



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Simulação computacional hipotética de rompimento: um estudo de caso da barragem Chinelo

Natalia Fernanda Jeronimo de Santana¹; Simone Rosa da Silva ².

1 Mestranda em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, nfjs@poli.br; 2 Professora Dr. Associada pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, simonerosa@poli.br.

Artigo recebido em 16/04/2024 e aceito em 24/09/2024

RESUMO

As barragens de acumulação de água são importantes para o atendimento de diversas demandas e para o desenvolvimento de uma região, mas também são consideradas uma fonte de potencial perigo à população, não havendo uma maneira eficaz de mitigar completamente o risco. Daí surge a necessidade do estudo de situações hipotéticas, e identificação de ações que devem ser tomadas para redução desse risco e contra cada um dos possíveis problemas. Com isto, este trabalho tem como objetivo a simulação computacional hipotética de rompimento da barragem Chinelo, localizada no sertão de Pernambuco, com intuito de delimitar a área da mancha da onda de inundação. A estruturação da metodologia compreendeu no estudo da caracterização da barragem, elaboração do hidrograma de ruptura no software HEC-HMS 4.9, determinação do cenário de ruptura e dos parâmetros de formação da brecha de ruptura, simulação de rompimento no software HEC-RAS e construção dos mapas de perigo, caracterizados em três parâmetros fundamentais: profundidade, velocidade e intensidade. Verificou-se que a mancha de inundação atingiria cerca de 50 edificações, principalmente no parâmetro de profundidade. A partir desses resultados conclui-se, que a possível ruptura da barragem Chinelo poderá causar danos à vida humana, principalmente na zona urbana do município de Carnaíba-PE. Recomenda-se assim, a elaboração do Plano de Ação Emergencial para a segurança da população a jusante do barramento.

Palavras-chave: Onda de inundação; Mapas de perigo; Segurança de barragens.

Hypothetical computer simulation of rupture: a Chinelo dam case study

ABSTRACT

Water accumulation dams are important for meeting various demands and for the development of a region, but they are also considered a source of potential danger to the population, and there is no effective way to completely mitigate the risk. Hence the need to study hypothetical situations and identify actions that should be taken to reduce this risk and counter each of the possible problems. Therefore, this work aims to perform a hypothetical computer simulation of the rupture of the Chinelo dam, located in the hinterland of Pernambuco, in order to delimit the area of the flood wave stain. The structuring of the methodology included the study of the characterization of the dam, preparation of the rupture hydrograph in the HEC-HMS 4.9 software, determination of the rupture scenario and the parameters of the rupture breach formation, rupture simulation in the HEC-RAS software and construction of hazard maps, characterized in three fundamental parameters: depth, velocity and intensity. It was found that the flooding would affect approximately 50 buildings, mainly in terms of depth. Based on these results, it can be concluded that the possible rupture of the Chinelo dam could cause harm to human life, especially in the urban area of the municipality of Carnaíba-PE. It is therefore recommended that an Emergency Action Plan be drawn up to ensure the safety of the population downstream of the dam.

Keywords: Flood wave; Danger maps; Dam Safety.

Introdução

As barragens foram desenvolvidas ao longo da história, apresentando registros na maioria dos povos já estudados. Ao longo do século XX, essas barragens foram aprimoradas e se desenvolveram tanto em tamanho como em comprimento, sendo construídos barramentos ao longo de rios para irrigação e reserva d'água para

consumo, portanto, uma prática constante na história da humanidade (Cruz, 1996).

Enquanto estruturas hídricas, as barragens são construídas transversalmente dentro de um curso de rio permanente ou não permanente, para fins diversos, como: contenção ou abastecimento de água (ANA, 2021). Hoje, existem mais de

58.000 barragens no mundo, registradas pelo censo de 2019 da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2019), sendo a maioria construídas nos últimos 60 anos, devido ao aumento populacional que levou à expansão das demandas hídricas.

As barragens têm um papel sólido no Brasil, devido a sua utilização para geração de energia elétrica, abastecimento urbano, irrigação etc., porém os riscos de uma ruptura de um barramento incidem principalmente sobre as populações residentes a jusante das estruturas, obtendo um grande risco associado a essas estruturas (Tschiedel et al., 2019).

Souza et al. (2022) destaca que a ruptura da barragem pode ocorrer por uma sucessão de erros na etapa de projeto, durante sua execução e/ou durante sua operação.

Ainda, as obras de infraestrutura de barragens estão diretamente ligadas ao desenvolvimento da sociedade, desde a antiguidade, onde a população se concentrava em locais com grande oferta hídrica (Pereira et al., 2024).

O estudo de Carmo (2013), compilou os principais rompimentos de barragens no mundo: a barragem de terra na cidade de Johnstown em 1889, que gerou 2200 vítimas; a barragem de St. Francis, perto de Los Angeles, Califórnia, EUA, que teve 600 vítimas; a barragem de Malpasset, a cerca de 7 km a norte de Fréjus, na França em 1959, que totalizou 423 vítimas e deixou ainda 79 crianças órfãs; a barragem construída no rio Vajont, Itália, onde ocorreu deslizamento de uma encosta, em 1963, deixando cerca de 2500 vítimas; e a barragem de Teton, uma barragem de terra construída em Fremont County, no Rio Teton, Idaho, EUA, ocorrendo seu rompimento em 1976, resultando em uma grande destruição e num elevado número de vítimas.

No Brasil, destaca-se na última década o rompimento das barragens de Fundão, em 2015, e a barragem B1, em 2019, ambas barragens de rejeitos, localizadas no estado de Minas Gerais. A barragem de Fundão, de propriedade da Sociedade Anônima Samarco Mineração S.A., situada no município de Mariana, teve seu rompimento em novembro 2015, onde acarretou a erosão da barragem de Santarém e resultou no derramamento de aproximadamente de 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no vale do rio Doce, destruindo cerca de 1.469 ha de vegetação e na morte de trabalhadores da Samarco (Bueno; Delpupo, 2017). Já a barragem B1, localizada no município de Brumadinho, no complexo da Mina do Córrego do Feijão, Minas Gerais, de propriedade da Mineradora Vale S.A., no seu

rompimento em janeiro de 2019, liberou cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério, contaminando o rio Paraopeba e resultando em mais de 228 mortos, sendo considerado o maior acidente de trabalho do Brasil (Azevedo et al., 2020).

Além disso, o evento ocorrido em 2015, atingiu mais de 1 milhão de pessoas e os distritos de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo foram destruídos com a onda de inundação (Mifarreg; Fernandes; Campos, 2022).

Existem diversas formas de rompimento de barragem, sendo as duas principais o "overtopping" e o "piping". O "overtopping", refere-se ao galgamento, quando o vertedouro não suporta extravasar a vazão e a água verte sobre a crista da barragem e o "piping", quando os problemas de infiltração e entupimento do sistema de drenagem interno da barragem, geram brechas que se iniciam como pontos de vazamento e crescem a partir do ponto de surgimento (Neves et al, 2021).

