PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA PELA REDE DE RESERVATÓRIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE PENTECOSTE

Jued Lomba Purna[1]
Emilly Martins Silveira[2]
George Leite Mamede[3]

RESUMO

O estado do Ceará é conhecido por possuir uma densa rede de reservatórios superficiais, com registros recorrentes de rompimentos de barragens e algumas em cascata afetando um grupo de barragens dispostas em sequência. Este subprojeto tem como objetivo simular a propagação da onda de cheia gerada nas subbacias de uma amostra de reservatórios em cascata na bacia hidrográfica do Açude Pentecoste e reproduzir o processo de ruptura do açude Escola, um pequeno reservatório localizado na região, para avaliar os efeitos a jusante. A ruptura da barragem do açude Escola foi reproduzida usando a combinação de um modelo hidrológico (HEC-HMS) para estimar o hidrograma da cheia, com um modelo hidráulico (HEC-RAS) para simular a propagação da onda de cheia decorrente da ruptura. Dados levantados em campo foram usadas para caracterizar a fenda resultante do processo de ruptura da barragem. Os resultados mostram que a onda de cheia gerada na ruptura da barragem do açude Escola é bastante atenuada pelo rio Curu, um rio de grande porte com seção transversal que permite escoamentos de magnitude bem superior a produzida neste evento de rompimento. Complementarmente, realizou-se a simulação da geração onda de cheia em uma rede de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste com o modelo HEC-HMS. A simulação do escoamento superficial foi realizada pelo modelo do Soil Conservation Service - SCS-CN considerando a curva de intensidade-duraçãofrequência - IDF derivada de dados medidos da estação meteorológica de Pentecoste para tempos de retorno de 10, 25, 50, 1000 e 10000 anos, destacando os picos de vazão para diferentes recorrentes com magnitudes que podem colocar em risco a segurança destas barragens.

Palavras-chave: Rompimento de barragens; propagação da onda de cheia; rede de reservatórios.

Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS, 1, Discente, jued@aluno.unilab.edu.br[1]
Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS, 2, Discente, emillymartinssilveira@gmail.com[2]
Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS, 3, Docente, mamede@unilab.edu.br[3]

ISSN: 2447-6161

INTRODUÇÃO

No Ceará, a maioria das barragens são de terra e enrocamento (fonte: Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará - http://atlas.cogerh.com.br/). Rupturas por falhas na fundação ocorrem no início da operação da barragem, enquanto outras causas levam algum tempo para se manifestar (Ferreira e Andrzejewski, 2015). Um grande percentual ocorre durante o primeiro enchimento, momento em que erros de projeto ou de construção, ou defeitos latentes do sítio, aparecem (Ferreira e Andrzejewski, 2015), como foi o caso do açude Orós em 1960. Além disso, esse Comitê apontou aumento considerável da frequência de ruptura de barragens com o envelhecimento das estruturas, tanto por piping como por galgamento. Na bacia hidrográfica do Rio Banabuiú no Ceará, por exemplo, os 16 açudes monitorados, excluindo o Cedro de 113 anos, possuem em média 32 anos. Essa idade média pode ser considerada avançada em relação ao levantamento realizado pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1973).

É comum encontrar no Estado do Ceará pequenas barragens localizadas de forma sequenciada de modo que aquelas localizadas à jusante recebem aporte proveniente das posicionada à montante, seja por liberação pela tomada d'água para perenização do trecho de rio entre elas seja por extravasamento pelo vertedor quando o nível de água acumulada extrapola a cota de soleira destas estruturas. No caso de pequenas barragens localizadas em cascata, em geral desprovidas de estruturas de regularização de vazões, a conexão entre elas se dá exclusivamente por eventos de vertimentos. No caso de rompimento de uma barragem localizada à montante, a onda de cheia resultante é, em geral, bem superior à vazão de projeto do vertedor da barragem imediatamente à jusante, podendo ocasionar a ruptura desta e outras barragens localizadas à jusante na cascata (FUSARO et al., 2012).

