



Avaliação de Desempenho de Dispositivos de Saída em Reservatório de Detenção para Controle de Cheias

Anísio de Sousa Meneses Filho¹; Lucas Florêncio da Cunha Teixeira²

✉ lucasefcivil@gmail.com

1. *Universidade de Fortaleza – Fortaleza (CE).*
2. *Universidade Federal do Ceará – Fortaleza (CE)*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 13 de dezembro de 2021

Aceito em: 29 de junho de 2022

Publicado em: 31 de agosto de 2022

Resumo: Este trabalho propõe expor uma comparação avaliativa de arranjos de dispositivos de saída presentes em reservatório de detenção. O primeiro passo é a escolha da área, tendo sido escolhida uma porção da macrobacia da Vertente Marítima, em Fortaleza, de aproximadamente 33 hectares. Dessa forma, dada a disponibilidade da área, foram determinados os argumentos geométricos do reservatório, através da relação altura-área-volume, quais sejam comprimento e largura totais, comprimento e largura de fundo, altura e largura dos vertedores primário e de emergência, altura entre o orifício e o vertedor primário, diâmetro e quantidade dos orifícios circulares, largura e altura do orifício retangular, cujos valores foram fixados durante as simulações. A área total do reservatório foi adotada de 4.000 m² com profundidade de 2,0 m, pensando no seu propósito de usos múltiplos e em custos de escavação reduzidos. Os hidrogramas de entrada foram obtidos pelo método de Santa Barbara, para períodos de retorno de 10 e 25 anos. Foram testadas duas configurações: a primeira é composta de orifício e vertedouro retangulares, e a segunda, de vertedouro retangular e orifícios circulares. Para a obtenção dos hidrogramas de saída, foi adotado o método de Puls modificado. Assim, simularam-se diversas configurações destes dispositivos até serem obtidas as combinações que proporcionassem o melhor efeito do reservatório, ou seja, a maior laminação e o maior retardo do tempo de pico. Este trabalho contribui para evidenciar a necessidade de se promoverem simulações para que um arranjo mais adequado possa ser reconhecido para cada cenário diferente.

Palavras-chave: Drenagem urbana, Técnicas compensatórias, Método de Puls modificado, Laminação de cheias.

Performance Evaluation of Outlet Devices in Detention Basin for Flood Control

Abstract: This paper aims at exposing an evaluative comparison of outlet devices' arrangement in detention basins. The first step is choosing the area, in which a portion of the Vertente Marítima basin in Fortaleza city was selected, totaling 33 hectares, approximately. By considering area availability, the detention basin's geometric parameters were determined, through the area-depth-volume curve, i.e., total width and length, bottom width and length, height and width of primary and emergency spillways, height between the orifice and the primary spillway, diameter and number of circular orifices, width and height of the rectangular orifice, whose values were kept constant during the simulations. The detention basin's total surface was considered 4.000 m² with 2,0 m height, due to its purpose of multiuse and lower excavation costs. The input hydrograms were obtained by Santa Barbara's method adopted for return periods of 10 and 25 years. Two configurations were tested: the first one considered both the orifice and the spillway as rectangular, while the second one considered the orifices as circular and the spillway as rectangular. The output hydrograms were obtained by using the modified Puls method. Thus, several of those devices' variations were put into test until the best results were obtained, those which provided the greater percentual lamination and peak time delay. This paper contributes to pointing out the need of performing simulations in order to identify the most suitable setup for each different situation.

Keywords: Urban drainage, Best management practices, Modified Puls method, Flood lamination.

Evaluación del Rendimiento de Dispositivos de Salida en Cuenca de Detención para Control de Inundaciones

Resumen: Este trabajo tiene propone exponer una comparación evaluativa de la disposición de los dispositivos de salida en cuencas de detención. El primer paso es elegir el área, en la que se seleccionó una porción de la cuenca de Vertente Marítima en Fortaleza, totalizando 33 hectáreas, aproximadamente. Al considerar la disponibilidad del área, se determinaron los parámetros geométricos de la cuenca de detención, mediante la curva altura-área-volumen, es decir, ancho y largo total, ancho y largo de la base, alto y ancho de los aliviaderos primario y de emergencia, altura entre el orificio y el aliviadero primario, diámetro y número de agujeros circulares, ancho y alto del agujero rectangular, cuyos valores se mantuvieron constantes durante las simulaciones. Su superficie total se consideró 4.000 m² con 2,0 m de altura, para usos múltiples y menores costos de excavación. Los hidrogramas de entrada se obtuvieron mediante el método de Santa Bárbara para períodos de retorno de 10 y 25 años. Se probaron dos configuraciones: el primero consideró tanto el agujero, como el aliviadero rectangulares, mientras que el segundo les consideró como circulares y rectangular, respectivamente. Los hidrogramas de salida se obtuvieron utilizando el método Puls modificado. Por eso, muchas de las variaciones de esos dispositivos se pusieron a prueba hasta que se obtuvieron los mejores resultados, lo que proporcionó la mayor laminación porcentual y el retraso de tiempo máximo. Este trabajo contribuye a señalar la necesidad de realizar simulaciones para identificar la configuración más adecuada para cada situación diferente.

Palabras clave: Drenaje urbano, Técnicas compensatorias, Método Puls modificado, Laminación de inundación.

INTRODUÇÃO

As enchentes urbanas constituem um problema que assola os grandes centros urbanos brasileiros, em especial aqueles que tiveram um crescimento ocupacional desordenado. Danos ambientais, sociais e econômicos decorrem dessa dificuldade de manejo adequado de águas pluviais. Quase sempre esses problemas se dão pela incorreta intervenção no sistema natural de macrodrenagem, sem a devida correção ou medida compensatória para mitigar os impactos ocasionados.

Isso ocorre devido ao processo de urbanização sem o adequado controle de uso e ocupação do solo, resultando em impermeabilização de áreas com conseqüente aumento de geração de escoamento superficial (MENESES FILHO; TEIXEIRA; LOPES, 2020). Esse processo deteriora a qualidade de vida da população e com o aumento da frequência e do nível das inundações, reduz-se a qualidade da água e aumenta-se a quantidade de resíduos sólidos existentes nos corpos hídricos (CURITIBA, 2002). A intervenção planejada no âmbito das diretrizes ocupacionais da bacia é a maneira mais efetiva para o controle das enchentes.

Mais recentemente, as estratégias de drenagem urbana passaram a englobar soluções alternativas que, em contraposição às técnicas clássicas, geralmente incluem integração de diversos propósitos para os dispositivos hidráulicos instalados. Para Souza, Medeiros e Miranda (2017), as técnicas compensatórias procuram resgatar as condições de pré-urbanização, assim como o controle de volume e velocidade de escoamento durante as precipitações. Dessa forma,

busca-se, com o emprego dessas técnicas, compensar ou mitigar os efeitos decorrentes da urbanização.

No âmbito deste trabalho, foi selecionado como objeto de investigação o reservatório de detenção que, segundo Bahiense (2013), consiste em uma estrutura de armazenamento temporário que pode direcionar água para o sistema de drenagem ou outro reservatório, cujo principal objetivo é o armazenamento de escoamento excedente. Enfatiza-se, ainda, que este constitui um reservatório de detenção in-line com seção tronco piramidal. Nesse quesito, poder-se-ia ter optado por um reservatório off-line, cuja vantagem é a menor capacidade requerida para alcance dos objetivos da detenção. Entretanto, este necessita de maior espaço físico, o que nem sempre é disponível nos centros urbanos.

