



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS DE SAÍDA PARA RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO NO CONTROLE DE CHEIAS URBANAS EM FORTALEZA

* Gustavo Siebra Lopes ¹
Anísio de Sousa Meneses Filho ¹

PERFORMANCE ANALYSIS OF OUTPUT DEVICES FOR DETENTION RESERVOIRS IN URBAN FLOOD CONTROL IN FORTALEZA

Recibido el 24 de agosto de 2021. Aceptado el 10 de enero de 2022

Abstract

Hydrological and hydraulic studies are required to understand the dynamics of floods and to control their impacts, in order to better target effective alternatives, mainly in urban areas that are most often achieved by the harmful effects of excess runoff. In general, these studies are based on the estimate of the maximum flows that are reached in critical points of the hydrographic basin, in order to choose the hydraulic devices that transfer or mitigate their effects. In this perspective, it is necessary to simulate alternatives for inference of performance for the purpose of effective control of floods. This work focuses on evaluating the performance of various combinations of outlet devices, notably orifices and spillways of various sizes, applicable to detention reservoir, a compensatory technique based on the temporary storage of the excess flow, with two basic objectives: to reduce the peak flow rate and to delay peak time. In the development of the work, the empirical IDF (intensity-duration-frequency) relationship of Fortaleza (CE) is used to obtain the project hietograph and SCS model (Soil Conservation Service) is used to elaborate the inflow hydrograph to the reservoir. The Puls method is employed to generate the flow propagation. The methodological process is oriented towards decision in the choice of the device to be adopted in the executive project of the facility. The results show different levels of reservoir performance, according to the selection and dimensioning criteria of the hydraulic elements promoting the effluent hydrograph.

Keywords: detention reservoir, urban drainage, hydraulic devices, Puls method.

¹ Centro de Tecnologia, Universidade de Fortaleza, Brasil.

* *Autor correspondente:* Centro de Tecnologia, Universidade de Fortaleza. Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz - CEP 60811-905 – Fortaleza, Ceará, Brasil. Email: gustavosiebra@gmail.com

Resumo

Estudos hidrológicos e hidráulicos são necessários para o entendimento da dinâmica das inundações e o controle dos seus impactos, para melhor balizamento de alternativas eficazes, notadamente em áreas urbanas que mais frequentemente são alcançadas pelos efeitos danosos do excesso de escoamento superficial. Esses estudos baseiam-se, em geral, na estimativa das vazões máximas que são atingidas em pontos críticos da bacia hidrográfica, para que sejam definidos os dispositivos hidráulicos que transfiram ou atenuem seus efeitos. Nessa perspectiva, impõe-se a simulação das alternativas para a inferência de desempenho no propósito do controle efetivo das cheias. Este trabalho tem como foco avaliar o desempenho de diversas combinações de dispositivos de saída, notadamente orifícios e vertedouro de vários tamanhos, em reservatório de detenção, uma técnica compensatória pautada no armazenamento temporário do excedente de vazão, assumindo dois objetivos básicos precípuos: reduzir o pico de vazão e retardar o tempo de pico. No desenvolvimento do trabalho, utilizam-se a relação empírica IDF (intensidade-duração-frequência) de Fortaleza (CE) para a obtenção do hietograma de projeto, o modelo SCS (Soil Conservation Service) para a confecção do hidrograma afluente ao reservatório, e o método de Puls para a propagação de vazões. O processo metodológico desenvolvido se orienta para a tomada de decisão na escolha do dispositivo a ser adotado no projeto executivo do empreendimento. Os resultados evidenciam diferentes níveis de desempenho do reservatório, conforme sejam os critérios de seleção e dimensionamento dos elementos hidráulicos promotores do hidrograma efluente.

Palavras chave: reservatório de detenção, drenagem urbana, dispositivos hidráulicos, método de Puls.

