



INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – IEDS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS

VICTAL BAPTISTA MAMBO BIZIAMI

ROMPIMENTO DE PEQUENA BARRAGEM DO SEMIÁRIDO CEARENSE: O
CASO DO AÇUDE ESCOLA NO MUNICÍPIO DE PENTECOSTE - CE

REDENÇÃO - CE

2023

VICTAL BAPTISTA MAMBO BIZIAMI

**ROMPIMENTO DE PEQUENA BARRAGEM DO SEMIÁRIDO CEARENSE: O
CASO DO AÇUDE ESCOLA NO MUNICÍPIO DE PENTECOSTE - CE**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em formato de monografia apresentado ao Curso de Engenharia de Energias, vinculado ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

REDENÇÃO-CE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Biziami, Victal Baptista Mambo.

B551r

Rompimento de pequena barragem do semiárido cearense: o caso do açude Escola no município de Pentecoste - CE / Victal Baptista Mambo Biziami. - Redenção, 2023.
33f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Geoge Leite Mamede.

1. Rompimento de barragem. 2. Inundação. 3. Açude - Ceará. I.
Título

CE/UF/BSP

CDD 338.1

TERMO DE APROVAÇÃO


VICTAL BAPTISTA MAMBO BIZIAMI

ROMPIMENTO DE PEQUENA BARRAGEM DO SEMIÁRIDO CEARENSE: O CASO DO AÇUDE ESCOLA NO MUNICÍPIO DE PENTECOSTE – CE.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado em formato de monografia ao Curso de Engenharia de Energias, vinculado ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

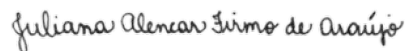
Aprovado aos, 05 de julho de 2023

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. George Leite Mamede (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Juliana Alencar Firmo de Araújo

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Dedico este trabalho primeiramente
a Deus, a minha mãe, esposa, filha
e à família em geral.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus Todo Poderoso pela oportunidade concedida por Ele neste exato momento, pela vida e todas as bênçãos que foram proporcionadas por intermédio do Senhor Jesus Cristo a Ele toda honra e glória.

Quero dirigir-me agora a minha família, minha esposa Dionísia Cristóvão Francisco pelo árduo apoio que sempre tive dela, mesmo quando a nossa princesa veio ao mundo, Vinilda Cristóvão Mambo, momento esses que foram muito difíceis para nós. Apesar da falta de experiência como pais, conseguimos superar e cuidar da nossa linda filha, isso marcou a minha vida tanto como estudante quanto pai, e ao mesmo tempo, esposo de uma maravilhosa companheira.

Especial agradecimento para minha linda mãe Mariana Mambo Tati, que foi provedora da minha saída de Angola e que sempre acreditou no meu potencial mesmo quando ninguém enxergava. Palavras faltam para descrever o quanto sou grato por ser seu filho e pelo carinho que sempre tive estando perto ou mesmo distante da senhora, seja honrada minha mãe neste exato momento marcante para mim assim como para toda família.

Quero honrar também a minha avó, que desde mais novo olhou para mim como um neto especial, pelo fato de ter falado as seguintes palavras: “*Seus tios são todos pescadores, mas você não será pescador como eles*”. Lembro-me como se fosse hoje ouvindo essas palavras, que têm um significado na minha vida ainda hoje. Posso dizer que não sou só pescador, mas um Engenheiro. Não porque a profissão da pesca não tenha valor, pelo contrário foram os meus tios pescadores que me ajudaram a chegar até aqui, dentre os quais posso citar os tios Nico, Minguito, Luís, Inácio, Quinho e Lembinha.

Também gostaria de agradecer aos meus tios, Afonso, Buiti e Gilberto, minha cunhada Laura, aos meus irmãos Pedro, João, Silvério, Ambrósio, aos colegas e amigos Joel, Adilson, Pacato, Dala, Fernanda, Virginia e Félix.

Ao meu orientador Prof. Dr. George Leite Mamede que muito fez desde o princípio do meu trabalho e que sempre esteve disponível a orientar-me naquilo que era necessário para que este trabalho hoje apresentado estivesse concluído com sucesso e muito esforço.

RESUMO

Os danos provocados pelo rompimento da barragem têm resultados catastróficos com impactos diretos à população que vive nas imediações da rota de propagação da onda de cheia. Este estudo tem como objectivo reproduzir o processo do rompimento da barragem do açude Escola, localizado na Fazenda Experimental do Vale do Curú no município do Pentecoste-CE, com capacidade de armazenamento de 51.600 m³ e bacia hidrográfica contribuinte de 2,6 km². Os dados de intensidade de chuva associado ao tempo de concentração na bacia hidrográfica do açude Escola foram estimados com base na equação de intensidade-duração-frequência gerada para o posto pluviométrico Pentecoste. Para caracterização da fenda gerada no processo de rompimento, utilizaram-se dados topográficos baseado em combinação de dados terrestres (estação total e GNSS) e aéreos (*Remoted - piloted Aircraft - RPA*) que permitiram a reconstrução do modelo digital de terreno após colapso da barragem. De acordo com os dados topográficos levantados, a fenda apresenta formato trapezoidal com largura da base de 10 m, largura de topo de 27,5 m, 5,7 m de altura e taludes laterais de 1:1,89 e 1:1,18 correspondendo aos lados esquerdo e direito vistos de montante. A simulação da onda de cheia que resultou no rompimento da barragem foi simulada usando o modelo hidrológico HEC-HMS, indicando uma vazão máxima de 35,3 m³/s em um evento de chuva com precipitação acumulada diária de 105,6 mm, correspondente ao tempo de recorrência de 10,6 anos. O hidrograma gerado na bacia foi utilizado como dado de entrada no modelo hidráulico HEC-RAS para simular o desenvolvimento da fenda e propagação da onda de cheia no trecho de jusante da barragem. Os resultados da modelagem hidráulica com o HEC-RAS indicaram uma vazão de pico de 161,27 m³/s durante o processo de formação da fenda que durou aproximadamente 10 min. A análise bidimensional da propagação do escoamento pelo trecho de jusante mostrou que os impactos foram pouco significativos pelo fato da onda de cheia atingir rapidamente a calha do rio Curu, que tem capacidade de propagar vazões bem superiores.

PALAVRAS-CHAVE: Rompimento de barragem; Propagação da onda de cheia; Vale do Rio Curu.

ABSTRACT

The damage caused by the dam rupture has catastrophic results with direct impacts on the population living in the vicinity of the flood wave propagation route. This study aims to reproduce the process of the rupture of the Escola dam, located at the Experimental Farm of Vale do Curú in the municipality of Pentecoste-CE, with a storage capacity of 51,600 m³ and a contributing watershed of 2.6 km². The rainfall intensity data associated with the time of concentration in the Escola dam watershed were estimated based on the intensity-duration-frequency equation generated for the Pentecoste pluviometric station. To characterize the crack generated in the failure process, topographic data based on a combination of terrestrial (total station and GNSS) and aerial (Remoted - piloted Aircraft - RPA) data were used, which allowed the reconstruction of the digital terrain model after the collapse of the dam. According to the topographic data, the breach has a trapezoidal shape with a base width of 10 m, a top width of 27.5 m, a height of 5.7 m and side slopes of 1:1.89 and 1:1.18, corresponding to the left and right sides seen from upstream. The simulation of the flood wave that resulted in the dam failure was simulated using the HEC-HMS hydrological model, indicating a maximum flow of 35.3 m³/s in a rain event with accumulated daily precipitation of 105.6 mm, corresponding to the recurrence time of 10.6 years. The hydrograph generated in the basin was used as input data in the HEC-RAS hydraulic model to simulate the development of the breach and propagation of the flood wave through the downstream reach. The results of the hydraulic modeling with HEC-RAS indicated a peak flow of 161.27 m³/s during the breach formation process that lasted approximately 10 min. The two-dimensional analysis of flow propagation along the downstream stretch showed that the impacts were not very significant because the flood wave quickly reached the Curú river channel, which has a capacity to propagate much higher flows.