De acordo com Aguiar (2015) e Zuffo (2005), os principais países que possuem legislação sobre segurança de barramentos são: Austrália, Áustria, Canadá, Reino Unido, Finlândia, França, Alemanha, Holanda, Indonésia, Itália, Noruega, Portugal, Romênia, África do Sul, Espanha, Suécia e Estados Unidos.

A legislação brasileira sobre segurança de barragens teve início no ano de 2010, com a Lei Nº 12.334, a qual estabelece 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, criando o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (Brasil, 2010). A referida norma é a primeira regulamentação no ordenamento jurídico pátrio que trata, exclusivamente, da segurança de barragens, além de inovar em vários aspectos (Silva et al., 2020). A Lei Nº 12.334, foi modificada em 2020, com a Lei Nº 14.066, que redefiniu os critérios para os barramentos obrigatórios da elaboração pelo empreendedor, do Plano de Segurança de Barragem (PSB) e do Plano de Ação Emergencial (PAE) (Brasil, 2020).

A lei aplica-se para todas as barragens que possuam 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 quinze metros, volume do reservatório maior ou igual a 3 hm³, reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis, categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas e categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador (Brasil, 2020).

De acordo com Oliveira et al. (2024), o Brasil ainda tem dificuldades consideradas na gestão de desastres, sejam eles naturais ou não, mesmo em casos frequentes de ocorrência, os eventos têm consequências graves devido à falta de gestão e controle dos órgãos públicos e a população desinformada. Com isto, a aplicação mais exigente da legislação e disseminação de informações coerentes, rápidas e frequentes a população sobre segurança de barragens é uma importante ferramenta para auxiliar na gestão em casos desses eventos.

Outro aspecto relevante nos estudos de ondas de inundação são as mudanças climáticas, que devem ser inseridas nas legislações atuais. No trabalho de Loza; Fidelis (2022) destacaram a ausência da consideração das mudanças climáticas em projetos como ponto relevante nas legislações de segurança de barragens nos países do Canadá, Omã e Portugal, aspecto apenas encontrado na pesquisa de Randell; Curley (2023) nos Estados Unidos, devido ser tratar de uma problemática recente na sociedade mundial.

Os estudos de simulação hipotético do rompimento de barragens e o conhecimento prévio das zonas de maior vulnerabilidade se tornaram fundamentais na atualidade. Segundo a Comissão Internacional Sobre Grandes Barragens, em inglês International Commission On Large Dams ou ICOLD (2023), a ampla difusão de conhecimentos sobre segurança de barragens fez a taxa global de falhas de barragens diminuir de 1% para 0,25% ao longo dos últimos 40 anos em todo o mundo.

Ainda, simulação hipotético do rompimento de barragens é uma medida de prevenção de acidentes semelhantes aos rompimentos das barragens de Mariana, ocorrido em 2015, e de Brumadinho, em 2019, e se constitui como estratégia de enfrentamento aos colapsos que desabrigam centenas de pessoas e afetam as condições ambientais da região devastada.

Além do quantitativo significativo de perdas de vidas humanas nos acidentes de Mariana e Brumadinho, que juntos totalizaram 298 mortes, os acidentes provocaram um alto índice de adoecimento físico e mental dos sobreviventes (Araújo; Costa; Gonçalves, 2022). Ademais, esses acidentes podem provocar os deslocamentos da população e a perda daquele território que vai além de moradia, mas faz parte da história e identidade daquela comunidade (Silva; Ribeiro, 2022).

Devido à esta problemática, a hipótese desta pesquisa é a utilização do software HEC-RAS como uma ferramenta de fácil manuseio e com resultados satisfatórios em simulações computacionais de ruptura de barragem para

definição da mancha de inundação e auxílio em medidas mitigadoras em casos de acidentes.

Esses modelos matemáticos, como o HEC-RAS, utilizam nas suas representações e propagação de escoamentos, ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, sendo a extração dos dados de geometria realizado a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) já conhecido, sem a necessidade de coleta de dados em campo, economizando assim tempo e dinheiro, sendo uma ferramenta econômica e de fácil aplicabilidade (Mendes et al., 2022).

Entre os trabalhos que utilizam essa hipótese no estado de Pernambuco, destaca-se os de Neves et al. (2021), Silva et al. (2021) e Silva et al. (2022) para barragens de Jucazinho, Jazigo e Barragem São Bento do Una, respectivamente, ambos fizeram a contraposição de diferentes tempos de ruptura para simulação, como resultado obtiveram que o tempo de ruptura não influem de forma significativa a área da mancha, mas impacta no tempo de chegada da onda. Ainda, os trabalhos se mostraram eficazes no uso do software HEC-RAS para simulação de rompimento, identificando a periculosidade de uma hipotética ruptura. Ainda, o trabalho de Silva et al. (2021), também utilizou do software HEC-HMS para a construção do hidrograma de ruptura hipotética.

A barragem Chinelo, objeto de estudo deste estudo, localizada no município de Carnaíba, sertão pernambucano, é categorizada com o dano potencial associado alto e possui um volume de cerca de 3,4 hm³, estando dentro dos parâmetros definidos pela Lei N^o 14.066, de setembro de 2020. Com isto, a barragem necessita do desenvolvimento das políticas de segurança, como a elaboração do Plano de Segurança de Barragem (PSB) e Plano de Ação Emergencial (PAE), o qual é consubstanciado pela simulação hipotética de ruptura.

Portanto, este trabalho aborda uma estrutura hídrica de potencial destrutivo para a referida região e expõe a simulação computacional hipotética de rompimento da barragem Chinelo, que fica a apenas 3 km da zona urbana do município de Carnaíba-PE, sendo imprescindível a delimitação das áreas de vulnerabilidade e risco. O objetivo é realizar a simulação computacional de rompimento hipotético da barragem Chinelo, a fim de obter os mapas de perigo, determinando assim, as zonas de vulnerabilidade, com intuito de contribuir para estudos futuros.

Material e métodos

A metodologia baseou-se primeiramente

no estudo da caracterização da barragem e do local onde está inserida, e depois concretizou-se no estudo da simulação matemática descrita em cinco passos: elaboração do hidrograma de ruptura no software HEC-HMS 4.9, determinação do cenário de ruptura, estudo e elaboração dos parâmetros de formação da brecha de ruptura, simulação hipotética de rompimento no software HEC-RAS e construção dos mapas de perigo.

Caracterização da Área de Estudo

a barragem Chinelo está situada na bacia hidrográfica do rio Pajeú, intitulada Unidade de Planejamento Hídrico UP-11, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco - PERH-PE (Pernambuco, 2022). A barragem de terra-enrocamento foi construída no município de Carnaíba, para fins de abastecimento

público e usos múltiplos. O município está localizado na microrregião do Pajeú, sendo um dos municípios mais populosos da região, com cerca de 19.666 habitantes, de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021).

A caracterização da barragem se deu, primeiramente numa pesquisa bibliográfica dentro dos órgãos federais, dos dados disponibilizados sobre a barragem e também, com os documentos cedidos pelo seu órgão empreendedor, a Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento de Pernambuco (SRHS-PE).