Nesse contexto, foram realizadas simulações do reservatório acoplado a orifícios e vertedouros. A definição do melhor arranjo dos dispositivos de saída da detenção a fim de assegurar o atendimento do propósito de laminação, no controle das cheias urbanas, constitui um desafio a ser enfrentado, no mais das vezes, por um processo de simulação envolvendo tentativa e erro. Antes de tudo, porém, é fundamental ao projetista estabelecer o critério para aferir o desempenho do reservatório, que pode ser, por exemplo, o de uma vazão de restrição compatível com a capacidade hidráulica do sistema atual de macrodrenagem.

A análise adotada considerou a variação das dimensões e quantidade de dispositivos de saída para comparação dos resultados, em termos de laminação e armazenamento máximo. Assim, o presente trabalho propõe uma metodologia que possibilite aos gestores de drenagem urbana uma tomada de decisão na fase de planejamento do dispositivo de controle de vazão. O critério adotado consiste na máxima laminação percentual obtida com combinações diversas de quantidades e dimensões dos orifícios. O melhor arranjo corresponde ao que resulta em maior laminação percentual e retardo de tempo de pico.

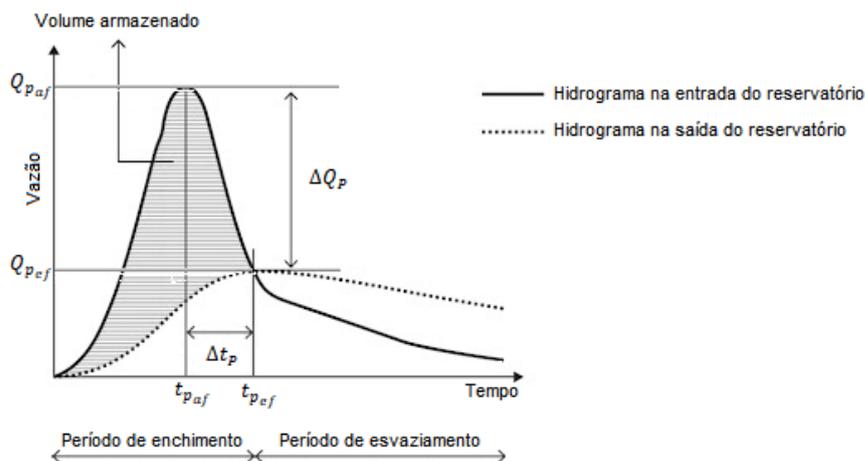
Importância das detenções

Os reservatórios de detenção, segundo ADASA (2018), destinam-se a amortecer os picos de escoamento, liberando de forma gradativa os volumes afluentes. Para segurança, devem conter vertedouro de emergência e um dreno enterrado no leito para preservação do fundo.

Ademais, eles colaboram com a diminuição das inundações urbanas por meio da acumulação temporária de água. Assim, têm a capacidade de suavizar as cheias e inundações (ABCP, 2013). Portanto, os principais objetivos da detenção se dão no retardo do tempo de pico,

diminuição do pico de vazão e integração da repercussão da mudança de configuração no hidrograma de saída. O Gráfico 1 ilustra esses efeitos provocados pelo reservatório de detenção.

Gráfico 1. Hidrogramas de entrada e saída no reservatório de detenção



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Para o derradeiro objetivo dos reservatórios de detenção, há uma distinção importante entre detenções local e regional. Segundo Gribbin (2014), a detenção local objetiva proteger as áreas circunvizinhas dos efeitos da urbanização, uma vez que escoamentos mais intensos sobre o solo, em galerias de águas pluviais e em cursos d'água naturais para áreas a jusante da detenção podem provocar danos de erosão ou inundação. Para o autor, a depender das condições do local onde se deseja atenuar o escoamento das águas pluviais, é preferível adotar a detenção regional, cujas vantagens são menos custos, exigência de menos espaço e manutenção mais fácil do que a de reservatórios individuais locais. Dessa forma, o projetista deve ser criterioso quanto à escolha de um tipo de detenção em detrimento do outro, avaliando o agravamento das cheias nos pontos mais vulneráveis.

Em comparação com outras técnicas compensatórias, os reservatórios de detenção proporcionam facilidade de limpeza, pois todos os resíduos sólidos tendem a se concentrar em apenas um lugar. Possuem também custos reduzidos de canalizações, além de auxiliar nos projetos de áreas verdes e de lazer nas cidades (ABCP, 2013).

Assim, a detenção apresenta sua importância nos centros urbanos pelo fato de colaborarem com o controle de vazões geradas por precipitações, que normalmente gerariam enchentes a depender apenas do sistema tradicional de microdrenagem, além de possuírem a versatilidade de integração de múltiplos usos.

Em contrapartida, o desafio da escolha de um local para a implantação de detenções se amplia quando a ocupação urbana já consolidada limita enormemente a disponibilidade de espaço físico para a implantação das medidas de drenagem na natureza compensatória. Os reservatórios de detenção requerem uma área da ordem de 2% da superfície contribuinte da bacia, como se infere do trabalho de Meneses Filho, Teixeira e Lopes (2020). Locais preferenciais para isso são as praças e espaços de lazer, conciliando usos múltiplos ao rebaixamento do nível do solo para a acumulação temporária das águas no período chuvoso e a prática de esportes no período seco. Particularmente em Fortaleza, as chuvas se concentram em cerca de três ou quatro meses por ano, fazendo com que em até 75% do tempo a área ocupada pelo reservatório não esteja cumprindo a sua precípua função.

Integração de técnicas de manejo de águas pluviais

Tipicamente, os sistemas de microdrenagem urbana ainda não apresentam, em sua essência, a visão sustentável no manejo das águas pluviais. Assim, dado o contexto de preservação ambiental, é necessário que os gestores de drenagem urbana contemplem técnicas compensatórias e consigam realizar a integração dessas técnicas com o restante do sistema. Para Tucci *et al.* (1995), “a melhor drenagem é aquela que drena o escoamento sem produzir impactos nem no local, nem a jusante”. Com efeito, porém, a associação de medidas de condução hidráulica e de permanência mais longa dos volumes na bacia tende a responder melhor a esse propósito.

Segundo Oliveira, Barbassa e Gonçalves (2016), o manejo sustentável das águas pluviais tem adquirido espaço e avanços em algumas experiências internacionais, objetivando prevenir e mitigar os efeitos da urbanização com uma abordagem de seus impactos de forma integrada, adotando medidas não estruturais e também técnicas compensatórias estruturais, cujas vantagens consistem em serem mais econômicas, causarem menor impacto ambiental e auxiliarem no desenvolvimento sustentável das áreas urbanas (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

Alguns projetos envolvendo técnicas compensatórias em determinadas áreas de centros urbanos apresentam soluções de drenagem em microescala, propondo alternativas para redução do escoamento superficial dessas áreas para o sistema tradicional de drenagem existente (OLIVEIRA; BARBASSA; GONÇALVES, 2016).