KEYWORDS: Dam failure; Flood wave propagation; Valley of the River Curu.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Representação do rompimento da barragem por Galgamento.....	16
Figura 2 – Rompimento de barragem por <i>Piping</i>	17
Figura 3 – Localização da bacia do açude escola.....	19
Figura 4 – Levantamento topográfico da área de inundação do açude Escola.....	20
Figura 5 – Imagem da fenda após o rompimento.....	20
Figura 6 – Hidrograma do evento que resultou no rompimento da barragem do açude Escola.....	25
Figura 7 – Volume do reservatório com largura média da fenda e o vertedouro.....	26
Figura 8 – Esvaziamento do reservatório após a ruptura da barragem.....	26
Figura 9 – Hidrograma de ruptura após o rompimento da barragem sem vertedouro.....	27
Figura 10 – Hidrograma de ruptura após o rompimento da barragem com o vertedouro.....	28
Figura 11 – A evolução da abertura da fenda da ruptura da barragem açude Escola.....	28
Figura 12 – Delimitação da área de investigação do processo de propagação da onda de cheia e áreas afetadas.....	29
Figura 13 – Área inundada pela propagação da onda ao longo do vale a jusante.....	30
Tabela 1 – Parâmetros de entrada da bacia açude Escola no HEC-HMS.....	24
Tabela 2 – Precipitações máximas por 24 horas.....	24
Tabela 3 – Caracterização da abertura da brecha tempo.....	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA.....	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ARP.....	Aeronave Remotamente Pilotada
CDBB.....	Comitê Brasileiro de Barragens
GNSS.....	<i>Global Navigation Satellite System</i>
HEC-RAS.....	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
HEC-HMS.....	<i>Hydrologic Modeling System do Hydrologic Engineering Center</i>
IBAMA.....	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDT.....	Modelagem Digital do Terreno
MDE.....	Modelo Digital de Elevação
PNSB.....	Política Nacional de Segurança de Barragens
SERVIRISB.....	Serviço de Risco de Inundações e Segurança de Barragens
SIG.....	Sistema de Informação Geográfica
USACE.....	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo geral.....	13
1.1.2 Objetivos específicos.	13
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 Densas redes de reservatórios superficiais.....	14
2.2 Históricos de rompimento de barragens.....	15
2.3 Tipos de ruptura da barragem e suas características.....	16
2.4 Modelagem de ruptura de barragens.....	17
2.4.1 Modelo HEC-HMS e modelo HEC-RAS.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Área de estudo.....	18
3.2 Levantamento da topografia do reservatório e da fenda após rompimento.....	19
3.3 Estimativa do evento de escoamento que resultou na ruptura do Maciço.....	21
3.4 Estimativa do evento de escoamento que resultou na ruptura do maciço com base no modelo HEC-HMS.....	22
3.5 Simulação do processo de ruptura e evolução da fenda.....	23
4. RESULTADO E DISCUSSÕES.....	24
4.1 Simulação da onda de cheia do evento que gerou o colapso da estrutura da barragem.....	24
4.2 Simulação da ruptura da barragem e desenvolvimento da fenda com o HEC-RAS.....	25

4.3 Estimativa da mancha de inundação no trecho de jusante da barragem.....	29
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1. INTRODUÇÃO

Em muitas regiões do mundo a agricultura na estação seca e o estabelecimento de culturas alimentares e de culturas de rendimento antes da época das chuvas não é possível sem recorrer a grandes quantidades de água. Dependendo de cursos de água numa altura em que temperaturas e evaporação estão no seu máximo, pode ser irrealista e perigoso. Acaba sendo essencial construir uma barragem num rio ou ribeiro/arroio de forma a permitir o armazenamento, fora da época das chuvas, de recursos vitais de água (CBDB, 2019).

Os benefícios de uma barragem atingem toda a população, na forma de abastecimento de água para uso humano e industrial, irrigação, produção de energia elétrica, regularização de vazões atenuando os efeitos de secas e cheias, disposição de rejeitos de mineração, acumulação de resíduos industriais, navegação, aquicultura e recreação, entre outros. Apesar desses inúmeros benefícios, essas estruturas também podem gerar impactos sociais e ambientais na região onde são instaladas, alteração de ecossistemas, deslocamento de populações, sismos induzidos (ANA, 2020).

Somente no século XX foram registrados no mundo cerca de 200 acidentes graves com barragens com altura superior a 15 metros, que causaram a morte de mais de 8.000 pessoas e deixaram outros milhares desabrigados. A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi estabelecida pela Lei Federal nº 12.334/2010, com os objetivos de garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências (ANA, 2020).

As simulações de propagação de onda de cheia para o rompimento de barragem serão realizadas a partir do *software* HEC-RAS, por ser de uso livre, possui extensa quantidade de material disponível para pesquisa acerca de seu funcionamento, ter uma boa interface visual e permitir a integração de softwares de geoprocessamento, sendo atualmente um dos modelos mais utilizados em estudos de “*Dam Break*” (FERLA, 2018, *apud* ROSSI *et.al*).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- O objetivo geral deste estudo é tentar reproduzir o processo de ruptura da barragem do Açude Escola ocorrido em abril de 2020 e os efeitos a jusante do barramento resultante do colapso da estrutura.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar os extremos de precipitação no posto pluviométrico de Pentecoste e gerar o hietograma do evento que resultou no colapso da barragem com base na curva IDF;
- Simular a geração da onda de cheia que resultou no rompimento da barragem do açude Escola;
- Reproduzir o processo de formação e evolução da fenda durante o colapso da estrutura;
- Estimar a propagação da onda de cheia resultante do colapso da barragem e da área de inundação;

2. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Densas redes de reservatórios superficiais

O semiárido brasileiro é um dos mais chuvosos do planeta, com precipitação média anual de 750 mm, embora em algumas áreas a precipitação média não ultrapasse os 400 mm anuais. A açudagem é uma das práticas mais tradicionais de armazenamento de água e amplamente adotada no semiárido brasileiro (MONTENEGRO, *et.al*, 2012).

Os açudes são reservatórios gerados a partir do barramento dos cursos de água, que geralmente recebem o excedente hídrico escoado nos eventos pluviométricos capazes de superar as abstrações iniciais de sua bacia e os guardam para disponibilizar a água nos períodos de verão.

O escoamento pode ser considerado em regime permanente ou não permanente. O escoamento permanente é utilizado para projeto, geralmente com as vazões máximas previstas para um determinado sistema hidráulico (SUDERHSA, 2002)

O escoamento superficial é o segmento do ciclo hidrológico caracterizado pelo deslocamento da água na superfície da terra e nos cursos d'água naturais, com origem nas precipitações, isso ocorre quando uma chuva atinge uma determinada área ou bacia hidrográfica (JÚNIOR, 2022).

Segundo Araújo (2003), 93% da água ofertada aos usuários no Ceará são provenientes dos açudes, mas com as características hidroclimatológicas tornam a região vulnerável às mudanças climáticas, especialmente no que diz respeito aos estoques de água, provocando muitas vezes secas nos pequenos reservatórios.

A densidade de pequenos reservatórios no nordeste brasileiro apresenta uma enorme fragilidade, as chuvas do semiárido da região Nordeste apresentam uma variabilidade espacial e temporal. Anos de seca e chuvas abundantes se alternam de forma irregular, (MARENCO, *et al*, 2011).