Com isto, foi elaborado uma tabela resumo com suas principais características encontradas, conforme Tabela 1 e o mapa de localização da Barragem Chinelos (Figura 1).

Tabela 1. Principais características da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

(Continua)

Denominação oficial	Barragem Chinelo
Empreendedor	Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento
Entidade fiscalizadora	Agência Pernambucana de Águas e Clima -APAC
LOCALIZAÇÃO	
Rio	Riacho da Chinela
Município	Carnaíba
Coordenadas Norte e Leste	07°46'57,10'' S e 37°47'20,00''W
BARRAGEM	
Tipo	Terra homogênea
Altura máxima acima da fundação	13,4
Cota do coroamento	65,5m
Comprimento do coroamento	316,00 m
BACIA HIDROGRÁFICA	
Área	116,58
RESERVATÓRIO	
Nível Máximo Normal (NMN)	63,00
RESERVATÓRIO	
Capacidade total	3.453.800 m ³
Área inundada (NMN)	980.680 m ²
EXTRAVASOR DE CHEIAS	
Localização	Ombreira esquerda
Tipo	Não identificado
Descrição do canal	Canal de restituição
Comprimento	77,00 m

Tabela 1. Principais características da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

(Conclusão)

DESCARREGADOR DE FUNDO

Localização	EST 11 + 13,50
Cota da soleira à entrada	58,00

TOMADA DE ÁGUA

Cotas das tomadas de água à entrada	58,00
-------------------------------------	-------

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir da APAC (2015).

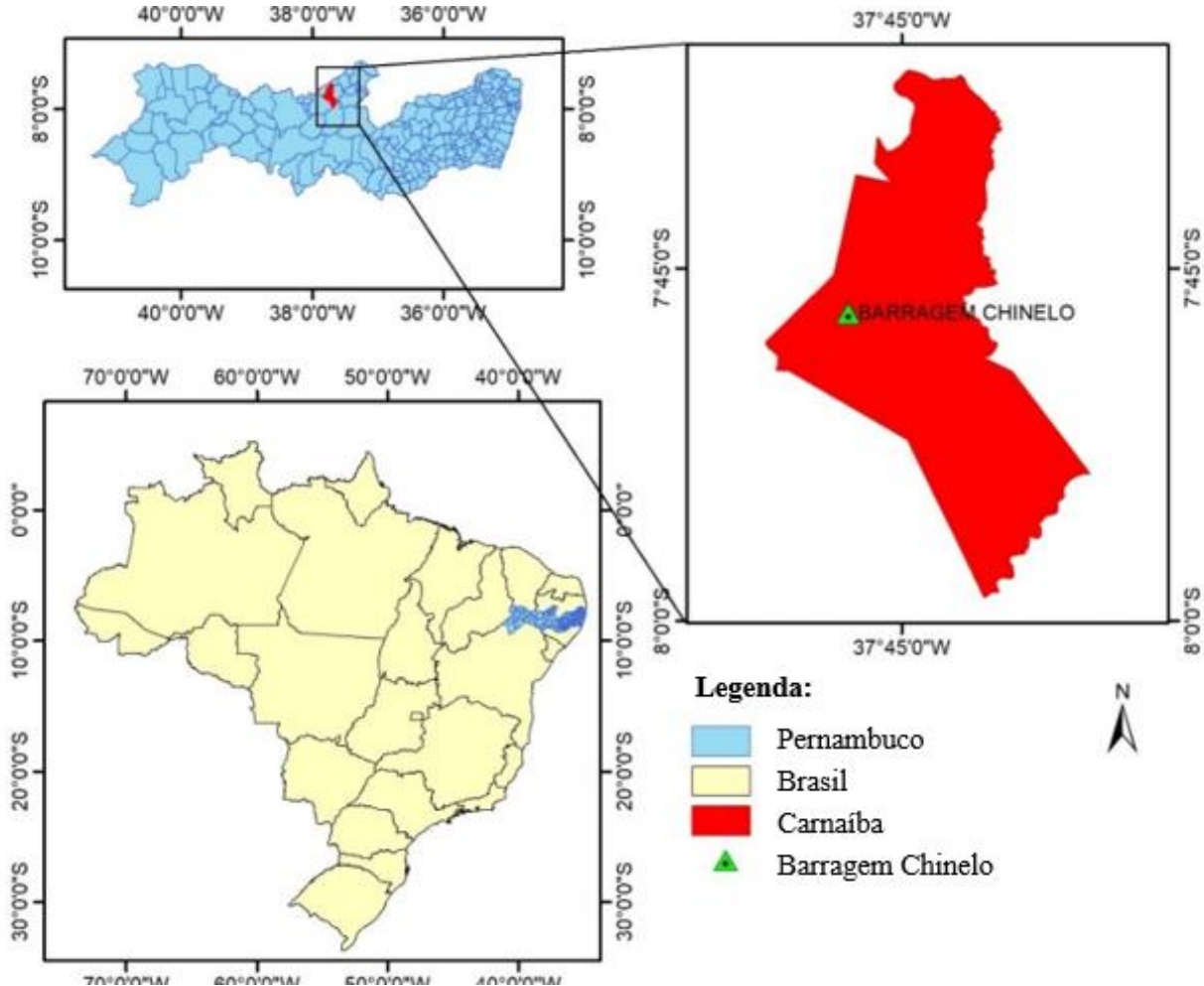


Figura 1. Mapa de localização da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

Fonte: Elaborado pelas autoras.

A barragem Chinelo possui antecedentes de acidentes de barragens. Em janeiro/2002 ocorreu o galgamento da barragem, que resultou na destruição da crista, erosão no aterro e destruição do vertedouro, onde a população à jusante foi evacuada, segundo dados da Inspeção de Segurança Regular realizada pelo órgão empreendedor em 2022 (SEINFRA, 2022).

Vale ressaltar que na época a zona urbana do município de Carnaíba possuía, de acordo com IBGE (2021), 6.560 habitantes, no censo de 2010 este número já havia aumentado para 7.624, considerando que o barramento fica a apenas 3 km da área urbana município é necessário o monitoramento constante da barragem.

Destaca-se ainda nesta inspeção, a

recomendação a atualização dos estudos hidrológicos para determinação das cheias de projeto, respectiva verificação da capacidade de descarga, que se encontra oxidada e não há registros do seu funcionamento. Além de evidenciar a importância de fazer o “As Is”, o levantamento topo batimétrico da bacia hidráulica da barragem e se for o caso, realização de sondagens, para analisar a integridade das estruturas e fundação da barragem atualmente.

Atualmente, a barragem possui como instrumentação réguas de nível com dados disponibilizados pelo site SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, de domínio da ANA, com dados desde 15/09/2009 até 05/04/2024.

Neste período, a maior taxa de pico ocorreu no dia 03/03/2011, com 4,07 hm³, chegando à cota de 63,59 m, que corresponde a 118,01% da sua capacidade. Entre 2021 e 2024, a maior taxa de pico ocorreu em 05/04/2024, com um volume de 3,23 hm³ e uma cota de 62,75, compreendendo a 93,62 % da sua capacidade total. A última vez que o reservatório apresentou capacidade 0% foi em 29/02/2020 (SAR, 2024).