Procedimentos para o dimensionamento preliminar dos reservatórios de detenção

Conforme Silveira e Goldenfum (2007), o volume máximo a ser armazenado sobre toda a bacia contribuinte pelo reservatório de detenção corresponde à Equação 1:

$$V_{m\acute{a}x} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{C} \cdot TR^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \cdot \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (1)$$

Onde $V_{m\acute{a}x}$ é o volume de acumulação em mm, C é o coeficiente de escoamento, TR é o período de retorno em anos, q_s é a vazão de saída em mm/h e a e c são parâmetros que dependem da área onde está sendo aplicada a equação.

Assim, ao adotar a Equação (1), pode-se estimar o volume necessário. Neste trabalho, optou-se por reservatório de detenção com leito impermeável, cuja vazão é igual à do pré-desenvolvimento urbano, ou seja:

$$q_s = q_{pre} \quad (2)$$

Relação IDF

As chuvas intensas variam conforme a sua duração e recorrência. Na fase de projeto, elas são estimadas para que se tenha a vazão do escoamento superficial necessário para o dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem. Como usual, nas pequenas bacias, a adoção do tempo de concentração como equivalente ao tempo de duração da chuva de projeto, de forma a permitir que toda a área de drenagem esteja contribuindo para a vazão no ponto de controle, é teoricamente plausível. No entanto, esse parâmetro característico da bacia não é de fácil estimativa, senão quando se dispõem de dados consistentes de vazão para a sua calibração.

As expressões empíricas de literatura para a estimativa do tempo de concentração apresentam resultados bem distintos e poucas vezes conseguem contemplar de maneira satisfatória as características da bacia. O tempo de retorno também embute um significado prático que, não raro, escapa àquilo que se deduz da relação IDF – ou seja, o tempo médio estatístico adotado para a estimativa do risco hidrológico na análise binomial. Mudanças climáticas tendem ainda a precarizar a qualidade do hidrograma de projeto e, por conseguinte, o desempenho dos dispositivos hidráulicos dimensionados a partir dele.

Genericamente, escrevem-se as relações IDF como:

$$i = \frac{a \cdot TR^b}{(t + c)^d} \quad (3)$$

Sendo i a intensidade de chuva, TR o período de retorno, a , b , c e d parâmetros que dependem da área onde a equação está sendo aplicada.

Segundo Silva, Palácio Júnior e Campos (2012), no âmbito do município de Fortaleza, área adotada para as simulações deste trabalho, a relação IDF se escreve conforme Equação (4), com i em mm/h, TR em anos e t em minutos.

$$i = \frac{2.345,29 \cdot TR^{0,173}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (4)$$

Composição dos dispositivos de saída para garantia de desempenho hidráulico

Para a simulação do reservatório, faz-se necessário conhecer as equações da hidráulica e saber os parâmetros de calibração dos dispositivos de saída, ou seja, dos orifícios e dos vertedouros, para, dessa forma, estabelecer a relação entre volume armazenado e vazão de saída. Ademais, é de crucial importância conhecer a relação cota-área-volume, já que as vazões dependem da carga hidráulica. A área do espelho d'água do reservatório é fundamental para estimar as perdas por evaporação.

Segundo Kannan *et al.* (2014), os reservatórios de detenção utilizam estruturas de saída controladas para limitar o fluxo de grandes volumes de entrada no reservatório. Essas estruturas podem ser vertedouros ou orifícios a depender da necessidade. De acordo com Vergutz, Pereira e Schmidt (2019), uma provável solução para evitar o aumento dos custos de escavação de reservatórios de detenção, de forma a obter o mesmo desempenho hidráulico, é redimensionar os dispositivos de saída a fim de atingir a otimização do processo.

As equações fundamentais dos orifícios e vertedouros podem ser descritas como (PORTO, 2006):

$$Q_{orif} = n \cdot C_d^{orif} \cdot A^{orif} \cdot \sqrt{2gh^{orif}} \quad (5)$$

$$Q_{vert} = n \cdot C_d^{vert} \cdot L^{vert} \cdot (h^{vert})^{3/2} \quad (6)$$

Sendo Q_{orif} e Q_{vert} as vazões dos orifícios e vertedouros, respectivamente, em m³/s; n a quantidade de dispositivos; C_d^{orif} o coeficiente de descarga dos orifícios; C_d^{vert} o coeficiente de descarga dos vertedouros em ml/2/s; A^{orif} a área da seção transversal dos orifícios em m²; L^{vert} a largura dos vertedouros em m; g a aceleração da gravidade em m/s²; h^{orif} a carga hidráulica nos orifícios em m e h^{vert} a carga hidráulica nos vertedouros em m.

METODOLOGIA

Neste estudo de caso, selecionou-se como área contribuinte uma parcela de aproximadamente 33 hectares da bacia da Vertente Marítima, em Fortaleza (CE), mais especificamente da bacia do Riacho Pajeú, que, conforme a classificação estabelecida pela SEUMA (Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente), apresenta partes das microbacias A3.1 e A3.2. A escolha se deu devido à existência de três pontos críticos de alagamento na região, como destacam Campos, Pinheiro e Studart (2005). Essa área pode ser visualizada na Figura 1.

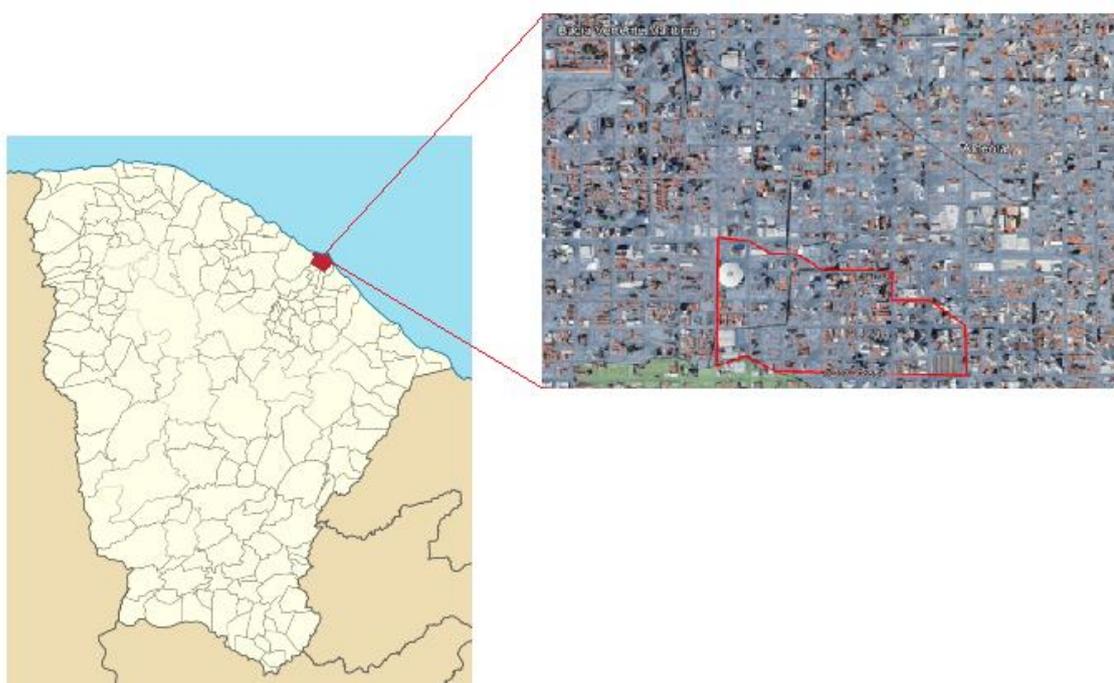


Figura 1. Localização da área de contribuição para a detenção

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro®, 2021.