A falta de conhecimentos e monitoramentos dos pequenos reservatórios no semiárido Brasileiro, tem provocado inúmeras fragilidades nas suas estruturas, levando muitas vezes a seca dos mesmos e quando são surpreendidos com períodos de maior intensidade de descargas pluviométricas são facilmente rompidas causando inundações que acabam muitas vezes em perdas de vidas humanas.

3.2 Históricos de rompimentos de barragens

O histórico de acidentes de barragem é um assunto que vem sendo abordado a muitos anos, antes eram simplesmente considerados uma área de armazenamento de água por meio de um pequeno barramento, para atender o ser humano em diversas situações, como abastecimento de água para as residências e irrigação dos seus cultivos. Quando havia grandes enchentes de água destruíam as barreiras feitas para captação de água. Com o passar do tempo o homem foi evoluindo e assim novas técnicas eram empregados para desviou do curso da água criando pequenos açudes e que posteriormente nasceram grandes construções de barragens.

Desde do século XIX, a ruptura de barragens já era registrada. Estima-se que pelo menos 2.000 casos de ruptura de barragens foram registrados no mundo desde o século XII (JANSEN, 1980, *apud* TSCHIEDEL, *et al*). A barragem de St. Francis (São Francisco), rompeu em 12 de maio de 1928 na cidade de Los Angeles, EUA. Utilizada para abastecimento de água, em decorrência de deslizamentos de terra provocados pela pressão do volume de água, assim colapsou em suas fundações, causando a morte de 450 moradores da região. As causas foram falhas exclusivamente tecnológicas. A barragem de Malpasset, rompeu em 2 de dezembro de 1959 na França. A onda de inundação deixou uma destruição total em seu curso causando 421 mortes. A barragem Vaiont, um dos desastres de reservatórios mais prejudiciais de todos os tempos, ocorreu em 9 de outubro de 1963 na Itália, quando 2.600 vidas humanas foram perdidas. Outro desastre ocorreu na barragem de Machchu II, que rompeu em 11 de agosto de 1979 na Índia com perda de vidas humanas superiores a 2.000 pessoas (JANSEN, 1983).

No dia 25 de março de 1960, uma barragem de terra em construção em Orós, no estado do Ceará, no nordeste do Brasil, foi rompida devido as chuvas intensas com registro de 635mm, causando inundações no Vale do Jaguaribe (JANSEN, 1983). Em 2003 foi registrado o rompimento da barragem de Cataguazes em Minas Gerais. Que lançou 1,2 bilhões de litros de resíduos tóxicos nos rios Pomba e Paraíba do Sul, atingindo o Norte e o Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, (SERVRISB, 2021).

Barragem de fundão, rompeu em 5 de novembro de 2015 no Estado de Minas Gerais. provocando impactos imensuráveis na qualidade da água e nos usos múltiplos do Rio Doce. Barragem de Brumadinho, rompeu em 25 de janeiro de 2019, em Minas Gerais. Que resultou em um grande rastro de destruição e mais de 250 mortos, sendo considerado o maior desastre ambiental da mineração no Brasil (SERVRISB, 2021).

3.3 Tipos de ruptura da barragem e suas características

O rompimento de uma barragem é um evento que pode ocorrer devido a diferentes causas. Como naturais (sismo, terramoto e fenômenos hidrológicos como chuvas intensas por um longo período de tempo) ou provocadas pelo próprio homem a partir de falhas técnicas desde o início do projeto até a sua execução causando enormes danos materiais, ambientais, econômicos e muitas vezes levando mortes desastrosas próximo do local em que foi instalado.

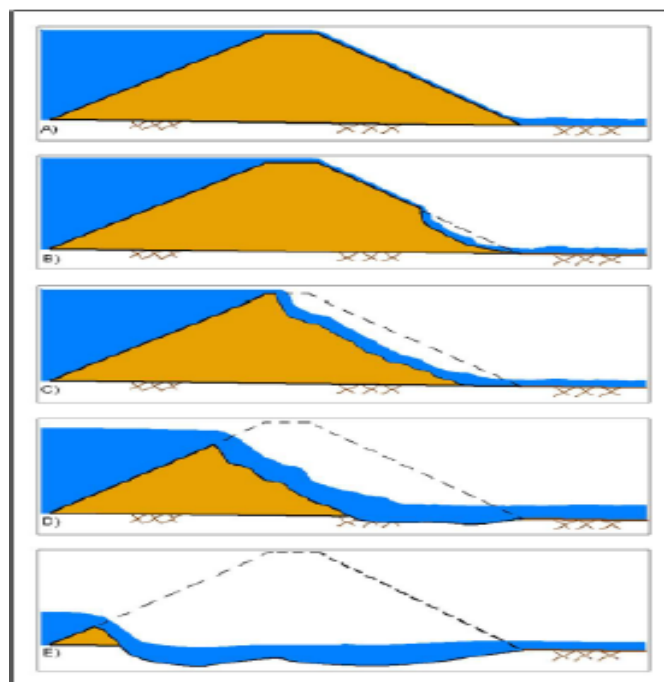
Segundo Faria (2019) *et al*, os principais mecanismos de rompimento de barragens provêm da ruptura por:

- ◆ *Overtopping* ou galgamento, normalmente por um evento hidrológico extremo;
- ◆ *Piping* ou fissuras pelo corpo da barragem;

Overtopping ou galgamento

O galgamento ou transbordamento da barragem, ocorre quando a passagem das águas sobre sua estrutura. Tal fenômeno está normalmente associado a um evento hidrológico extremo, onde o volume do reservatório e as estruturas de descarga da barragem não são suficientes para armazenar e extravasar a quantidade de água.

Figura 1 – Representação do rompimento da barragem por Galgamento

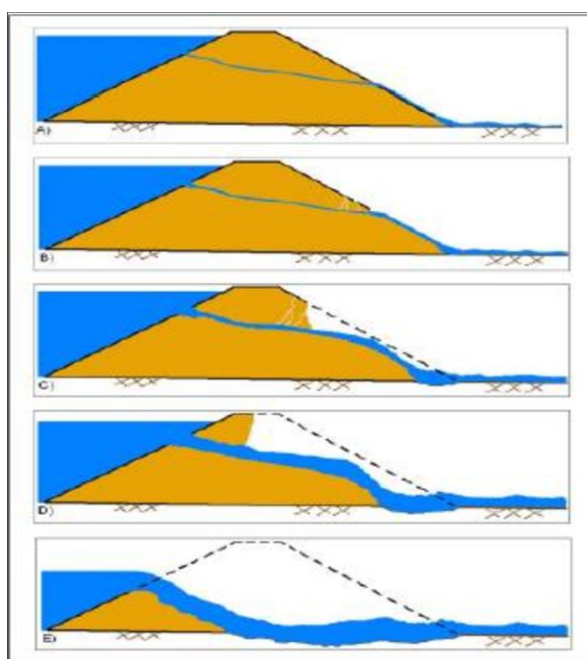


Fonte: Brunner (2014, p. 11).

Piping ou fissuras pelo corpo da barragem

O rompimento por *Piping* ocorre por meio da erosão interna de uma massa de solo, iniciada sob condições de gradiente hidráulico crítico, provocando a abertura progressiva de canais dentro da massa de solo em sentido contrário ao do fluxo d'água. O processo erosivo provoca a remoção de partículas do interior do solo ou da estrutura.

Figura 2 – Rompimento de barragem por *Piping*



Fonte: Brunner (2014, p. 12).