Introdução

As inundações urbanas constituem uma grande preocupação e um enorme desafio para os planejadores urbanos e gestores públicos, já que podem causar trágicas perdas humanas e gerar grandes prejuízos econômicos, demandando, muitas vezes, ações emergenciais para apoiar a recuperação das estruturas devastadas pela força da água. Para reduzir o impacto das cheias em áreas urbanas, podem ser empregadas medidas compensatórias tornando pico de vazão mais próximo do que era antes da ocupação. Dessa maneira, alivia-se o sistema de microdrenagem urbana, mitigando os transtornos associados ao acúmulo de água no solo edificado e no sistema viário.

Nesse contexto, tornam-se importantes os estudos que possibilitem o entendimento da dinâmica das inundações e que permitam avanços na prevenção e no controle dos impactos causados por esse fenômeno. As medidas de proteção e controle de enchentes baseiam-se em geral no equilíbrio entre o custo das medidas mitigadoras e a redução dos prejuízos causados pelas enchentes. Várias soluções técnicas vêm sendo empregadas para o controle de cheias urbanas, sendo que as medidas ditas estruturais incluem reservatórios ou bacias de detenção, retificação e canalização de rios, construção de diques e *polders*. Outra abordagem para o controle de cheias urbanas consiste nas chamadas soluções não estruturais como o zoneamento urbano, a convivência com cheias, sistemas de alerta, construções mais apropriadas.

Com efeito, não há uma estratégia única, exclusiva ou definitiva para a gestão das cheias urbanas, mas ações integradas e complementares, com maior ou menor compatibilidade para cada situação específica, levando-se em conta os parâmetros de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Além da questão quantitativa, também os aspectos de qualidade devem assumir relevância nesse contexto. O ideal é buscar conciliar a coleta e tratamento do esgotamento sanitário somado a retenção e tratamento do escoamento pluvial dentro de uma visão sistêmica, em que se atendam as restrições de área, de custo, de operação e manutenção dos equipamentos de controle, de tal forma que essa amplitude de aspectos esteja satisfatoriamente contemplados.

O trabalho ora apresentado se refere a um ponto crítico de alagamento na cidade de Fortaleza (CE), na avenida Alberto Craveiro próximo a BR 116, no bairro Castelão. Esse local costuma concentrar transtornos para a população que ali transita em dias chuvosos. Propõe-se um estudo de caso comparativo dos diferentes dispositivos de controle de vazão, necessários para dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais, baseado na propagação da onda de cheias pelo método Puls. Nessa perspectiva de análise do desempenho do reservatório de retenção, entende-se como chuva crítica aquela cuja combinação da sua intensidade e duração gera o máximo volume de retenção, dada a vazão efluente e o tempo de recorrência do evento.

Estão sendo cotejadas combinações de dispositivos de controle da vazão de saída para reservatórios de retenção de cheias, estruturas destinadas ao armazenamento temporário dos volumes de água das chuvas para devolvê-los mais tarde à rede de micro ou macrodrenagem, retardando e atenuando o pico de vazão, ou seja, disciplinando melhor a gestão das enchentes a partir da compatibilização das vazões à capacidade hidráulica do sistema de drenagem. Considerando a reconfiguração dos hidrogramas afluente e efluente do reservatório, avalia-se o desempenho dos dispositivos hidráulicos para a melhor definição do projeto executivo.

Metodologia

Esta seção apresenta as bases teóricas sobre técnicas compensatórias, reservatórios de retenção e modelagem hidrológica para simulação hidráulica aplicada ao estudo de caso.

Técnicas compensatórias

As técnicas compensatórias (TCs) consistem em combinações de soluções estruturais e as não estruturais, para facilitar a infiltração de águas pluviais e o aumento da permanência do armazenamento da água, reduzindo a vazão de pico e escoamentos superficiais.

As medidas estruturais não são projetadas para dar uma proteção completa, pois para isso teríamos que calcular a maior enchente possível além de ser fisicamente e economicamente inviável, utiliza-se um meio termo, associado a um razoável tempo de retorno e seja

economicamente compatível, sem, é claro, deixar a segurança de lado. Podem-se destacar as seguintes TCs estruturais: bacias de detenção, planos de infiltração, pavimentos porosos, poços, trincheiras, valas gramadas, valetas.