A importância da bacia acompanha toda a evolução histórica da cidade de Fortaleza. Ao longo do tempo, e de forma mais acentuada a partir da primeira metade do século XX, quando a Cidade expande o seu sistema viário e a área edificada, esse curso de água foi-se descaracterizando na paisagem urbana – hoje, mais de 70% de seu curso está canalizado e as águas transitam sem serem vistas.

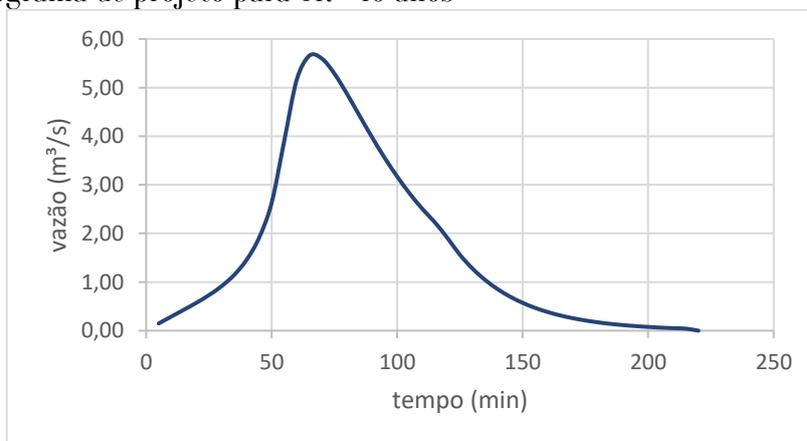
A metodologia utilizada neste trabalho para a obtenção do hidrograma de projeto foi a do método de Santa Barbara (SBUH), cujas ordenadas do hidrograma são calculadas conforme Equação 7 (TOMAZ, 2012):

$$I = [i \cdot d + i_e \cdot (1,0 - d)] \cdot A \quad (7)$$

Sendo I a entrada do reservatório imaginário (m^3/s), i a precipitação total da chuva no intervalo Δt (m/s), i_e o escoamento da chuva excedente no intervalo Δt (m/s), d a fração da área impermeável em relação à área total e A a área de drenagem (m^2).

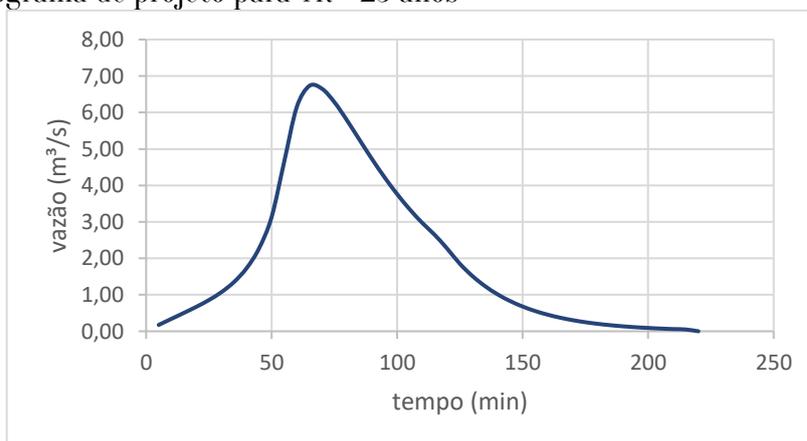
Partindo da relação IDF de Fortaleza, considerando a área de contribuição de 33 hectares, o tempo de concentração de 25 minutos, área impermeável de 76% e o CN (curve-number do SCS) de 85, os Gráficos 2 e 3 representam os hidrogramas de projeto considerados.

Gráfico 2. Hidrograma de projeto para TR = 10 anos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Gráfico 3. Hidrograma de projeto para TR = 25 anos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Utilizando os hidrogramas de projeto, adotou-se, para a simulação das propagações de cheias no reservatório de detenção, o método de Puls modificado, que consiste numa aproximação por diferenças finitas da equação da continuidade associada a uma representação

empírica da equação da quantidade de movimento. A relação entre o volume armazenado e vazão de saída em determinado instante pode ser escrita como:

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2}\right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) + \left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2}\right) \quad (8)$$

Sendo S o volume armazenado, Δt o intervalo de tempo da análise, I a vazão de entrada, O a vazão de saída e os subscritos t e $t - 1$ indicam o intervalo de tempo atual e anterior, respectivamente.

Assim, realizaram-se simulações variando as combinações dos dispositivos de saída do reservatório, considerando-se o efeito associado de orifícios circulares ou retangulares com vertedouros retangulares. As simulações, para o caso de orifícios circulares, levaram em conta o efeito da quantidade e do diâmetro dos orifícios na atenuação do pico de vazões. Para o caso de orifícios retangulares, variaram-se a largura e o comprimento deste dispositivo nas simulações realizadas. O final do processo é o hidrograma de saída do reservatório, obtido com a aplicação do método de Puls modificado.

Assim, foi considerada uma área disponível de 4.000,00 m² nas simulações deste trabalho. Para minimizar o volume de escavação, uma altura máxima de 2,00 m foi adotada.

Por fim, com os resultados de hidrograma de entrada e de saída para cada uma das simulações, foi possível estimar o armazenamento máximo necessário para o reservatório de detenção, assim como a laminação máxima obtida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando a Equação (1) para período de retorno de 25 anos e vazão de saída de 18 mm/h, encontrou-se um volume requerido de 12.872,26 m³ para o reservatório de detenção. Para adequar esse valor à área disponível, foram considerados 8.000 m³, algo que se mostrou suficiente para desempenhar a função pretendida pelo reservatório.

Para realizar as simulações, foram adotados os argumentos geométricos expostos na Figura 2.

Avaliação de Desempenho de Dispositivos de Saída em Reservatório de Detenção para Controle de Cheias

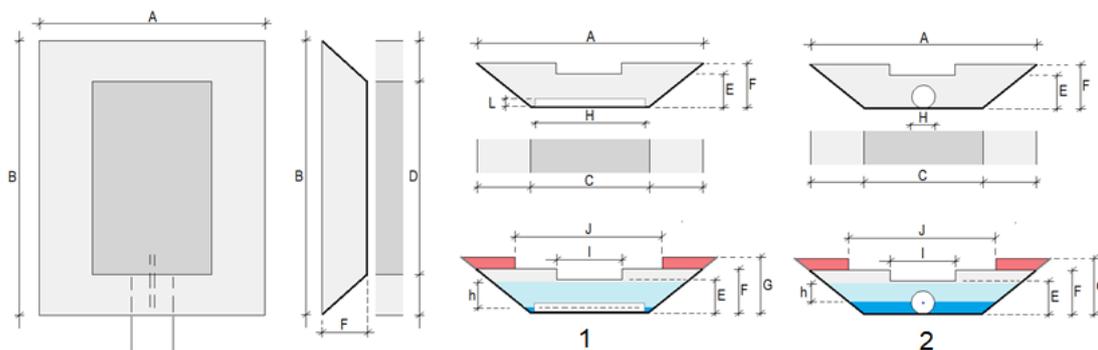


Figura 2. Argumentos geométricos referentes às simulações

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

No caso de orifício e vertedouro retangulares, consideram-se os argumentos A, B, D e F combinados com a situação 1. Para orifícios circulares e vertedouro retangular, foram utilizados os argumentos A, B, D e F combinados com a situação 2.