3.4 Modelagem de ruptura de barragens

3.4.1 Modelo HEC-HMS e modelo HEC-RAS

O HEC-HMS é um modelo matemático desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros dos EUA, o *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), desenvolvido como uma ferramenta para simulação hidrológica nos processos de transformação de chuva em vazão em bacias hidrográficas dendríticas, onde as bacias são discretizadas em sub-bacias.

O *software* foi projetado para solucionar uma variedade de problemas, sendo aplicado em grande parte nas áreas geográficas, incluindo grandes rios, bacias hidrográficas, em estudos de inundações e em pequeno escoamento de bacia urbana ou natural. O HEC-HMS gera hidrogramas que podem ser utilizados diretamente ou em conjunto com outros *softwares*. O modelo também permite fazer estudos relacionados como projeto de vertedores, impactos futuros da urbanização, redução de danos de inundações, regulação de planície de inundações, operações de sistemas, estimativa de escoamento superficial por métodos empíricos utilizados na modelagem hidrológica (BRUNNER, 2014).

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) foi desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers* (BRUNNER, 2014), sendo um software que permite o monitoramento e avaliação adequados da estrutura durante o período de construção e sob todas as condições operacionais.

O HEC-RAS é um software que permite fazer simulações em escoamentos com regime permanente e não permanente, transporte e deposição de sedimentos e modelos de qualidade da água, estes componentes aplicam os mesmos procedimentos de cálculo geométrico e hidráulico. Os dados necessários para que este *software* realize os cálculos de simulação hidráulica são os dados geométricos, que devem ser os primeiros dados de entrada, os dados de escoamento e condições de contorno. Se existir obra na calha do rio ou em sua lateral, como pontes, barragens, vertedouros fechados, açudes, estações de bombeamento, estes também devem ser descritos nos dados geométricos, pois o HEC-RAS calcula as perdas de energia no escoamento causadas por tais estruturas.

A combinação dos modelos HEC-HMS com o HEC-RAS permite simular processos de ruptura de barragens provocadas por um evento extremo gerado na bacia hidrográfica e estimado com o modelo hidrológico (HEC-HMS), enquanto o processo de ruptura da barragem e propagação a jusante da barragem pode ser computado pelo modelo hidráulico (HEC-RAS).

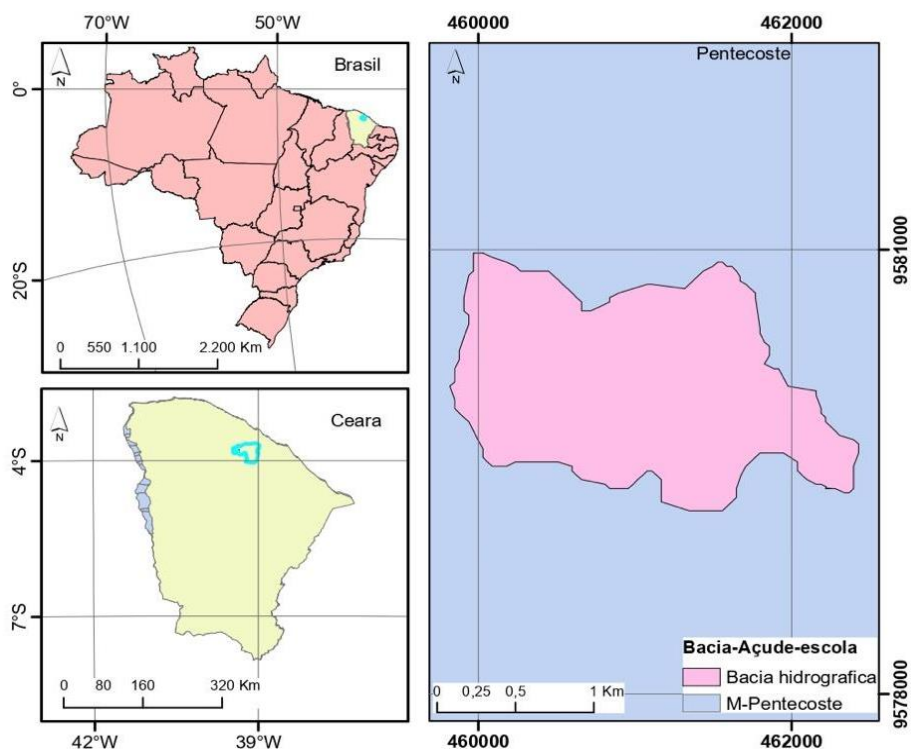
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa é a bacia hidrográfica do açude escola, localizado na Fazenda Experimental do Vale do Curú no município do Pentecoste-CE. O açude Escola apresenta capacidade de armazenamento de 51.600 m³ e bacia hidrográfica contribuinte de 2,6

km². O reservatório teve sua construção finalizada no ano de 1952, com objetivo de abastecimento humano e irrigação.

Figura 3 – Localização da bacia do açude escola



Fonte: Elaboração Própria.

4.2 Levantamento da topografia do reservatório e da fenda após rompimento

O modelo digital de terreno (MDT) foi elaborado a partir do levantamento topográfico baseado através da combinação de três bases de dados, sendo duas terrestres (Estação total e Sistema Global de Navegação por Satélite – GNSS) e uma aérea (Aeronave Remotamente Pilotada – ARP).

Figura 4 – Levantamento topográfico da área de inundação do açude escola



Fonte: Adaptado de Menezes (2023).

A fenda após o rompimento possui formato trapezoidal com aproximadamente 18 m de largura do topo e 10 m de largura da base, em um maciço de cerca de 5,70 m de altura, com base nos dados topográficos levantados em campo.

Figura 5 – Imagem da fenda após o rompimento



Fonte: Adaptado Menezes (2023).

4.3 Estimativa do evento de chuva que resultou na ruptura do Maciço

Para estimativa do tempo de recorrência associado à precipitação ocorrida na bacia hidrográfica do açude escola na data da ruptura da barragem, com acumulado diário de 105,6 mm, utilizou-se o Método de Gumbel que foi aplicado aos dados históricos do posto pluviométrico Pentecoste com registro em 49 anos (1974 a 2021), conforme descrito em Menezes (2023). Os resultados apontaram um tempo de retorno de 10,6 anos. O método de Gumbel pode ser descrito como segue:

a) Equação 1

$$x_t = \bar{x} + \frac{S_x}{S_n} (Y - \bar{Y}_n)$$

x_t → é a intensidade pluviométrica máxima esperado para o período de retorno(T);

\bar{x} → é a chuva média da série;

S_x → é o desvio padrão das intensidades pluviométricas da série;

Y → é a variável reduzida; S_n é desvio padrão da variável reduzida;

\bar{Y}_n → é a média da variável reduzida,

Y é estimada para diferentes tempos de retorno T. A variável reduzida foi calculada a partir da seguinte expressão:

b) Equação 2

$$Y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Para discretização da chuva e construção do hietograma de projeto que foi utilizado como dado de entrada na simulação do evento de escoamento gerado na bacia hidrográfica utilizou-se a equação de intensidade-duração-frequência IDF do posto pluviométrico Pentecoste (RODRIGUES, *et al.*, 2008), considerando o tempo de concentração da bacia.

c) Equação 3

$$i = \frac{k.T^m}{(t+D)^n}$$

Em que i é a intensidade associada ao tempo de concentração da bacia (mm/h), T_r o período de retorno (anos), e D a duração da chuva de projeto (min).

Para se determinar o tempo de concentração na bacia hidrográfica do açude Escola utilizou-se a equação (4) de Kirpich modificada, como segue:

d) Equação 4

$$T_c = 1,42 \cdot \left(\frac{CR^3}{DM} \right)^{0,385}$$

Em que CR é o comprimento do rio principal (km) e DM é o Desnível máximo do rio principal (DM) em metros foi calculado da seguinte forma:

e) Equação 5

$$DM = CC - CE$$

Em que CC é a cota da nascente do rio principal (m) e CE a cota do exutório da bacia hidrográfica (m).