No trabalho de Prado, Silva (2024), que elaborou uma ordem de prioridades das barragens para tomada de decisões quanto à segurança de barragens que tinham como empreendedor a extinta SEINFRA, classificou a barragem Chinelo em 4º lugar com um Índice de Risco (IR) de 3542, que representa o nível de perigo que a barragem oferece à comunidade.

Hidrograma de Ruptura

Para a construção do hidrograma de ruptura, foram definidas as seguintes variáveis: determinação do “*curve number*” (CN), área da bacia hidrográfica da barragem Chinelo, tempo de concentração, duração de chuvas de projetos e a curva cota-área-volume da bacia hidráulica do barramento em estudo. A área da bacia hidrográfica e a curva cota-área-volume da bacia hidráulica foram utilizadas com base nas informações descritas na ficha técnica da barragem Chinelo, disponibilizada pela APAC (2015).

Para a determinação do “*curve number*”, baseado na classe hidrológica do solo e no uso da terra e ocupação do solo da bacia, foi calculado a partir da média ponderada das áreas de uso e ocupação do solo, delimitado a bacia hidrográfica da barragem Chinelo, caracterizados no shapefile disponibilizado pela ANA. Esses dados de classes hidrológicas de solos, foram feitos com a escala 1:250.000 e resolução de 1km de uso do solo e ocupação da terra do IBGE (ANA, 2018).

A curva intensidade-duração-frequência (IDF) aplicada foi a do posto Afogados da Ingazeira, administrado pela ANA, descrita por Coutinho *et al.* (2013), sendo calculada a precipitação para o tempo de retorno do cenário de ruptura escolhido. Por fim, foi utilizado o método de blocos alternados para a geração da chuva de projeto com base no tempo de concentração calculado. A partir dos dados obtidos foi utilizado o software HEC-HMS 4.9 para a geração do hidrograma de ruptura.

O software HEC-HMS consiste em uma ferramenta eficaz para o cálculo do hidrograma de ruptura, ele é capaz de utilizar diferentes variáveis de precipitação e evaporação, representando fisicamente uma bacia hidrográfica e através da conexão de suas redes, simula o processo de

escoamento, calculando o hidrograma em diferentes métodos (Mendes, 2008).

Cenário de Ruptura

O cenário de ruptura foi elaborado de acordo com as recomendações da ANA (2016), a respeito do cenário de ruptura foi considerado uma cheia associada a um menor tempo de recorrência num cenário de ruptura em dia de sol, por ser considerado um cenário de ruptura mais provável.

Portanto, para a simulação da barragem Chinelo foi considerado um dia de sol, com uma chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos.

Brecha de Ruptura

A estimativa da localização de uma ruptura de barragem, dimensões e tempo de desenvolvimento são cruciais em qualquer avaliação do risco potencial de uma barragem. Os parâmetros da brecha afetarão diretamente a estimativa do pico de vazão que sai da barragem, bem como qualquer possível tempo de aviso disponível para locais a jusante. Infelizmente, a localização da violação, tamanho e tempo de formação, são muitas vezes as informações mais incertas em uma análise de falha de barragem (USACE, 2014).

A brecha de ruptura de um barramento é caracterizada em três parâmetros: a sua configuração geométrica, as suas dimensões e o tempo de ruptura. Esses fatores são determinantes na mancha de ruptura, pois influenciam nos valores de vazões, dos níveis e o tempo de chegada da onda de inundação, preceitos fundamentais para a elaboração do plano de emergência da barragem (ANA, 2016).

Atualmente existem diversas metodologias para determinação dos parâmetros da brecha de ruptura, sendo priorizadas de acordo com o tipo de material da estrutura do barramento e/ou seu volume. Em 2003, a Eletrobrás recomendou o uso da metodologia de “Fread e Harbaugh” que refere-se a um modelo mais simples, com variação não linear, usada para brecha em formato triangular ou trapezoidal, representadas na Equação 1 e Equação 2.

$$B = 2,15764K_o(VH)^{0,25} \quad \text{Eq. 1}$$

$$T = 0,00714V^{0,47}H^{-0,90} \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

B = largura média, em metros;

T = tempo de ruptura, em horas;

K_o = 0,7 para piping e 1,0 para galgamento;

V = volume do reservatório, em m³;

H = profundidade a montante, em metros acima do fundo da brecha.

Outra metodologia, bastante utilizada foi descrita por Froehlich (2016) que se baseou nos

parâmetros de 111 rupturas de barragens de aterro. Expressa-se através da relação da elevação da superfície da água do reservatório na qual a formação de brecha começa, a profundidade crítica de galgamento, a altura, largura média e razão média de inclinação lateral da brecha de ruptura e o tempo de formação da brecha, descrita na Equação 3 e Equação 4.

$$B = 0,23K_m V_W^{1/3} \quad \text{Eq. 3}$$

$$T = 60 * \sqrt{\frac{V_W}{gH_b^2}} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde,

B = largura média da brecha, em metros;

K_m = Constante (1,4 para falhas galgamento, 1,0 por piping);

V_W = volume do reservatório no momento da falha, em m³;

H_b = altura da brecha final, em metros;

g = aceleração gravitacional, em 9,81 m/s²;

T = tempo de formação da brecha, em segundos.

A brecha de ruptura utilizada foi determinada de acordo com as Equações 1, 2, 3 e 4, respeitando os limites determinados pela ANA, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Valores característicos da brecha de ruptura

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

Fonte: Adaptado de ANA (2016, p. 37) e USBR (1989). Simulação Hipotética de Rompimento no software HEC-RAS

O HEC-RAS é um software desenvolvido pelo corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América “US Army Corps of Engineers”, que permite a execução de um fluxo hidráulico constante em uma dimensão e o cálculo hidráulico de fluxo do rio, instável uni e bidimensional. Além disso, o software pode simular rompimentos de barragens, tanto em galgamento “overtopping”, quanto em “piping” para barragens de terra, e o tipo mais instantâneo de falhas de barragens de concreto, também pode ser modelado (USACE, 2016).

O software requer uma representação precisa da topografia do terreno e os parâmetros hidrológicos usados como condições de contorno. Além disso, medidas de modelo apropriados para rugosidade do terreno e estruturas hidráulicas devem ser estimados e então calibrados para ter um resultado mais conciso (USACE, 2014).

A base na topografia utilizada para caracterização da barragem, foi a disponibilizada pelo Governo do Estado de Pernambuco, Pernambuco Tridimensional - PE3D (Pernambuco,

2016). O modelo digital do terreno (MDT) e as ortofotos utilizadas, possuem três etapas de validação: Análise de Completude, Análise de Consistência e Análise Estatística da Precisão Planialtimétrica, sendo disponibilizados com a escala de 1:1.000 e a resolução espacial de 1m.

