



SIMULAÇÃO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO AÇUDE ESCOLA, PENTECOSTE-CE

Antonio Silva¹
Victal Biziami²
George Mamede³

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 objetivo 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: Ruptura de barragem; Geração e Propagação da Onda de Cheia; Caracterização da Fenda.

Unilab, Campus das Auroras, Discente, tonimarlolima@gmail.com¹

Unilab, Campus das Auroras, Discente, mambobziemi1994@gmail.com²

Unilab, Campus das Auroras, Docente, mamede@unilab.edu.br³

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 observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes 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.).

METODOLOGIA

O estudo de ruptura de um pequeno reservatório está programado para ser realizado no açude Escola, situado na Bacia Experimental Vale do Curú (BEVC), na área rural do município de Pentecoste, sob a gestão da Universidade Federal do Ceará (Figura 1 - Anexo). Esta bacia hidrográfica tem uma área de contribuição de 2,6 km². O açude Escola possui uma bacia hidráulica com cerca de 3,6 hectares e uma capacidade de armazenamento aproximada de 51.600 m³. A barragem do açude Escola sofreu um incidente de rompimento em 23 de abril de 2020.

- Levantamento da topografia do reservatório e da fenda após rompimento;

O Modelo Digital de Terreno (MDT) foi desenvolvido por meio de um levantamento topográfico que se baseou na fusão de três fontes de dados, incluindo duas terrestres (realizadas com Estação Total e Sistema Global de Navegação por Satélite - GNSS) e uma aérea (obtida com uma Aeronave Remotamente Pilotada - ARP). 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.

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

Para calcular o tempo de recorrência associado à precipitação ocorrida na bacia hidrográfica do açude Escola na data da ruptura da barragem, empregou-se o Método de Gumbel. Este método foi aplicado aos



dados históricos coletados pelo posto pluviométrico de Pentecoste, que possui registros abrangendo um período de 49 anos, de 1974 a 2021, conforme detalhado no estudo de Menezes (2023). Os resultados indicaram um tempo de retorno estimado de 10,6 anos.

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

O modelo HEC-HMS foi empregado para gerar o hidrograma de cheia que culminou no rompimento da barragem do açude Escola em 23 de abril de 2020. A simulação da propagação dos fluxos de água pela bacia hidrográfica foi conduzida utilizando o método do SCS-CN, o qual possibilita o cálculo da precipitação excedente na bacia.

- Simulação do processo de ruptura e evolução da fenda

Após a geração do hidrograma de onda de cheia no HEC-HMS, foi realizado no HECRAS a simulação do colapso da estrutura da barragem seguindo os seguintes passos:

- 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)
- 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 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 (Anexo).

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

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 2 - Anexo). Observa-se uma vazão de pico de aproximadamente 35 m³/s, em um evento com duração de cerca de 16 horas.

- Simulação do processo de 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 3 (Anexo). 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.

A largura média da fenda estimada com base nos dados topográficos levantados foi de 18,75 m, conforme detalhes da Figura 3 (Anexo).

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 4 (Anexo). 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.

O hidrograma gerado durante a ruptura da barragem (sem o vertedouro) por galgamento está apresentado na Figura 5 (Anexo). 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.

O hidrograma da ruptura da barragem com o vertedouro está apresentado na Figura 6 (Anexo). 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.

Já o processo de evolução da fenda e geração da onda de cheia durante a ruptura está destacado na Figura 7 (Anexo). 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.

- 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 8 - Anexo).

A simulação utilizando modelagem bidimensional no software HEC-RAS possibilitou uma análise detalhada da propagação da onda de enchente na seção a jusante da barragem, conforme ilustrado na Figura 9 (Anexo). É evidente que a inundação se restringiu ao leito principal do rio Curú, o qual demonstrou capacidade para absorver os efeitos desse evento sem afetar as áreas residenciais próximas, devido ao tamanho considerável do rio que recebeu a onda de enchente gerada. Com a ausência de outros obstáculos a montante, como barragens adicionais ou outras estruturas hidráulicas, e considerando que o riacho que drena a bacia hidrográfica do açude Escola desagua em curta distância no rio Curú, os impactos decorrentes da ruptura da barragem foram relativamente limitados.



CONCLUSÕES

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 barramento sem 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.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Dr. George Leite Mamede, pela orientação e conselhos, que fizeram possível a realização desse trabalho, a PROPPG, a Unilab pela bolsa ao primeiro autor e ao CNPq pela bolsa ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (Brasil) (Org.). Relatório de Segurança de Barragens 2019. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2020. Disponível em: Acessado em: 10 de maio de 2023.

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

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: . Acessado em: 20 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 AfroBrasileira, Acarape, Ce, 2023.

USACE. (2000). Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2000. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, Technical Reference Manual, CPD-74B.



USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System- User Manual. US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center. USA.