. CONCLUSÕES

Através da elaboração do mapa de inundação, conforme metodologia apresentada, verificou-se que apenas o município de Serra Talhada seria atingido pela onda de cheia em caso de rompimento da Barragem Jazigo e que a maior parte da área atingida possui o indicador de perigo de intensidade maior ou igual a $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$, o que é indicativo de grande potencial de danos à infraestrutura e riscos à população.

A partir do conhecimento detalhado das consequências de uma ruptura, os Planos de Contingência e Planos de Ação de Emergência podem ser elaborados por municípios e empreendedores, respectivamente. Com isso, espera-se que a metodologia apresentada possa contribuir para a elaboração e análise de mapas de inundação em outros empreendimentos e, conseqüentemente, com a redução dos riscos oferecidos por barragens, tendo em vista a elaboração de ações de mitigação de danos materiais, humanos e ambientais.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2016). *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Guia de Orientação e Formulário do Plano de Ação de Emergência (PAE)*. Brasília-DF, 127 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2017). “Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens”. [S. l.]. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/Barragens/ManualEmpreendedor.aspx>. Acesso em: 7 abr. 2021.

BANCO MUNDIAL. (2014). “Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens: Produto 4 - Classificação de Barragens: Avaliação dos Critérios Gerais Atuais, Metodologia Simplificada para Áreas Inundadas a Jusante e Diretrizes para a Classificação.” Brasília: [s.n.], 78 p.

BRASIL (2010). “Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000”. Diário Oficial da União, Brasília-DF.

BRASIL (2020). “Lei Federal 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), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração)”. Diário Oficial da União, Brasília-DF.

CESTARI JÚNIOR, E. (2014). *Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de Plano de Ação Emergencial de Barragens – UHE Três Irmãos estudo de caso*. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 189 p.

Froehlich, D.C.; Ph.D.; P.E., D.WRE, M.ASCE. (2016). Empirical model of embankment dam breaching. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001424).

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. (2016). “*Pernambuco Tridimensional*”. [S. l.]. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em: 17 fev. 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades: panorama. (2010) . “*Serra Talhada*”. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/serra-talhada/panorama> . Acesso em 28 de abr. de 2021.

MOTA, K. R. R. (2017). *Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG*. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal de Uberlândia. 115 p.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. (2016). “*Q.I. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE*”. RBRH, Porto Alegre, Jun. 2020, v. 21, n. 2, pp. 377-390.

SEINFRA - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E RECURSOS HÍDRICOS. (2020) “*Relatório de Inspeção de Segurança Regular - Barragem Jazigo*”. Recife-PE.

SILVA, B. M.; MONTENEGRO, S. G. L. (2009). *Chuvas intensas em localidades do Estado de Pernambuco*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. 116 p.

WRACHIAN, D.; MAMBRETTI, S. (2009). *Dam-break problems, solutions and case studies*. WIT Press, Southampton, Boston, 368 p.

WRIGHT, J. M. (2008). *Floodplain Management: Principles and Current Practices*. Knoxville: The University of Tennessee.