Ressalta-se a importância de uso de uma geometria representativa do canal em estudo, pois conforme os trabalhos de Tschiedel et al. (2021) e Valle et al. (2024) a geometria tem impacto direto nos resultados, sendo necessário cada vez mais ampliarmos a disponibilidade de Modelos Digitais do terreno de alta precisão e gratuito para o desenvolvimento desses estudos.

Para o cálculo da área a jusante que será inundada refere-se ao grau de amortecimento da onda de ruptura que depende essencialmente do volume de água armazenado no reservatório, das características geométricas vale a jusante, das respectivas rugosidades, das inclinações do talvegue, da existência de zonas de armazenamento de água no vale e nos seus afluentes, entre outros (Banco Mundial, 2014). A relação entre o volume do reservatório e a distância a jusante do mapa de inundação é descrita na Tabela 3.

Tabela 2. Relação volume do reservatório vs. distância máxima para jusante

Volume Armazenado (m³)	Distância total para jusante (km)
5	até 10
5-75	10-25
75-200	25-50
200	50-100

Fonte: Banco Mundial, 2014, p. 33.

A zona de autossalvamento (ZAS), corresponde aos 10 km a jusante da barragem ou a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos. Sendo um mapeamento fundamental, pois ela corresponde a região onde não tem tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente, sendo necessário o mapeamento dessa população e o treinamento dela para o maior número de salvamento de vidas humanas em caso de rompimento (ANA, 2016). Com isto, foi utilizado a distância de 10 km a jusante para a Barragem de Chinelo.

A partir da topografia do terreno foram determinados os parâmetros de simulação, mediante os seguintes passos:

- inserção da área de simulação de 10 km a jusante da barragem, por meio da ferramenta 2D Flow Area, que estabelecem regiões de um modelo em que o fluxo através dessa região será calculado com os algoritmos de cálculo de fluxo bidimensional, sendo utilizada uma malha de 25x25m;
- inserção da seção de entrada e saída, através da ferramenta BC lines;
- integração dos dados de entrada e saída, sendo indicado na saída a declividade do rio e na entrada o hidrograma de ruptura;
- a simulação com a ferramenta Unsteady Flow Analysis.

Para garantia da estabilidade do sistema, foram utilizadas duas ferramentas importantes: a primeira o aquecimento do modelo adotando uma vazão constante 10m³/s para garantir a determinação do leito do rio ao longo da simulação, usado posteriormente como inicial condição da

simulação. E a segunda, o número de Courant, que é um número adimensional, que relaciona as dimensões espaciais e temporais da simulação (WANDER, 2011), descrito na Equação 5.

$$C = \frac{v\Delta x}{\Delta t} \quad \text{Eq. 5}$$

onde,

v=velocidade de escoamento;

Δx =dimensão do volume discreto;

Δt =passo de tempo de integração.

Conforme já consagrado na literatura, o número de Courant não deve ultrapassar o número 1, devido a isto, neste trabalho foi utilizado o intervalo de 0,4 a 1.

Construção dos Mapas de Perigo

A simulação da mancha de ruptura se deve a necessidade de se determinar a área que poderá causar algum dano ambiental, à população ou as edificações a jusante daquele barramento. Devido a isto, os mapas perigos se baseiam em parâmetros fundamentais para se classificar este dano: a área atingida, a profundidade da cheia (H) e a sua velocidade de propagação (V) e o risco hidrodinâmico ou intensidade de propagação, que corresponde a esses fatores combinados $H \times V$, dado em m² /s (ANA, 2011).

Para a construção dos mapas de perigo, foi exportado do HEC-RAS os rasters de máxima velocidade e profundidade. Para geração do raster de intensidade foi utilizado o software ArcGis, através da ferramenta Raster Calculate, onde, mediante o produto da velocidade e profundidade, gerou um novo raster de intensidade. A partir daí foi feita uma análise aprofundada dos maiores pontos de perigo para o município de Carnaíba -PE, com auxílio da metodologia utilizada por Ribeiro Neto et al. (2016), conforme Tabela 4.

Tabela 4. 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).

Resultados e discussão

Para a construção do hidrograma no software HEC-HMS foram utilizados os valores explicitados na Tabela 5.

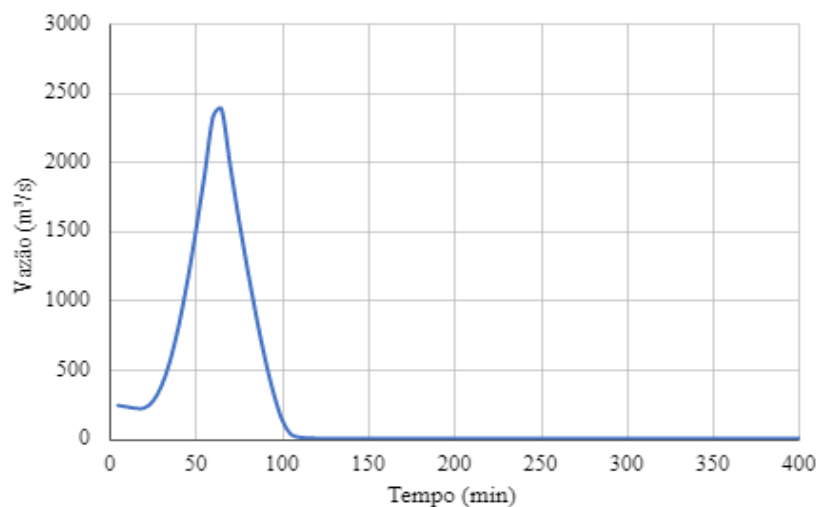
Tabela 5. Valores para construção do hidrograma de ruptura

Dado	Valor	Unidade	Dado	Valor	Unidade
Área Bacia Hidrográfica	116,58	km ²	Brecha de Ruptura		
CN	80		Topo da Brecha	65	m
Tempo de concentração	369	min	Cota inferior da brecha	54	m
Vertedouro			Largura da brecha	63	m
Cota	63	m	Inclinação da brecha	0,25	
Largura	77	m	Tempo de Formação de brecha	0,8	h

Fonte: Elaborado pela autoras.

O hidrograma de ruptura resultou numa vazão máxima de 2.380,60 m³/s, ocorrendo no tempo de 01h05min, conforme Figura 2, sendo

considerada a ruptura por galgamento no TR de 100 anos.

**Figura 2.** Hidrograma de ruptura da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir do HEC-HMS.

Na verificação do perigo causado pelo possível rompimento da barragem Chinelo, observou-se que o nível de perigo era alto em relação a profundidade, onde grande parte da área da mancha de inundação possui uma altura maior

que 1,20m (Figura 3). Já o mapa de velocidade, apesar de apresentar a maior parte em nível alto, apresenta uma parte significativa de perigo entre médio e baixo (Figura 4).