4.4 Estimativa do evento de escoamento que resultou na ruptura do maciço com base no modelo HEC-HMS

O modelo HEC-HMS foi utilizado para geração do hidrograma de cheia que resultou no rompimento da barragem do açude Escola em 23 de abril de 2020. A simulação de propagação dos fluxos de água pela bacia hidrográfica foi realizada com o método do SCS-CN, que permite calcular a chuva excedente na bacia, e pode ser representado pela equação (6).

f) Equação 6

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Em que P_e é a precipitação efetiva (escoamento superficial), P é a precipitação acumulada no tempo t , I_a é a abstração inicial correspondente a 20% da retenção potencial máxima S , calculada como segue:

g) Equação 7

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Para aplicação do método foi necessário informar características físicas da bacia, capacidade de infiltração de água no solo com base no parâmetro CN, além das características do evento de precipitação que gerou a onda de cheia na bacia hidrográfica representada pelo hietograma de projeto.

4.5 Simulação do processo de ruptura e evolução da fenda

Após a geração do hidrograma de onda de cheia no HEC-HMS, foi realizado no HEC-RAS a simulação do colapso da estrutura da barragem como os seguintes passos realizados.

- a) Delimitação da área do reservatório do açude Escola e da área de investigação da propagação da onda de cheia do rompimento da barragem pelo trecho de jusante a partir do MDE importado para o HEC-RAS;
- b) Definição da seção do barramento e atribuição de características da barragem além da geração da curva cota-volume a partir do MDE;
- c) Atribuição dos parâmetros da fenda estimados com base em dados de campo e complementados por equações propostas no manual do HEC-RAS, como no caso da equação de regressão que serve para estimativa da abertura média da fenda e tempo de desenvolvimento total da fenda (FROEHLICH 1995a, *apud* BRUNNER, 2014), pela equação (8) e (9).

h) Equação 8

$$B_{ave} = 0,1803k_0V_w^{0,19}h_b^{0,19}$$

i) Equação 9

$$t_f = 0,00254V_w^{0,53}h_b^{-0,90}$$

- d) Atribuição de condições de contorno, onde foi insere o hidrograma de entrada no reservatório gerado como o modelo HEC-HMS e do nível d'água inicial no reservatório;
- e) Delimitação do período de simulação e passo de tempo, assim como o nível de detalhamento dos resultados na escala temporal.

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 Simulação da onda de cheia do evento que gerou o colapso da estrutura da barragem

As características físicas da bacia necessárias para a aplicação do modelo SCS-CN foram estimadas para a bacia hidrográfica do açude Escola e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada da bacia açude Escola no HEC-HMS

Parâmetro	Valores
Área (km ²)	2,86
CN	87,4
Tc (min)	44
S (mm)	36,62

Fonte: Elaboração Própria.

Para a entrada de dados meteorológicos utilizou-se o hietograma de projeto apresentado na Tabela 2, derivado da curva IDF da bacia para o tempo de concentração.

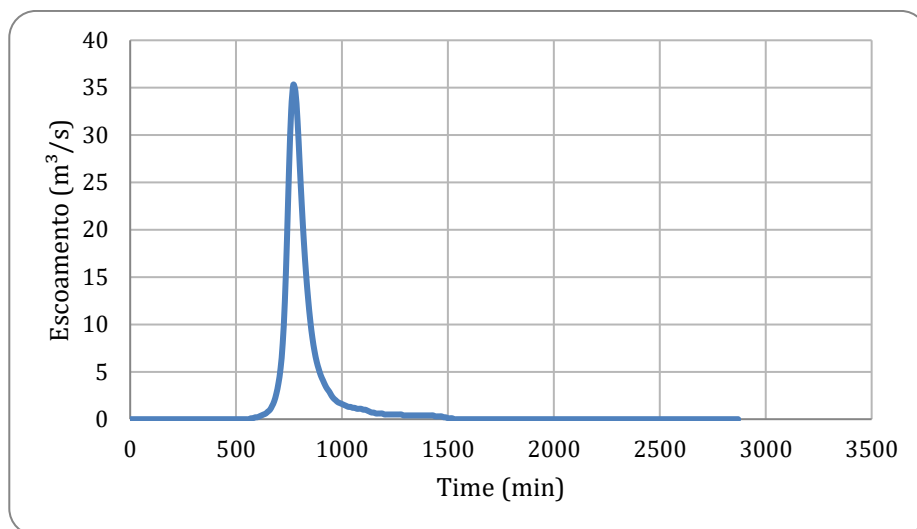
Tabela 2 – Precipitações máximas por 24 horas

Duração (min)	Intensidade (mm/h)	Precipitação (mm)
5	133.1	11,1
15	111.5	27.9
60	64.9	64.9
120	42	84
180	31.2	93.6
360	17.7	106,2
720	9.6	115.2
1440	5.1	122.4

Fonte: Elaboração Própria.

Com base na simulação com o programa HEC-HMS gerou-se o hidrograma de cheia do evento que resultou na ruptura da barragem do açude Escola (Figura 6). Observa-se uma vazão de pico de aproximadamente 35 m³/s, em um evento com duração de cerca de 16 h.

Figura 6 – Hidrograma do evento que resultou no rompimento da barragem do açude Escola



Fonte: Elaboração Própria.

5.2 Simulação da ruptura da barragem e desenvolvimento da fenda com o HEC-RAS

Os dados da fenda foram obtidos a partir de levantamentos realizados em campo após o rompimento da barragem, conforme ilustrado na Tabela 1. Importante destacar que a largura média da fenda obtida pela equação 6 (9,05 m) se aproxima bastante do valor observado a partir do modelo digital de terreno gerado (11,58 m), indicando que a equação proposta apresentou bom desempenho na estimativa deste parâmetro.

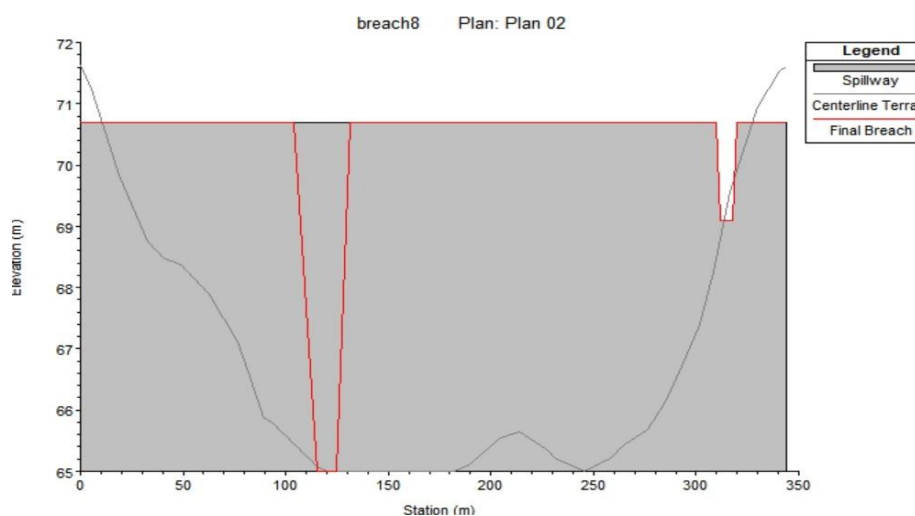
Tabela 3 – Características da fenda utilizados na simulação

Características da brecha	Valores
Cota de coroamento da barragem (m)	70,7
Largura da base	10,0
Inclinação do talude do lado direito (1:H)	1,89
Inclinação do talude do lado esquerdo (1:H)	1,18
Tempo de formação da brecha (h)	0,17

Fonte: Elaboração Própria.