As TCs não estruturais dependem mais do governo e da conscientização da população e portanto demandam campanhas de educação. São procedimentos que retardam os escoamentos (zoneamento, regulamentação do uso do solo, áreas verdes, controle de ligações clandestinas, controle da coleta e disposição do lixo e previsão em tempo real) para tentar solucionar as enchentes.

Verifica-se, em exemplos apresentados por Baptista *et al.* (2005), que, apesar das TCs ter objetivo principal a contenção das águas de chuva, é essencial que esses dispositivos se integrem ao espaço urbano. Assim, as boas práticas de manejo de águas pluviais devem ser abordadas de maneira multidisciplinar, com a participação de diversos profissionais, bem como contar com o envolvimento da população local para aceitação e uso adequado das estruturas alternativas de drenagem. Mesclar as medidas é a melhor solução, pois não basta somente executar obras se a população não cuida desta. Abordam-se medidas estruturais neste trabalho, mais especificamente as bacias de detenção.

Reservatório de detenção

De acordo com Tucci *et al.* (1995), os reservatórios de detenção visam armazenar as águas pluviais e despejá-las na rede de forma lenta e gradual, oferecendo uma alternativa às enchentes. Desse modo, os reservatórios são estruturas que trabalham em conjunto com as redes de drenagem. Assim, quando da implantação do reservatório, a vazão máxima da área após o desenvolvimento urbano deve ser menor ou igual à vazão máxima preexistente para um tempo de retorno escolhido.

Os reservatórios contribuem para a captação de sedimentos, melhorando a qualidade da água. O lixo fica retido em um único local e de fácil retirada em vez de serem carregados pelas correntezas nas ruas. Devido ao elevado valor do solo urbano, estas estruturas podem ter usos complementares como áreas de lazer, quadras e parques. Além disso, oferecem um bom efeito paisagístico e ecológico, promovendo áreas verdes e de integração social e podem ser utilizados para armazenamento de volume para reserva de incêndio e irrigação em lotes. Contribuem também para a redução dos custos das canalizações a jusante, pois o custo de implementação de um reservatório é bem menor se comparado a ampliação da rede. Promovem a recarga dos aquíferos, pois com o maior escoamento superficial promovido pelo homem a água deixa de infiltrar, mas os reservatórios permitem esse escoamento subterrâneo. Devido à falta de água em vários estados brasileiros inclusive São Paulo, as águas das bacias também podem ser reaproveitadas ao invés de simplesmente despejadas na rede pública.

Apesar dos aspectos positivos aqui mencionados, importa esclarecer que, caso não seja prestada a manutenção sistemática, esses reservatórios tendem a ser utilizados como locais de armazenamento de lixo, ampliando o risco de proliferação de insetos e doenças ao seu redor. Em áreas densamente povoadas, faz-se necessário a desapropriação de terrenos para a construção, o que muitas vezes ocasiona conflitos entre a população atingida e o Poder Público.

As bacias abertas ou a céu aberto podem ser de detenção ou retenção, . Bacias de detenção também podem ser com necessidade de berma e sem necessidade de berma. Esse reservatório fica totalmente sem água quando fora do período chuvoso, podendo, então, servir a múltiplos propósitos. Pode ser aproveitado, por exemplo, como quadra esportiva no período de esteio, em que se chover as pessoas normalmente não a utilizam, porém esta será utilizada como reservatório. Sua principal necessidade é a manutenção para a retirada dos dejetos, pois dificultam a sua operação. Em regiões industriais próximas a sistemas viários onde existe muita poluição vinda do tráfego, e provável presença de metais pesados, faz-se necessário a implantação de dispositivos de tratamento implantados junto à bacia.