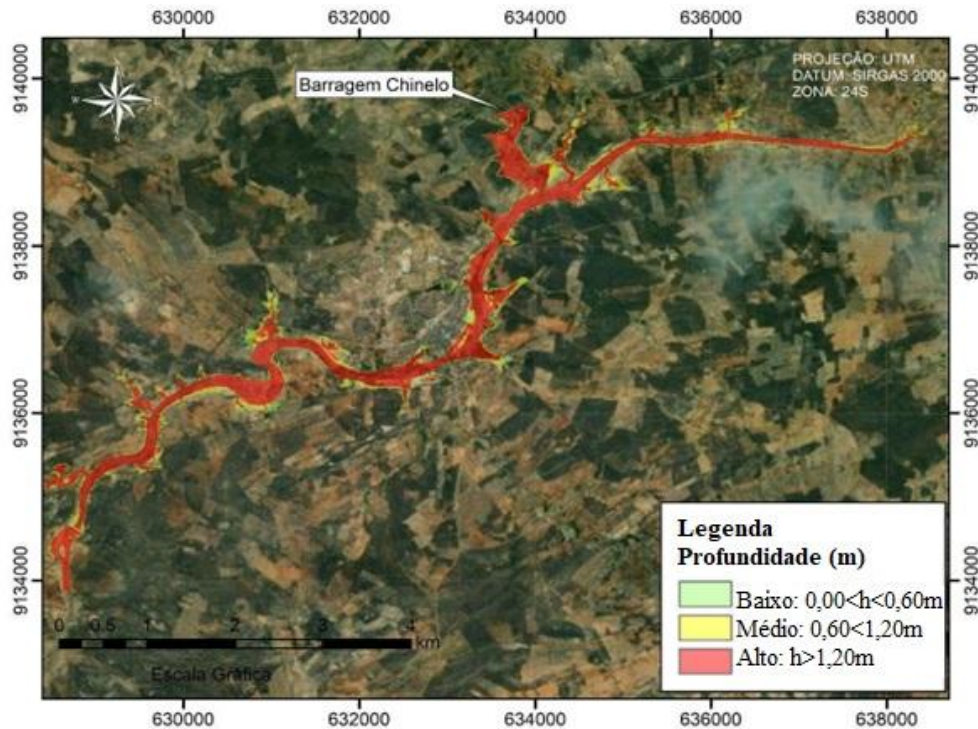


Figura 3. Mapa de profundidade da cheia da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir do HEC-RAS.

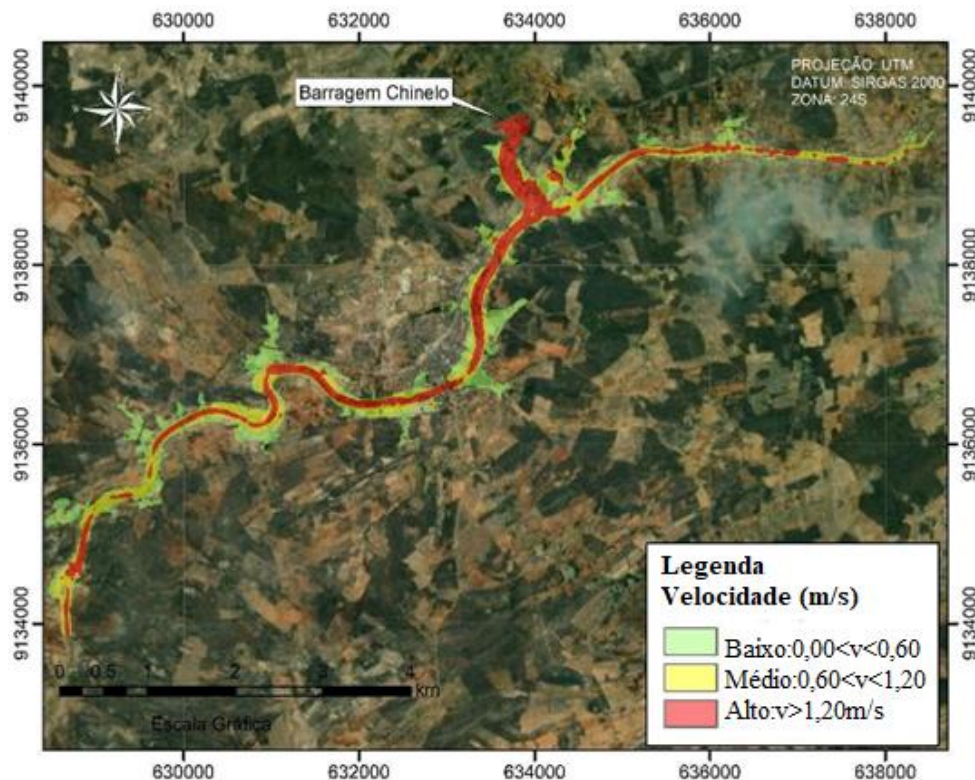


Figura 4. Mapa de velocidade de propagação da cheia da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

Fonte: Elaborado pela autora a partir do HEC-RAS.

Ainda, foi gerado o mapa de risco hidrodinâmico ou intensidade de propagação de

onda, no qual a maioria das áreas do mapa apresentou risco alto, acima de 1,5 m²/s. Segundo

Synaven *et al.* (2000), a partir de $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, crianças e deficientes são arrastados e entre $0,5$ e $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$, adultos são arrastados.

Sendo assim, o possível rompimento da

barragem Chinelo oferece grande risco à população a jusante do barramento, principalmente no município de Carnaíba-PE, conforme apresentado na Figura 5.

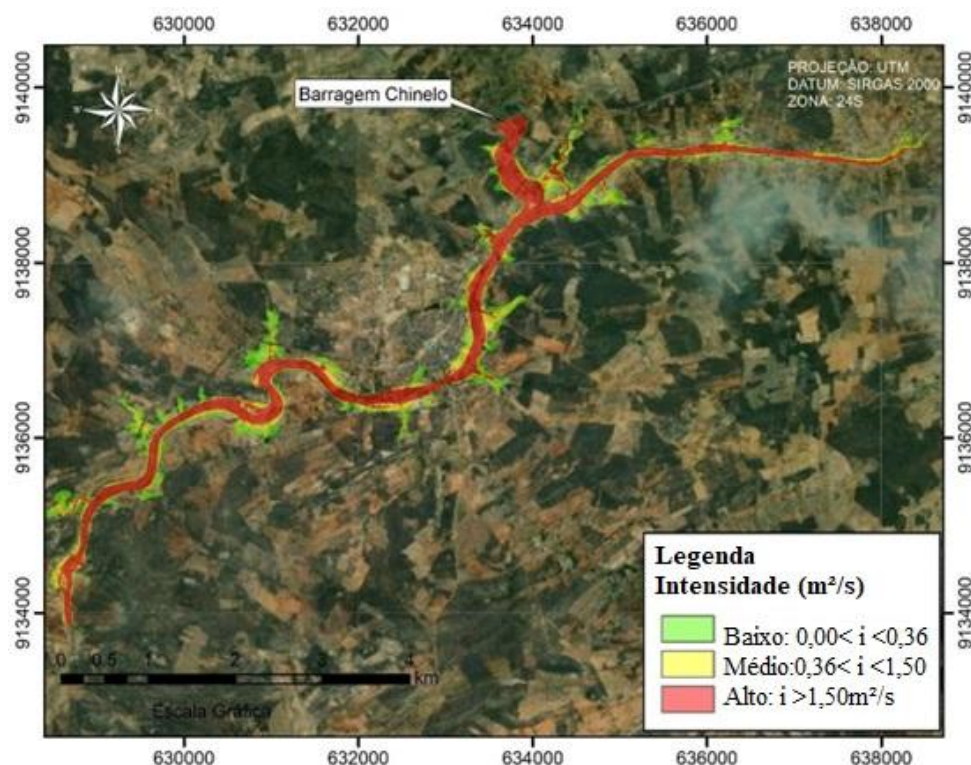


Figura 5. Mapa de intensidade de propagação da cheia da barragem Chinelo, Carnaíba/PE.