Na Tabela 1 encontram-se os valores adotados para cada um dos parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros adotados na simulação

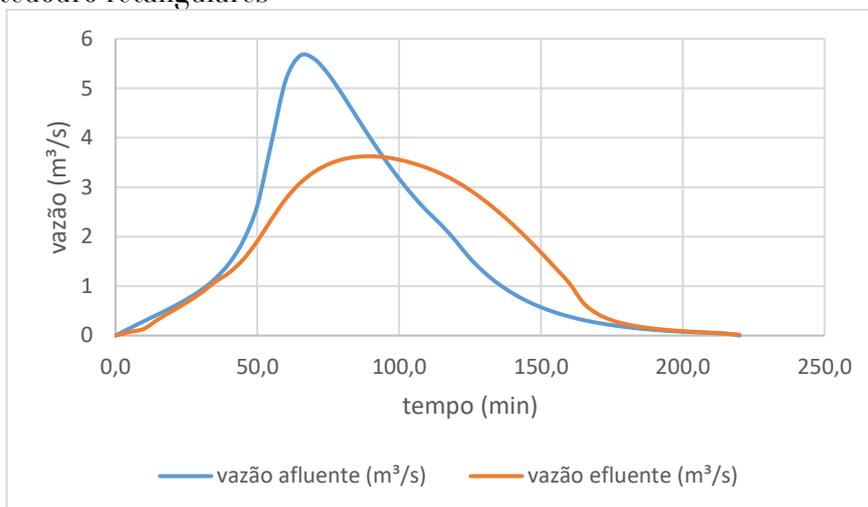
Parâmetro	Dimensão (m)
A	50,00
B	80,00
C	40,00
D	60,00
E	1,80
F	2,00
G	2,20
I	3,00
J	8,00

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Na simulação de orifício e vertedouro retangulares, foi considerado apenas um orifício, localizado no fundo do reservatório. Nessa simulação, para $TR = 10$ anos, os parâmetros H e L foram considerados, inicialmente, 8,00 m e 0,20 m, respectivamente. Essa simulação gerou uma laminação de 19,99% e retardo do tempo de pico de 20 minutos. Em termos de armazenamento máximo, foi obtido 3.283,36 m³. Após alguns testes, obteve-se uma laminação percentual de 35,91% e retardo do tempo de pico de 30 minutos com armazenamento máximo de 5.522,08 m³, considerando H e L iguais a 10,00 m e 0,10 m, respectivamente. Esses foram os argumentos

geométricos de H e L ótimos, pois obtiveram os maiores valores de laminação e retardo do tempo de pico. O Gráfico 4 demonstra os hidrogramas de entrada e saída para a situação otimizada.

Gráfico 4. Hidrogramas afluente e efluente otimizados para TR = 10 anos na simulação com orifício e vertedouro retangulares

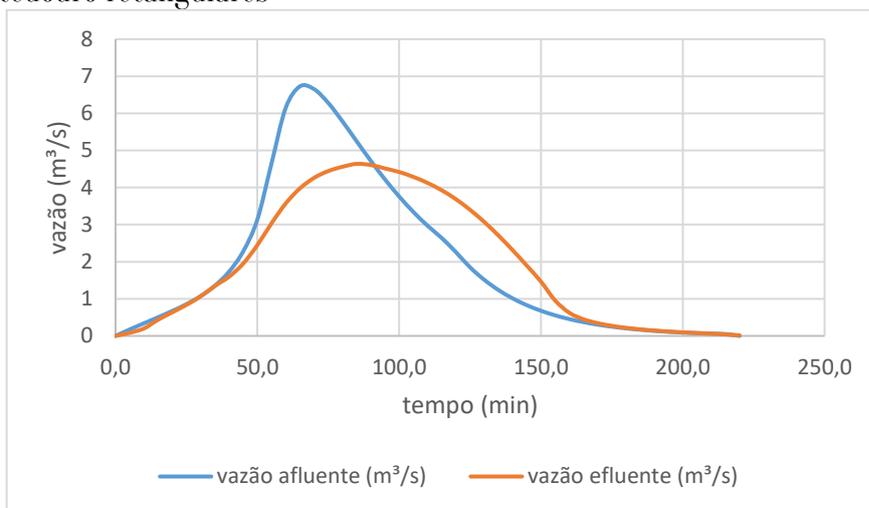


Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Para TR = 25 anos, H e L também foram adotados como 8,00 m e 0,20 m inicialmente, proporcionando 23,32% de laminação e 20 minutos de retardo do tempo de pico, com 4.368,78 m³ de armazenamento máximo. Os valores otimizados de H e L foram 12,50 m e 0,10 m, correspondentes a uma laminação de 31,05% e retardo do tempo de pico de 25 minutos. O armazenamento máximo foi de 5.964,66 m³. Essa simulação gerou os hidrogramas presentes no Gráfico 5.

Observa-se que, no caso de orifícios retangulares, a melhor situação é aquela que apresenta menor altura e maior largura desses orifícios até o limite de 0,10 m e 12,50 m, respectivamente, para TR = 25 anos, e 0,10 m e 10,00 m, para TR = 10 anos. Em termos de armazenamento máximo, os orifícios dessas dimensões proporcionaram os maiores aproveitamentos da capacidade do reservatório de detenção levando em consideração os cenários simulados.

Gráfico 5. Hidrogramas afluente e efluente otimizados para TR = 25 anos na simulação com orifício e vertedouro retangulares

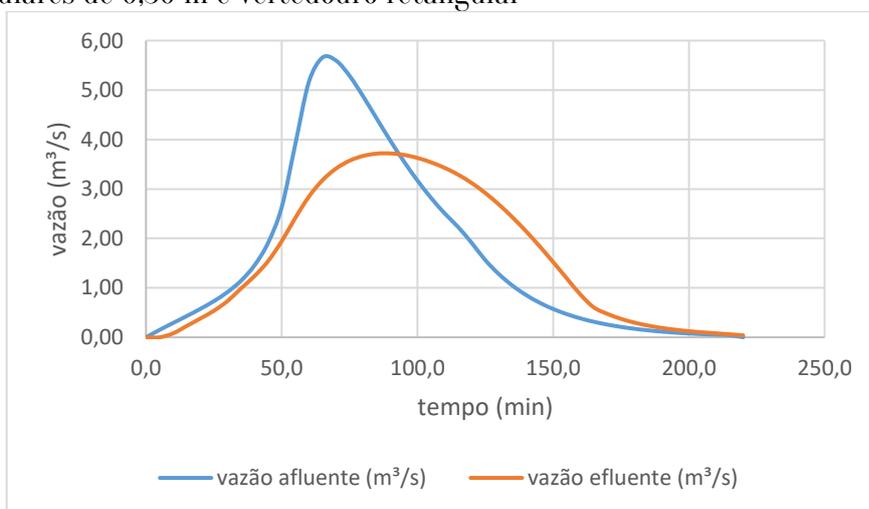


Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Na simulação com orifícios circulares e vertedouro retangular, para TR = 10 anos, foram feitas simulações com 1, 3, 5, 8, 10 e 15 orifícios circulares de 0,30 m. A simulação com 15 orifícios foi a otimizada, quando se obteve 34,25% de laminação percentual, 30 minutos de retardo do tempo de pico e 3.097,41 m³ de armazenamento máximo. No Gráfico 6, estão expostos os hidrogramas referentes a essa situação.