A largura média da fenda estimada com base nos dados topográficos levantados foi de 18,75 m, enquanto o valor computado pela equação proposta por Froehlich (Equação 8) foi pouco inferior (14,83 m), com base nos dados de altura do maciço e volume do reservatório no momento do colapso.

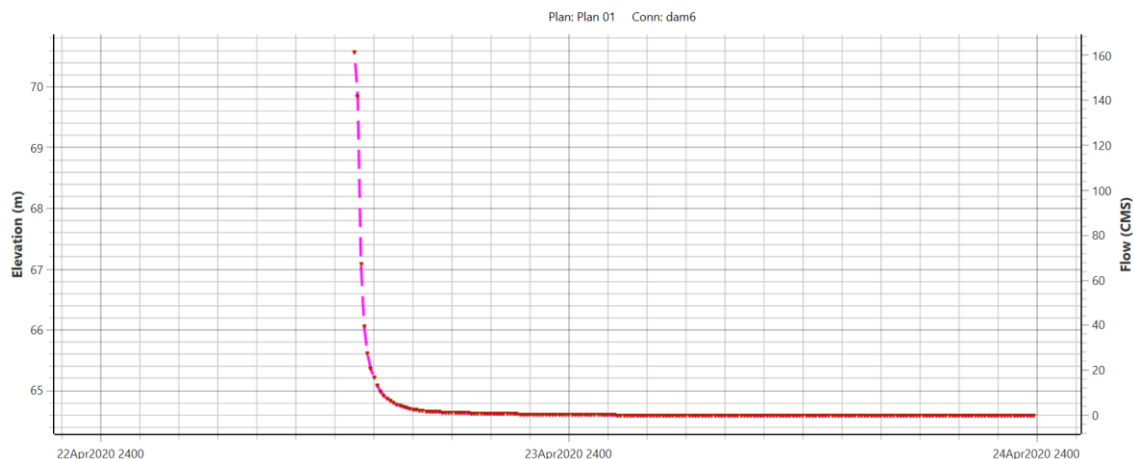
Figura 7 – Volume do reservatório com largura média da fenda e o vertedouro



Fonte: Elaboração Própria.

A partir da simulação realizada com modelagem bidimensional do HEC-RAS, foi possível reproduzir o processo de ruptura da barragem do açude Escola. O processo de esvaziamento do reservatório pela ruptura do maciço está representado na Figura 8. Como se pode perceber o reservatório manteve o nível constante informado na condição de entrada até que o evento de escoamento gerado na bacia provocou o enchimento do reservatório e a ruptura ocorre momentos depois quando a cota de coroamento da barragem foi atingida. Neste momento, iniciou-se o rápido esvaziamento do reservatório atingido cotas mais baixas correspondentes ao nível d'água durante a passagem do volume residual do evento de escoamento pelo reservatório já completamente esvaziado.

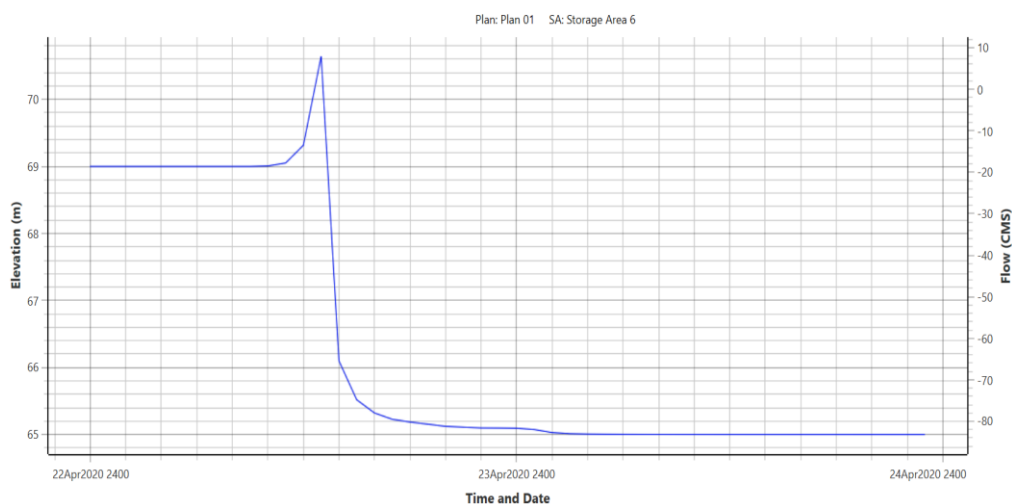
Figura 8 – Esvaziamento do reservatório após a ruptura da barragem



Fonte: Elaboração Própria.

O hidrograma gerado durante a ruptura da barragem (sem o vertedouro) por galgamento está apresentado na Figura 9. Nesta simulação admitiu-se não haver fluxo pelo vertedor da barragem de modo a simular o enchimento e galgamento por cima do corpo do maciço e, desta forma, avaliar o cenário com maior armazenamento hídrico antes do rompimento. Como se pode perceber, a vazão diminui drasticamente desde o pico de 161,27 m³/s às 13h do dia 23/04 de 2020 e valores inferiores a 1 m³/s no início da noite, por volta de 19h.

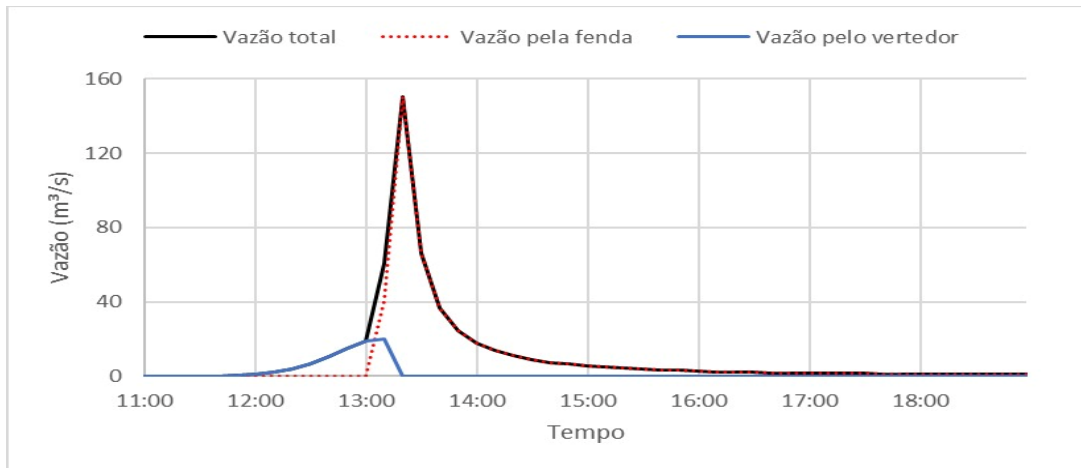
Figura 9 – Hidrograma de ruptura após o rompimento da barragem sem vertedouro



Fonte: Elaboração Própria.