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir do ArcGis.

Foi quantificado que a mancha de inundação atinge cerca de 50 edificações, com base no software Google Earth, com imagens datadas 10/09/2021.

A primeira edificação é atingida, em cerca de 40min após o rompimento. Sendo assim, com a implantação do Plano de Ação Emergencial (PAE), seria possível evitar danos às vidas humanas, conforme a ANA (2016), que estima que o tempo de chegada das autoridades é de cerca de 30 min.

Vale ressaltar, que dessas edificações, 32 estão localizadas na zona urbana do município de Carnaíba -PE, representando um grande impacto na

cidade, que deve contar com áreas de abrigo para as famílias residentes dessas edificações.

Salienta-se, que a mancha de inundação também atingiria parte da PE-320, que fica a apenas 907 m da barragem Chinelo e é impactada em 05 min após o rompimento da barragem.

Ainda, para melhor análise foram feitas seções transversais ao longo do trecho do rio para analisar os parâmetros de vazão de pico, lâmina d'água, tempo de pico, distância do barramento e velocidade de chegada das seções geradas, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Seções transversais ao longo do trecho simulado

(Continua)

Seção	Distância a jusante (km)	Profundidade máxima na seção (m)	Vazão máxima (m^3/s)	Tempo de Pico (HH:MM)
1	0,65	9,05	2.337,24	01:05
2	1,73	7,55	1.229,91	01:15
3	2,359	6,47	1.139,68	01:20
4	4,512	6,18	726,30	01:45
5	5,464	5,61	668,19	02:00

Tabela 6. Seções transversais ao longo do trecho simulado

(Conclusão)

Seção	Distância a jusante (km)	Profundidade máxima na seção (m)	Vazão máxima (m ³ /s)	Tempo de Pico (HH:MM)
6	7,469	5,31	501,34	02:30
7	8,761	4,81	434,32	03:00
8	9,39	3,90	424,34	03:20

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir do HEC-RAS.

A partir do Quadro 5, é possível observar que o tempo de pico da onda de inundação é maior que 1 hora, portanto, haveria tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente.

Conclusão

Com os resultados da simulação constatou-se que, em caso de rompimento da barragem Chinelo, há perigo à vida humana, principalmente na zona urbana do município de Carnaíba-PE, onde impacta cerca de 32 edificações.

Ainda, o rompimento oferece risco à parte da rodovia PE-320, que compreende a principal rodovia do Pajeú e teria que ser interditada, causando prejuízos sociais e econômicos para a região.

O mapa de profundidade apresentou a maior área de nível de perigo alto, enquanto o mapa de velocidade apresentou uma área significativa entre médio e alto. Entretanto, o mapa de intensidade apresenta preocupação com a população a jusante do barramento, pois a partir do nível médio de perigo crianças, deficientes e adultos já são arrastados.

Ainda, foi constatado que a elaboração do Plano de Segurança de Barragem (PSB), com a inclusão do PAE para a barragem Chinelo é imprescindível, visto a ocorrência do galgamento em 2002, sendo necessário um estudo hidráulico-hidrológico para analisar se os parâmetros do barramento encontram-se dentro dos padrões de segurança.

Como visto, o tempo de chegada da onda de ruptura na zona urbana de Carnaíba é lento, sendo possível, com a implantação do PAE a retirada da população sem grandes danos em uma possível ruptura.

Recomenda-se a elaboração do Plano de Segurança da Barragem Chinelo, com a inclusão do Plano de Ação Emergencial, para atribuir, além da simulação mais detalhada e a construção de mais cenários de ruptura, as rotas de fuga e o mapeamento das edificações afetadas, para que

junto com a Defesa Civil torne a vida da população a jusante do barramento, em especial a população residente do município de Carnaíba, mais segura.

Agradecimentos

As autoras agradecem a extinta Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos pelo acesso aos materiais referentes a Barragem Chinelo e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (PEC/POLI) pelo apoio e incentivo à está pesquisa.

Referências

- Agência Nacional De Águas E Saneamento Básico; Fundação Parque Tecnológico de Itaipu. (2011). *Curso Segurança de Barragens. Módulo III: Gestão e desempenho de barragens. Unidade 1: Análise e Gestão de Risco*. Brasil:
- Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. (2024). *Histórico Chinelo*. <https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2016). *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Volume IV: Guia de Orientação e Formulário do Plano de Ação de Emergência (PAE)*. Brasília, DF.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2018). *Curve Number da Base Hidrográfica Ottocodificada*. Brasília, DF:
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2021). *Relatório de segurança de barragens 2020*. Brasília, DF:
- Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2015). *Ficha técnica com cota volume: Barragem Chinelo*. Pernambuco, 2015.
- Aguiar, D., Fais, L., Genovez, A., & Filho, J. (2015). Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens - ISB. *RBRH*, 20(2), 360–368. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p360-368>.
- Araújo, K. F. M., Costa, L. F., & Gonçalves, A. L. (2022). Impactos Psicossociais Dos Desastres Da Mineração Em Mariana E Brumadinho: uma