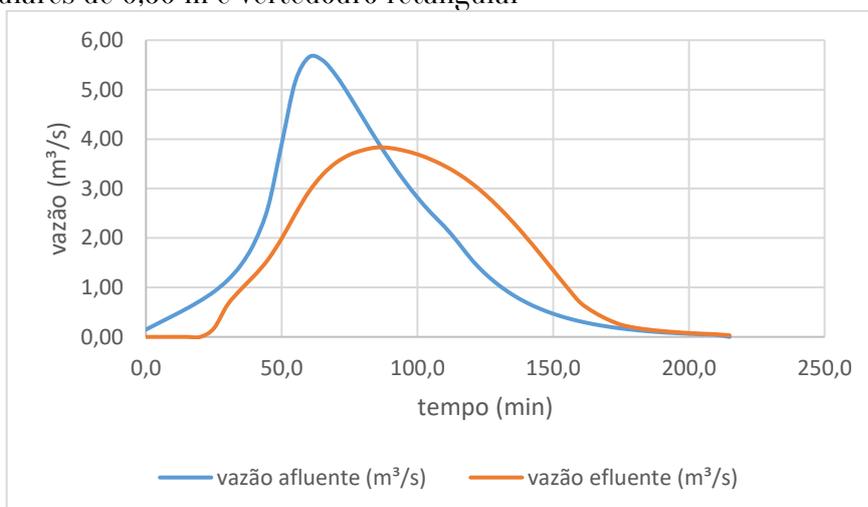
No caso de orifícios circulares com 0,60 m, procedeu-se com simulações considerando 1, 3 e 4 orifícios. Essa última foi a situação otimizada, com 32,26% de laminação, 25 minutos de retardo do tempo de pico e 3.387,27 m³. O Gráfico 7 expõe os hidrogramas obtidos para esse caso.

Gráfico 6. Hidrogramas afluente e efluente otimizados para TR = 10 anos na simulação com orifícios circulares de 0,30 m e vertedouro retangular



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Gráfico 7. Hidrogramas afluente e efluente otimizados para TR = 10 anos na simulação com orifícios circulares de 0,60 m e vertedouro retangular

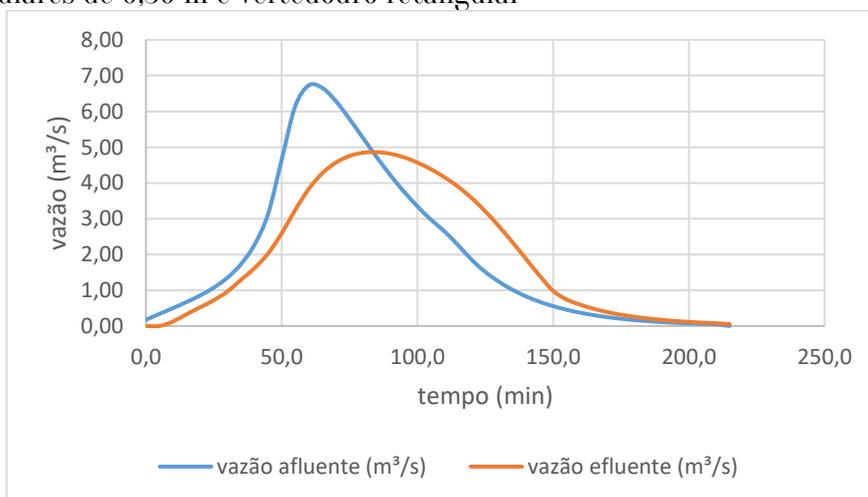


Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Para TR = 25 anos, as simulações foram feitas com 1, 3, 5, 8, 10, 15 e 20 orifícios circulares de 0,30 m. No caso de 20 orifícios, foi obtida laminação de 27,75%, retardo do tempo de pico de 25 minutos e 3.710,18 m³ de armazenamento máximo, sendo a situação de otimização para esse caso. O Gráfico 8 demonstra os hidrogramas obtidos nesse caso.

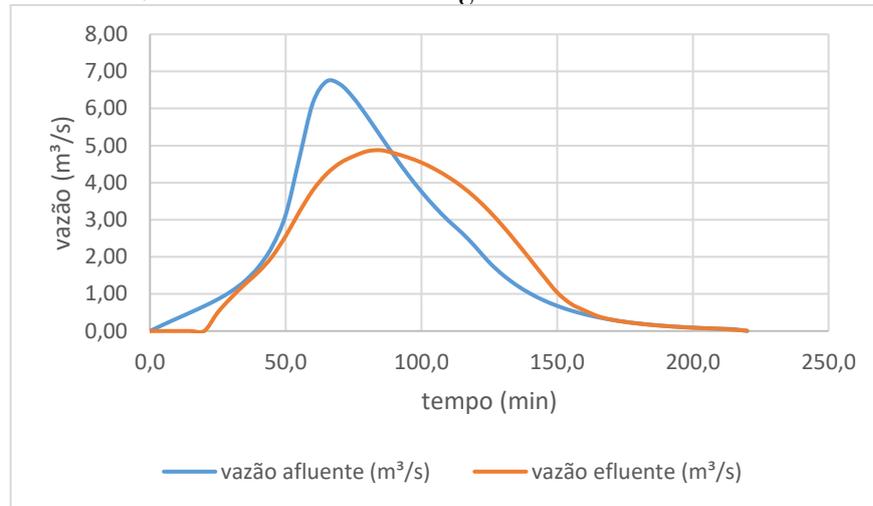
No caso de orifícios circulares de 0,60 m, foram feitas simulações com 1, 3 e 5 orifícios, sendo essa última a situação otimizada, com 27,56% de laminação percentual, 25 minutos de retardo do tempo de pico e 3.596,50 m³ de armazenamento máximo. Os hidrogramas para essa situação estão ilustrados no Gráfico 9.