De acordo com os Relatórios de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Água (ANA - 2019, 2020 e 2021) registraram-se na última década 83 casos de rompimento de barragens e outros 207 incidentes com barragens no território brasileiro, sendo que 67,5% dos acidentes e 73,9% dos incidentes ocorreram após 2019. Alguns destes eventos estão associados a rompimento de pequenos barragens em cascata, como destaca-se a seguir para eventos no Estado do Ceará: açude Pontal em Quiterianópolis após o colapso de 5 barramentos a montante; e no caso dos açudes Valdemir, Orlando, Jardel, Gerardo Bastos, Olho D'água, Ipueiras e Pedro Peres em Hidrolândia, também com registro de rompimento em cascata. Vários outros casos de rompimento de barragens ou incidentes com tais estruturas hidráulicas vêm sendo reportados no estado do Ceará, conforme relatórios técnicos da Agência Nacional de Águas (ANA - 2019, 2020 e 2021) e outros mais recentes ocorrido no Estado do Ceará e noticiados nos veículos de comunicação como nos casos das barragens: do açude Escola em Pentecoste (2020; estudado no contexto da pesquisa em que está inserido este plano de trabalho); do açude Caraíbas em Várzea Alegre e do açude Catolé no Cedro (G1, 2022); e do açude Romão em Farias Brito (Jornal O Povo, 2023).

O presente trabalho tem como objetivo simular a propagação da onda de cheia gerada nas sub-bacias de uma amostra de reservatórios em cascata na bacia hidrográfica do Açude Pentecoste e reproduzir o processo de ruptura do açude Escola, um pequeno reservatório localizado na região, para avaliar os efeitos a jusante.

METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na Bacia Experimental do Vale do Curu-BEVC localizado na bacia hidrográfica do Curu para reprodução da ruptura do açude Escola ocorrida em 23 de abril de 2020 e propagação da onda de

ISSN: 2447-6161

cheia no trecho a jusante e em uma amostra de nove reservatórios da sub-bacia do Carrapato com 31,6 km², na bacia hidrográfica açude Pentecoste (Figura 1) com área de 3230 km² e bacias hidráulicas com áreas de variando de 0,2 a 50,5 ha. O açude Escola, por sua vez, apresenta capacidade de armazenamento de 55460 m³ e área da bacia hidráulica de 3,4 ha.



Figura 1 – Localização das áreas de estudo no contexto das bacias hidrográficas aninhadas do Pentecoste e Curu, com destaque para a Bacia Experimental do Vale do Curu (BEVC) onde se localiza o açude Escola e da bacia hidrográfica do Carrapato onde se localiza os nove açudes analizados (os círculos na cor roxa indica a posição das áreas).

Para simulação e análise da onda de cheia gerada na bacia hidrográfica do açude Escola que provocou o rompimento da barragem do próprio açude, foram aplicados os modelos hidrológicos HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System; USACE, 2000) e hidráulico HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System; USACE, 2016). A utilização do modelo hidráulico HEC-RAS, teve como objetivo de simular a propagação da onda de cheia no trecho a jusante da barragem do açude Escola durante o processo de ruptura, assim como simular o desenvolvimento da fenda da barragem. Ademais, realizou-se a análise da atenuação do hidrograma de cheia gerado ao longo do trecho a jusante do açude escola.

Para processamento de dados para simulação da onda de cheia em uma amostra de nove reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, incluindo o conjunto de dados processados em ambiente SIG, usou-se a planilha do Excel para o tratamento dos dados. No ambiente SIG, fez-se o traçado das bacias hidrográficas dos açudes em cascata, onde foi possível estimar o valor de CN (curve number) das bacias hidrográficas dos açudes, medir aproximação do comprimento do rio principal das bacias hidrográficas dos açudes e consequentemente a declividade do rio principal.