- revisão integrativa. *Psicologia e Saúde em Debate*, 8(1), 221–237. <https://doi.org/10.22289/2446-922x.v8n1a13>
- Azevedo, D. C. B. d., Toledo, G. d. A., Cohen, S. C., Kligerman, D. C., Cardoso, T. A. d. O. (2020). Desastre de Brumadinho: contribuições para políticas públicas e gestão do saneamento em períodos emergenciais. *Saúde em Debate*, 44(124), 221–233. <https://doi.org/10.1590/0103-1104202012416>
- 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, DF:
- Delpupo, M. V.; Bueno, J. G. R. (2017). Responsabilidade Civil Por Dano Ambiental Decorrente Do Rompimento De Barragem. *Revista Quaestio Iuris*, 10(3). <https://doi.org/10.12957/rqi.2017.25491>
- Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. (2010, 20 de setembro). 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.
- Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020. (2020, 30 de setembro). 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.
- Carmo, J. S. A. (2013). *Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos*. Portugal:
- Coutinho, A. P. et al. (2013). Coletânea de equações de chuvas intensas para o Estado de Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., Bento Gonçalves. *Anais [...]*. Bento Gonçalves.
- Cruz, P. T. d. (1996). *100 barragens brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto*. Oficina de Textos.
- Froehlich, D.C. (2016). Empirical model of embankment dam breaching. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S.L.].
- Governo do Estado de Pernambuco; Pernambuco. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. (2016). *Pernambuco Tridimensional*. [S. L.].
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). *IBGE CIDADES: CARNAÍBA*. [S. I.].
- International Commission on Large Dams (2019). *The History of the World Register of Dams*. www.icold-cigb.org/GB/world_register/history.asp.
- International Commission on Large Dams. (2023). *Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD*. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/GB/dams/dams_safety.asp>. Acesso em: 06 de set. de 2023.
- Loza, A. R. A., & Fidélis, T. (2022). Addressing climate change in EIA legislation and the climate-proofing of dams: a comparative analysis of Canada, Oman and Portugal. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 40(4), 269–282. <https://doi.org/10.1080/14615517.2022.2041160>
- Mendes, T. A. (2008). *Avaliação da vulnerabilidade de barragens ao rompimento de pequenos açudes*. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás). Goiânia - GO.
- Mendes, T. A., Sousa, M. B. de, Pereira, S. A. dos S., Santos, K. A. dos, & Formiga, K. T. M. (2022). Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LIDAR para avaliação de inundações urbanas. *Engenharia sanitária e ambiental*, 27(1), 141–157. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200276>
- Mifarreg, I. E. G., Fernandes, F. A., & Campos, R. B. F. (2022). Conflito socioambiental entre a Colônia de Pescadores Z-19 e as empresas Samarco/Vale/BHP após a ruptura da barragem de Fundão. *Conjecturas*, 22(8), 1346–1362. <https://doi.org/10.53660/conj-1303-x03>
- Neves, Y. T., Rodrigues, A. B. e Cabral, J. J. S. P. (2021). Modelagem computacional do rompimento hipotético da barragem de Jucazinho no estado de Pernambuco (Brasil). *Revista DAE*. 69. 167-182.
- Oliveira, W. A. de, Musse, J. de O., Braga, C., Ocon, C. A., Olímpio, A., Capeloa, C. N., Reis, M. J. dos, Isabella, A. P. J., Pitanga, F. S. M., Silva, D. F. da, Marreira, M., Muniz, C. C. S., Filoni, E., Douradinho, C., Fernandes, A. de O., Menezes, J. C. de A., Barros, L. M. de, Souza, M. G. de, Gomes, J. B.; Ribeiro Filho, A.

- (2024). Gestão de desastres em massa no Brasil –revisão sistemática narrativa. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), e70019. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-069>
- Pereira, A. M., Da Silva, S. R., Pedrosa, H. T. d. S., Alves, I. S., De Oliveira, J. T., Andrade Junior, J. J. (2024). Análise da propagação de cheias resultante de rompimentos em cascata hipotéticos de barragens localizadas no município de Caruaru-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(1), 529–546. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p529-546>
- Pernambuco (2022). Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco: Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. – Recife.
- Pernambuco. (2016). Pernambuco Tridimensional – PE3D. <http://www.pe3d.pe.gov.br/>
- Prado, A. R. M. do. & Silva, S. R. da. (2024). Contribuições para a gestão de segurança de barragens de dois empreendedores estaduais de Pernambuco. *Revista de Geociências do Nordeste*, 10(1), 273–289. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34843>
- Randell, H., & Curley, A. (2023). Dams and tribal land loss in the United States. *Environmental Research Letters*, 18(9), 094001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd268>
- Ribeiro NETO, A., Batista, L., Coutinho, R. (2016). Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2), 377–390. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p377-390>
- Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. (2022). *Relatório de Inspeção de Segurança Regular - Barragem Chinelo*. Pernambuco.
- Silva, J. P. do N., Bello, M. I. M. da C., Da Silva, T. B., & Silva, W. M. P. (2022). Simulação de Rompimento da Barragem São Bento do Una através do Software HEC-RAS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(2), 856–871. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p856-871>
- Silva, É. L. A., & Ribeiro, A. P. (2022). Conflitos E Os Impactos Socioambientais Sofridos Pelas Comunidades Atingidas Pelo Projeto Minas-Rio Da Anglo American: Uma Revisão Sistemática. *Revista de Direito da Administração Pública*, 1(2). <https://centrodeestudosdedireito.com.br/revista/s/index.php/redap/article/view/21>
- Silva, A. C. d., Santana, N. F. J. d., Fonseca Neto, G. C. d., Soares, A. E. P., Pereira, A. M., Silva, S. R. d., Montenegro, S. M. G. L., Azevedo, J. R. G. d. (2021). Contraposição da Equação de Froehlich com o tempo de simulação hipotética de rompimento recomendada da barragem de Jazigo, no sertão pernambucano. *Research, Society and Development*, 10(12), Artigo e572101220854. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20854>
- Silveira, A. (2005). Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(1), 5–29. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n1.p5-29>
- Souza, E. N., Souza, G. A. S., Ferreira Da Silva, I. ., Santos Tatto , K. ., & de Cerqueira Luz, P. A. (2022). Estudo de caso da ruptura da barragem de Fundão (Mariana-MG). *Revista Mackenzie De Engenharia E Computação*, 21(1), 92–117. Recuperado de <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/14708>
- Synaven, K. (2000). The pilot Project Kyrkojarvi dam and reservoir, Seinajoki, Finland. In: nternacional seminal and worksjop risk assesment, dam-break flood análise and emergency action planning. Finnish Environment Institute, Seinajoki.
- Tschiedel, A. F. et al. (2019). Barragens e rompimentos: compilação histórica nacional e internacional. In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 23., 2019, Foz do Iguaçu. Anais[...]. Foz do Iguaçu.
- Tschiedel, A. da F., Jardim, P. F., Possa, T. M., Fan, F. M., & Paiva, R. C. D. de. (2021). Impacto do novo esquema de solução numérica estabelecido no HEC-RAS 6.0 em estudos de rompimento de barragens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24., 2021, Belo Horizonte. Anais[...]. Belo Horizonte-MG. <http://hdl.handle.net/10183/233975>
- United States Army Corps of Engineers (2014). *Using HEC-RAS for dam break studies*. Davis.
- United States Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS Ryver Analysis System: Hydraulic Reference Manual 5.0*. Davis.
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389–397. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2004\)130:5\(389\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2004)130:5(389))
- Wander, A. P. (2011). *Validação das aproximações do tipo Hele-Shaw aplicadas ao escoamento de fluidos viscoplásticos em uma cavidade simétrica*. (Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre.

Valle, M. P. do, Cassel Junior, P. O., Santos, G. S. F. dos, & Patente, F. A. de M. (2024). Análise Da Propagação De Onda Ocasionada Por Rompimento De Barragem: Simulação De Ruptura De Uma Barragem De Água. *Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação*, 10(4), 1822–1842.

<https://doi.org/10.51891/rease.v10i4.13600>
Zuffo, M. S. R. (2005). *Metodologia para avaliação da segurança de barragens* [s.n.]. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REP/OSIP/257858>.