Gráfico 8. Hidrogramas afluente e efluente otimizados para TR = 25 anos na simulação com orifícios circulares de 0,30 m e vertedouro retangular



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Gráfico 9. Hidrogramas afluente e efluente otimizados para TR = 25 anos na simulação com orifícios circulares de 0,60 m e vertedouro retangular

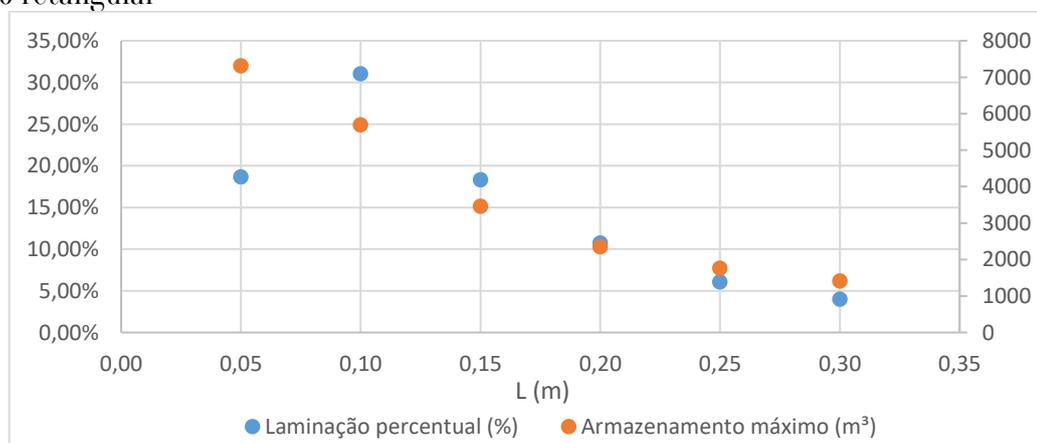


Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

No caso de orifícios circulares, as melhores situações são aquelas que adotam orifícios maiores, ou seja, 0,60 m, já que uma quantidade bem menor de orifícios dessa magnitude atinge praticamente os mesmos resultados de muitos orifícios de 0,30 m. Em termos de armazenamento máximo, os valores obtidos foram bem próximos em todas as simulações.

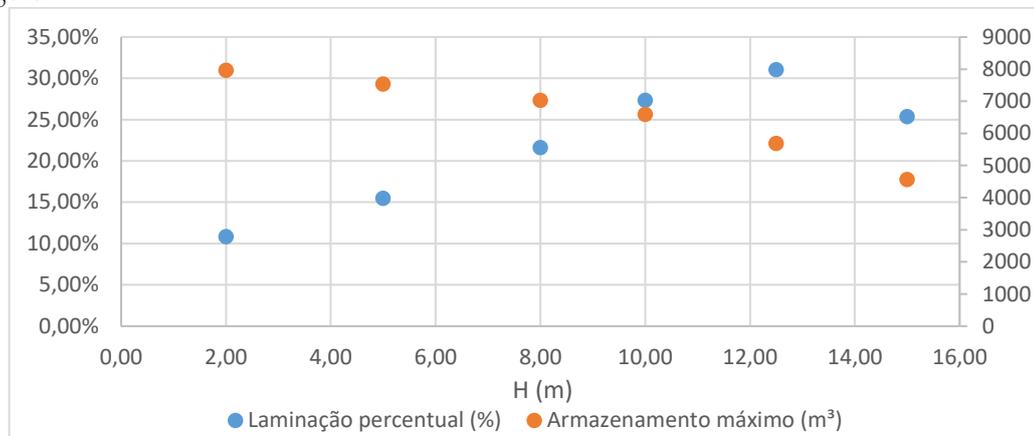
Para avaliar o efeito individual das variações realizadas nas simulações anteriores, construíram-se os gráficos seguintes, onde no eixo x estão os parâmetros variados, no eixo y da esquerda as laminações percentuais obtidas e no eixo y da direita estão os armazenamentos máximos para cada simulação. Os demais parâmetros geométricos foram mantidos constantes, conforme foi descrito na Tabela I.

Gráfico 10. Laminações percentuais obtidas com H = 12,50 m e L variável na simulação com orifício retangular



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

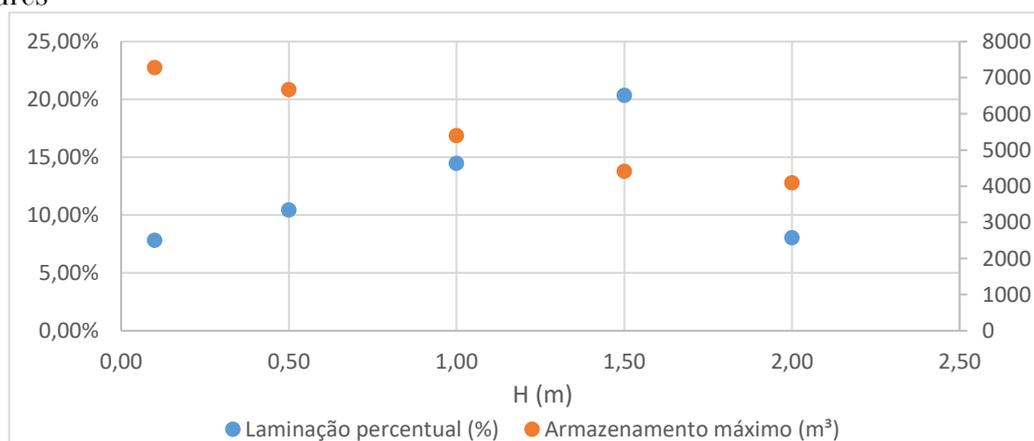
Gráfico 11. Laminações percentuais obtidas com $L = 0,10$ m e H variável na simulação com orifício retangular



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

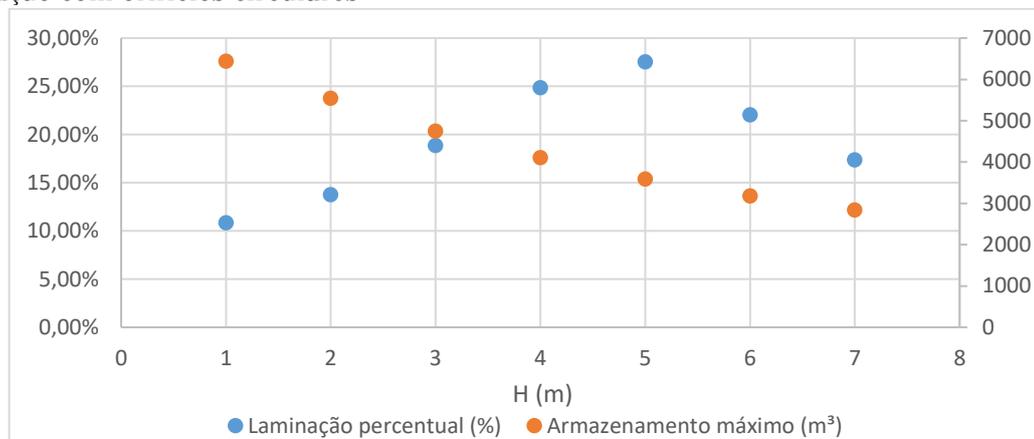
Para o orifício retangular, neste exemplo de aplicação, a variação de L implica maior laminação percentual (25%, aproximadamente) para cerca de 5800 m³ de armazenamento máximo. Ao reduzir esse parâmetro, diminui-se também o armazenamento máximo e a laminação percentual. Já para o parâmetro H , verifica-se que o seu aumento proporciona maior laminação percentual até o limite de $12,50$ m, enquanto o armazenamento máximo diminui.