Reproduziu-se a onda de cheia para tempos de retornos de 10, 25, 50, 100, 1000 e 10000 anos na amostra de nove (9) açudes, de forma individual, utilizando o software de simulação de modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System; USACE, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações com os modelos HEC-HMS e HEC-RAS estão ilustrados na Figura 2. Na Figura2a, é possível perceber a geometria da fenda modelada com o HEC-RAS. A largura de topo média da fenda estimada com base nos dados topográficos levantados foi de 18,75 m, enquanto o valor computado pelo modelo com base nos dados de altura do maciço e volume do reservatório no momento do colapso foi pouco inferior (14,83 m). Na Figura 2b, pode-se verificar que o pico da vazão durante o processo de ruptura da barragem atinge 150 m³/s, enquanto a vazão pelo vertedor da barragem se limita a 20 m³/s. Na Figura 2c, verifica-se a mancha de inundação durante a propagação no trecho de jusante da onda de cheia gerada na ruptura. Com a ausência de outros obstáculos a montante, como barragens adicionais ou outras estruturas

ISSN: 2447-6161

hidráulicas, a onda de cheia derivada da ruptura da barragem atinge o Rio Curu em curta distância e é atenuada, sem impactos expressivos.



Figura 2 – Resultados da aplicação dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS: a) seção transversal da barragem com vista de montante e destaque para a topografia do terreno (linha cinza) e traçado da barragem, incluindo a fenda no ponto mais profundo e o vertedor na ombreira direita (linha vermelha; b) Vazões de entrada (Qin) e saída (Qout), com destaque para a vazão pela fenda (Qfenda) e vertedor da barragem (Qvert); e c) Área inundada durante a propagação da onda decorrente da ruptura no trecho de jusante.

Os resultados apresentados na Figura 3 mostra o processo de atenuação da onda de cheia gerada durante a ruptura do açude Escola com dissipação total após atingir a calha de grande porte do Rio Curu, localizado a jusante.



Figura 3 – Propagação da onda de cheia da ruptura da barragem do açude Escola no trecho a jusante.

Aplicando-se o modelo HEC-HMS para uma amostra de nove sub-bacias de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste foi possível gerar os hidrogramas de cheias associados a diferentes tempos de retorno (10, 25, 50, 100, 1000 e 10000 anos), conforme ilustrado na Figura 4. Os resultados mostram picos de vazão de até 104 m^3/s na entrada do açude 4 (Carrapato), localizado no exutório desta sub-bacia.



Figura 4 – Hidrograma de cheia dos nove açudes da bacia do Carrapato para um tempo de retorno de 10, 25, 50, 100, 1000 e 10000 anos.

CONCLUSÕES

A aplicação combinada de modelos hidrológico (HEC-HMS) e hidráulico (HEC-RAS) permitiu simular a geração da cheia na bacia hidrográfica que induziu o rompimento da barragem, assim como o processo de desenvolvimento da fenda foi simulado de forma coerente resultando em uma seção com características similares às levantadas em campo. A modelagem aplicada permitiu ainda visualizar os impactos da onda de cheia a jusante do açude Escola, que foram totalmente atenuados pelo rio Curú, sem maiores prejuízos neste trecho.

O modelo HEC-HMS também foi aplicado a uma amostra de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Escola e permitiu verificar os hidrogramas de cheia para diferentes recorrências. Estudos complementares de análise de ruptura na rede de reservatórios da bacia do Pentecoste estão sendo realizados com o propósito

ISSN: 2447-6161

de avaliar a susceptibilidade de rompimento em cascata e análise de riscos nos reservatórios estratégicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo financiamento do projeto de pesquisa em que está inserido este estudo (Processo nº UNI-0210-00025.01.00/23) e pela bolsa de iniciação científica ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2021). Relatório de segurança de barragens 2020. Agência Nacional de Águas, Brasília.

FERREIRA, A.L.M.; and ANDRZEJEWSKI, E.A. (2015). Comparação de Métodos de Cálculo da Ruptura de uma Barragem Hipotética. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens.

FUSARO, T.C.; DIAS, G.G.; ANDERÁOS, A.; LEONARDI, C.; PIMENTEL, C.E.B.; NEUMANN, C.; OSAKO, C.; COELHO, D.P.; FARIA, E.F.; WILLRICH, F.L.; PATIAS, J.; OLIVEIRA, J.A.; ARAÚJO, L.M. N.; and MATOS, S. F. (2012). Módulo III: gestão e desempenho de barragens. Unidade 1: análise e gestão de riscos. Capacitação ANA: Segurança de Barragens.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS - ICOLD (1973). Lessons from Dam Incidents, reduced edition, Paris: ICOLD, 205 p.

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

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

ISSN: 2447-6161