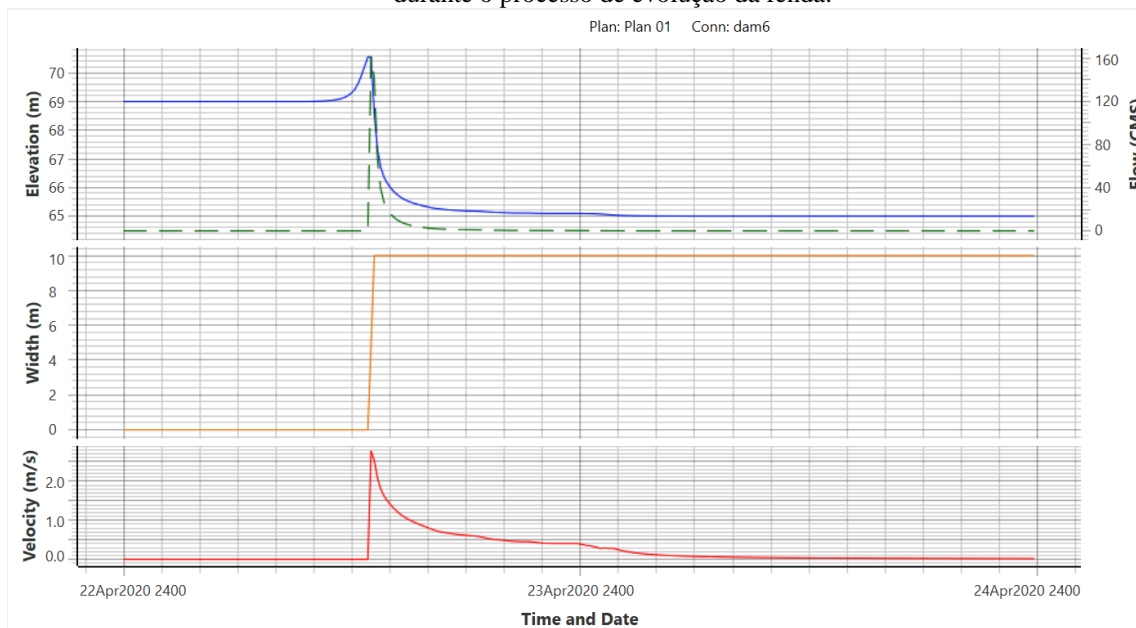
O hidrograma da ruptura da barragem com o vertedouro está apresentado na Figura 10. Nesta simulação a fluxo pelo vertedor da barragem de modo que podemos perceber a diminuição da vazão por cima do maciço, mas que não foi suficiente para evitar a ruptura da barragem.

Figura 10 – Hidrograma de ruptura após o rompimento da barragem com o vertedouro



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 11 – A evolução da abertura da fenda da ruptura da barragem açude Escola. A linha azul representa a evolução do nível d'água no reservatório; a linha verde destaca a vazão pela fenda; a linha laranja apresenta a evolução da fenda com aumento da largura; e a linha vermelha representa a evolução das velocidades de fluxo durante o processo de evolução da fenda.



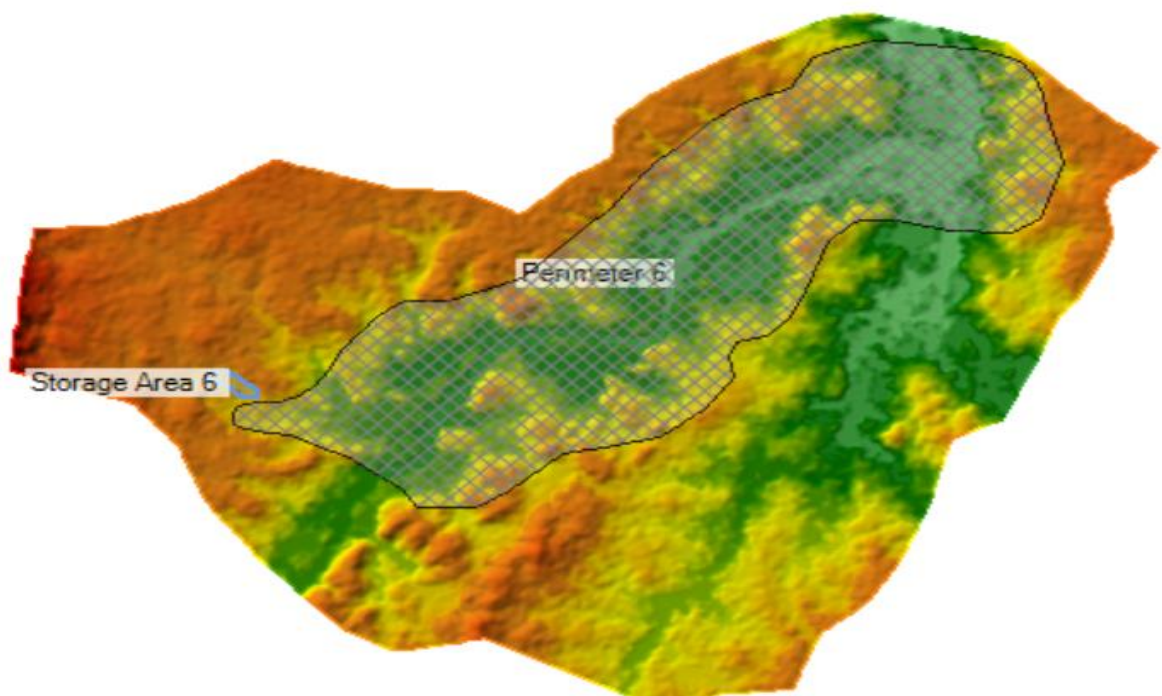
Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 11, por sua vez, destaca o processo de evolução da fenda e geração da onda de cheia durante a ruptura. Como se pode perceber o processo de formação da fenda ocorre rapidamente com cerca de 10 min, até atingir 10 m de largura na sua base, descrevendo o formato trapezoidal atribuído na entrada de dados. Os fluxos atingem velocidade máxima de 2,77 m/s e reduzem progressivamente até cessar o fluxo pela fenda.