Gráfico 12. Laminações percentuais obtidas com diâmetro variável na simulação com orifícios circulares



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Gráfico 13. Laminações percentuais obtidas com diâmetro de 0,60 m e quantidade variável na simulação com orifícios circulares



Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

Já para orifícios circulares, o diâmetro é um parâmetro que proporciona melhor desempenho até o limite de 1,50 m, enquanto que o armazenamento máximo para essa dimensão é aproximadamente metade daquela em que se simula com orifício de 0,10 m. No caso de variação da quantidade de orifícios, dentre as simulações feitas (no total de 7), a que apresentou melhor desempenho em termos de laminação corresponde a uma capacidade requerida (volume aproveitado de armazenamento) de cerca de 50% daquela referente ao arranjo menos eficiente (de menor laminação).

Comparações de trabalhos anteriores

Park *et al.* (2012) utilizaram critérios de otimização para o dimensionamento dos dispositivos de saída de reservatório de detenção por meio de algoritmo genético. No estudo realizado, foram obtidos diâmetros muito superiores aos adotados no presente trabalho para aproximadamente a mesma área de contribuição da bacia. As diferenças observadas podem ser atribuídas à ausência de vertedouros primário e de emergência no estudo de Park *et al.* (2012) ou mesmo ao diferente regime de chuvas das áreas de estudo de cada trabalho, o que reforça a importância de estudos locais a cada novo projeto.

No trabalho de Kannan *et al.* (2014), o critério utilizado para o dimensionamento foi o hidrológico. O comportamento dos hidrogramas afluente e efluente se mostrou semelhante aos do presente trabalho. Embora proporcione resultados satisfatórios, a adoção dos hidrogramas é uma etapa preliminar do processo e, para atingir o dimensionamento otimizado dos dispositivos de saída, deve-se adotar o critério hidráulico.

CONCLUSÃO

A avaliação de desempenho promovido pela laminação percentual e capacidade requerida pelo reservatório reforça a importância da avaliação do dispositivo de saída para a escolha otimizada da melhor configuração operacional.

Este trabalho contribui para evidenciar a necessidade de se promoverem simulações para que um arranjo mais adequado possa ser reconhecido para cada cenário diferente. Cabe, portanto, sempre uma análise criteriosa dos custos de implantação do dispositivo de controle de cheias em relação aos benefícios alcançados. Assim, o dimensionamento com relação à capacidade é apenas uma etapa do processo, em busca de um arranjo otimizado dos dispositivos hidráulicos de saída que condicionará o hidrograma efluente e a efetiva atenuação do pico de cheia.

Considerando-se a modelagem deste trabalho, cumpre esclarecer que o processo de propagação de vazões foi simulado pelo método de Puls modificado com as limitações inerentes. Uma delas se refere à desconsideração da transição do regime de canal para orifício durante o enchimento do reservatório, que, em alguns casos, pode gerar instabilidade numérica. Assim, para futuros trabalhos, pode-se sugerir acoplar maior robustez à análise realizada, como a adoção do método das ondas dinâmicas. Ademais, sugere-se a aplicação de uma quantidade maior de períodos de retorno e geometrias diferentes do reservatório, para fins de comparação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. **Projeto Técnico: Reservatórios de Detenção**. São Paulo: Soluções Para Cidades, 2013. Disponível em: <http://solucoesparacidades.com.br/saneamento/reservatorios-de-detencao/>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ADASA. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal**. Editores: Luiz Fernando Orsini Yazaki, Marcos Helano Fernandes Montenegro, Jeferson da Costa. - Brasília, DF: Adasa, Unesco. 2018. 329 p. : il.

BAHIENSE, Juliana Martins. **Avaliação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana Baseadas no Conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto, com o Apoio de Modelagem Matemática**. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2013/2518-juliana-martins-bahiense-mestrado>. Acesso em: 18 nov. 2021.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005, 318 p.

GOOGLE. **Google Earth Pro** ®. 2017. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acesso em 18 nov. 2021.

Avaliação de Desempenho de Dispositivos de Saída em Reservatório de Detenção para Controle de Cheias

GRIBBIN, J. E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

INDAGAÇÃO. **ENADE 2019: O reservatório de detenção objetiva minimizar os efeitos da urbanização sobre a drenagem**. 2020. Disponível em: <https://www.indagacao.com.br/2020/02/enade-2019-o-reservatorio-de-detencao-objetiva-minimizar-os-efeitos-da-urbanizacao-sobre-a-drenagem.html>. Acesso em: 08 dez. 2021.

KANNAN, Narayanan; JEONG, Jaehak; ARNOLD, Jeff; GLICK, Roger; GOSELINK, Leila; SRINIVASAN, Raghavan. HYDROLOGIC MODELING OF DETENTION POND. *International Journal Of Research In Engineering And Technology*, [S.L.], v. 03, n. 02, p. 657-662, 25 fev. 2014. ESAT Publishing House. <http://dx.doi.org/10.15623/ijret.2014.0302117>.

MENESES FILHO, Anísio de Sousa; TEIXEIRA, Lucas Florêncio da Cunha; LOPES, Gustavo Siebra. Dimensionamento de Reservatório de Detenção partindo da Relação IDF regente no Município de Fortaleza (CE). **Revista Internacional de Ciências**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 13-31, 15 dez. 2020. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/ric.2020.50701>.

OLIVEIRA, Alinne Prado de; BARBASSA, Ademir Paceli; GONÇALVES, Luciana Márcia. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM NA REQUALIFICAÇÃO DE ÁREAS VERDES URBANAS EM GUARULHOS SP. **Cidades Verdes**, Guarulhos, v. 4, n. 9, p. 87-101, 2016.

PARK, Minkyu; CHUNG, Gunhui; YOO, Chulsang; KIM, Joong-Hoon. Optimal design of stormwater detention basin using the genetic algorithm. *Ksce Journal Of Civil Engineering*, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 660-666, 29 abr. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-012-0991-0>.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª Edição. EESC USP/Projeto REENGE, São Carlos/SP, 519 p., 2006.

Silva, Arnaldo & Campos, José Nilson & de Carvalho Studart, Ticiane & Pinheiro, Maria. (2005). **IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS DO SISTEMA DE DRENAGEM URBANA: O ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIACHO PAJEÚ, FORTALEZA – CEARÁ**.

SILVA, Francisco Osny Enéas da; PALÁCIO JUNIOR, Francisco Flávio Rocha; CAMPOS, José Nilson Bezerra. Equação de chuvas para Fortaleza CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, Fortaleza, v. 1491, n. 192, p.48-59, 18 dez. 2012. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_192_n_1491.pdf. Acesso em: 18 nov. 2021.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da; GOLDENFUM, Joel Avruch. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 157-168, 02 abr. 2007. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/09/Silveira-e-Goldengum-2007-RBRH-v.12-n.2-2007.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2021.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL (Paraná). **Manual de drenagem urbana da região metropolitana de Curitiba**. Curitiba: SUDERHSA, 2002. Disponível em <https://docplayer.com.br/5073300-Manual-de-drenagem-urbana.html>. Acesso em: 13 dez. 2021.

TOMAZ, Plínio. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. São Paulo, 2012. 349 p.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.; BARROS, M.T. **Drenagem Urbana**. Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, RS, 1995.

VERGUTZ, Laila Atyna Alves; PEREIRA, Carlos Eugênio; SCHMIDT, Marcio Augusto Reolon. Análise da implantação de reservatórios de detenção de forma que sejam minimizados os impactos causados por inundações. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 1267-1277, dez. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019175242>.