5.3 Estimativa da mancha de inundação no trecho de jusante da barragem

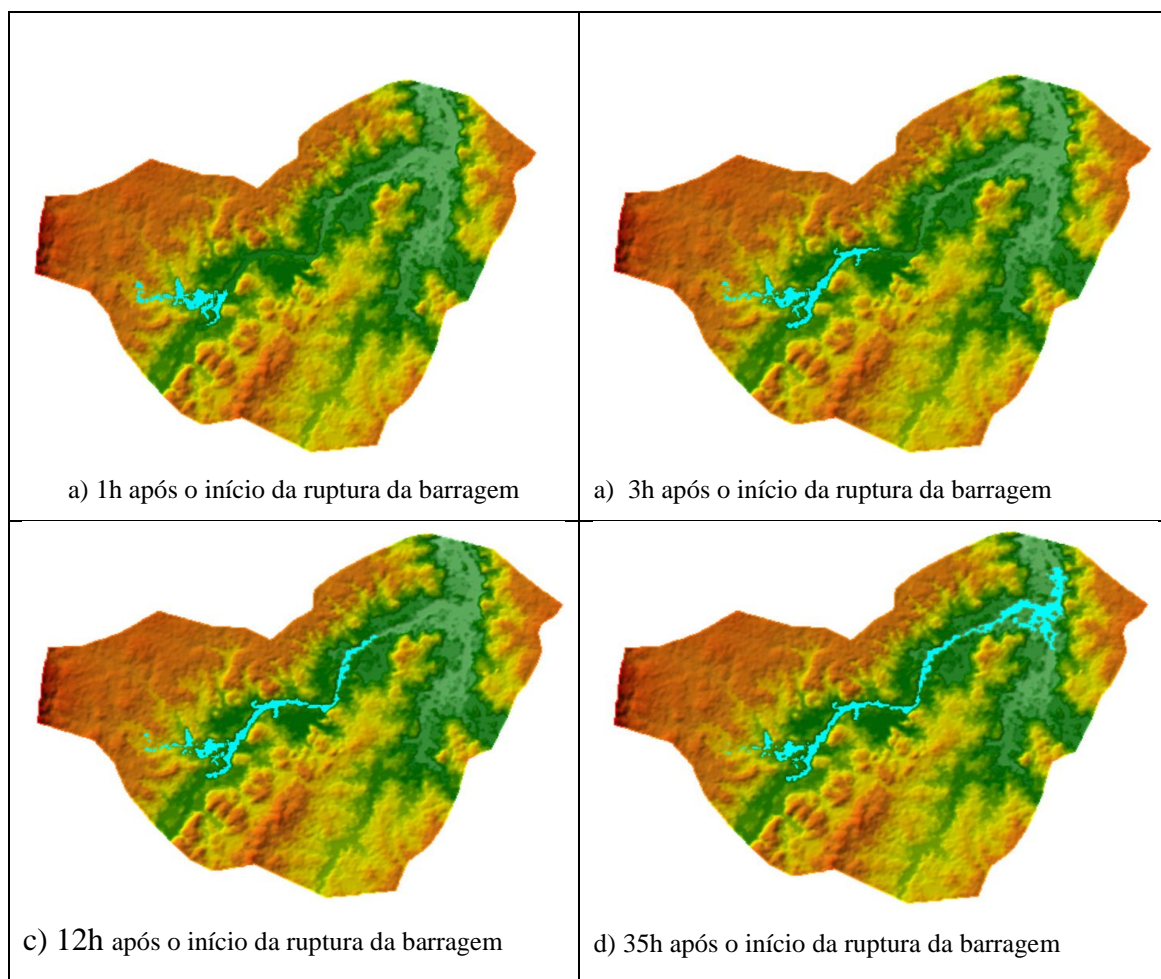
Inicialmente precisou-se delimitar a área de abrangência do estudo e delimitar a malha com pixel de 50 m para permitir o estudo da propagação da onda de cheia pelo trecho a jusante do barramento (Figura 12).

Figura 12 – Delimitação da área de investigação do processo de propagação da onda de cheia e áreas afetadas



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 13 – Área inundada pela propagação da onda ao longo do vale a jusante



Fonte: Elaboração Própria.

A simulação com a modelagem bidimensional do HEC-RAS permitiu analisar a propagação da onda cheia pelo trecho a jusante da barragem (Figura 13). É possível perceber que a inundação ficou limitada à calha maior do rio Curú, que conseguiu absorver os efeitos deste evento sem atingir áreas habitacionais próximas, dado o porte do rio que recebeu a onda de cheia gerada. Como não havia nenhum outro barramento a jusante ou outra estrutura hidráulica e o riacho que drena a bacia hidrográfica do açude Escola deságua a curta distância no rio Curú, os impactos deste evento de ruptura de barragem teve impactos limitados.

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

Pode-se concluir que a combinação de modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulicos (HEC-RAS) pode ser uma boa estratégia na simulação de processos de geração da onda de cheia em bacias hidrográficas com eventos de ruptura de barragem e propagação pelo trecho a jusante como realizado neste estudo.

O estudo permitiu estimar a magnitude do evento extremo associado a ruptura da barragem do açude Escola e sua propagação pela rede de drenagem a jusante do barramento, de modo a constatar que neste caso específico os impactos associados foram de menor proporção pelo fato da onda de cheia atingir rapidamente a calha do rio Curú, um grande rio da região.

A utilização de dados medidos de fendas em barragens rompidas no Estado do Ceará pode ser uma importante estratégia para melhor compreensão destes eventos catastróficos cada vez mais comum no Estado do Ceará, muitas vezes resultando em rupturas de barramentos em cascata.

Pode-se, ainda, recomendar estudos específicos para avaliar o efeito de rompimento de reservatórios em cascata, o que potencializa os riscos associados a este tipo de catástrofe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (Brasil) (Org.). **Relatório de Segurança de Barragens 2019**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2020. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>>. Acessado em: 10 de maio de 2023.

ARAÚJO, A. L. **Abordagem Etnopedológica Em Um Assentamento Rural No Semiárido Cearense**. 44f. 2011. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/5015>>. Acessado em: 27 de junho de 2023.

BRUNNER, Gary. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Training Document. August 2014. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>>. Acessado em: 23 de junho de 2023.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). **Guia Básico de Segurança de Barragens**. São Paulo: 2019.

FARIA, F. L. F; SILVA M. B; REAIS, M. M; AMORIM, J. C.C. **Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens**. Academia Militar das Agulhas Negras, Rmct vol.36 nº3, p 31, 37. 1 de julho, 2019. Disponível em: <https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2019/RMCT_45518.pdf>. Acessado em :10 de junho de 2023.

FELDMAN, Arlen D. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual**. Computer Software Technical Reference Manual. March, 2000. CPD-74B. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>>. Acessado em: 20 de Outubro de 2023

FERLA, R. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em Rompimento de barragens**. 2018. 75 a 76 fl. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade da Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2018. Disponível: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/180112>>. Acessado em: 20 de junho de 2023.

JANSEN, Robert. B. **Barragens: Recursos hídricos**. Universidade Da Califórnia Davis. 17 De Agosto De 1983. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/Dams_and_Public_Safety.html?id=-wutb7CASBUC&redir_esc=y>. Acessado em: 5 de junho de 2023.

JÚNIOR. **Elementos de hidrologia aplicada**. Editora. Edgard Blucher Ltda. 2022. Disponível em: http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/degustacao/elementos-hidrologia-aplicada_deg.pdf. Acessado em: 23 de junho de 2023.

MARENGO, José A; ALVES, Lincoln M; BESERRA, Elder A.; LACERDA, Francinete F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Instituto Nacional do Semiárido Campina Grande, 2012. Disponível em:

<http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2011/06.11.02.16/doc/Marengo_Variabilidade.pdf?languagebutton=en>. Acessado em: 25 de junho de 2023.

MENEZES, S. K. M. **Ruptura De Um Pequeno Reservatório No Semiárido Brasileiro E Seus Efeitos Na Topografia Do Leito**. 2023. 45 a 46 fl. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente: Recursos Hídricos) – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, Ce, 2023.

MONTENEGRO, Abelardo A. A. *et al.* **Recursos Hídricos Em Regiões Semiáridas: Estudos E Aplicações**. 1ed. editores Hans Raj Gheyi, - Vital Pedro da Silva Paz, Salomão de Sousa Medeiros, Carlos de Oliveira Galvão - Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012.
<[file:///C:/Users/maria/Downloads/recursos_hidricos_em_regioes_semiaridas%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/maria/Downloads/recursos_hidricos_em_regioes_semiaridas%20(1).pdf)>. Acessado em: 27 de junho de 2023

RODRIGUES, Joseilson Oliveira et al. **Equações de Intensidade-Duração-Frequência De Chuvas Para As localidades De Fortaleza E Pentecoste**, Ceará. Scientia Agraria, Curitiba, v.9, n.4, p.511-519. Elsevier. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es> > descarga > articulo>. Acessado em: 26 de junho de 2023.

SERVIÇO DE RISCO DE INUNDAÇÕES E SEGURANÇA DE BARRAGENS-SERVRISB (Rio De Janeiro). **Relatório de Segurança de Barragens**. Março, 2021. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2022/06/Relat%C3%B3rio-Seguran%C3%A7a-de-Barragens-2020.pdf>>. Acessado em: 10 de Maio de 2022.

Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA) – **Manual de Drenagem urbana, Região Metropolitana de Curitiba**. 2002. Disponível em <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua/terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/sud0101rp_wr004_fi.pdf>. Acessado em: 2 de julho de 2023.