Quando a água entra diretamente no reservatório sem necessidade de uma área de amortecimento esse sistema chama-se em série *in-line*. Do outro modo, quando a água é transferida para uma área de amortecimento após atingir certa vazão, ou seja, um outro compartimento, esse sistema é dito paralelo *off-line*. Desse modo, eles não são utilizados em todos os eventos, apenas quando a vazão é ultrapassada. A vantagem da estrutura *off-line* está na facilidade de manutenção, pois a área de amortecimento recebe a porção mais suja da água e deve ser executada com fundo revestido para facilitar a limpeza; já a segunda câmara pode ser executada com materiais mais baratos, como grama. Assim, podem ser aproveitados os aspectos paisagísticos e de integração com a sociedade. Por exemplo, a área de amortecimento pode ser uma pista de skate e o reservatório, um campo de futebol gramado (Neves *et al.*, 2005).

Os reservatórios em paralelo são escavados lateralmente ao sistema de drenagem ou talvegue. Devem ser utilizadas estruturas hidráulicas de controle para contribuir com o fluxo entre as bacias e os cursos d'água. Nem todo o escoamento de montante flui para a bacia. Em regiões densamente ocupadas são mais populares. Já as em série, são utilizados barramentos no próprio talvegue do sistema de drenagem. Todo o escoamento afluente passa pela bacia. A utilização de uma ou de outra depende muito do meio em que ela será inserida, do espaço reservado para tal e do tipo de solo.

Parâmetro da precipitação

As precipitações intensas de interesse no dimensionamento das estruturas hidráulicas são modeladas a partir da relação local IDF (intensidade-duração-frequência), em que se estabelecem

a magnitude do risco assumido e a duração do evento compatível com as características da bacia contribuinte.

Tempo de retorno (TR) é o tempo médio entre dois eventos que cause falha na obra, ou seja, a ocorrência de uma chuva ou vazão superior aquela pré-estabelecida ou em consonância com as condições naturais de drenagem. Tipicamente, a sua escolha está associada a estudos de base econômica considerando custos e benefícios da obra durante toda a sua vida útil, porém esses aspectos são muito limitados já que existem impactos de difícil mensuração. Observe-se que quanto maior o tempo de retorno, maior o porte da obra, conseqüentemente o seu custo. Esse parâmetro se relaciona com o risco hidrológicos pela seguinte expressão, na análise binomial:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^N \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

R: risco em anos;

Tr: tempo de retorno em anos;

N: número de anos.

Método dos blocos alternados

Consoante Tomaz (2010), o método dos blocos alternados é de simples aplicação, se comparado a outros métodos de determinação da chuva de projeto. Neste procedimento, as intensidades médias são definidas para cada duração até a duração total usando as equações IDF.

O primeiro passo do método é calcular, as intensidades da chuva para cada período de tempo e tempo de retorno, cada duração gera um bloco, que pode determinar a altura da lâmina precipitada e o limite da duração crítica do evento (que é normalmente o tempo de concentração da área contribuinte). O segundo passo, que dá o nome ao método, reordena o hietograma de forma a posicionar o pico de forma centralizada. Cada bloco de chuva do hietograma é alternado no entorno do bloco do pico, à direita e à esquerda. É aconselhado que o Δt adotado seja menor que o tempo de concentração da bacia que está sendo estudada.

Modelo Soil Conservation Service (SCS)

Na separação dos volumes de precipitação, adotou-se o modelo SCS (desenvolvido pelo NRCS - Natural Resources Conservation Service), cujo parâmetro CN (*curve number*), numa escala de 1 a 100, traduz o potencial de se converter chuva em vazão. Quanto maior o CN, maior a parcela de precipitação excedente e menor a parcela de infiltração. A escolha desse modelo se justifica pelo seu caráter parcimonioso, de fácil calibração. Segundo USDA (1986), o tempo de concentração da bacia é um parâmetro crítico do modelo SCS. Esse parâmetro influencia na forma e no pico do hidrograma de escoamento. Para Silveira (2005), o tempo de concentração é um parâmetro

hidrológico difícil de ser estabelecido com critério pelos projetistas, pois há pouca informação sobre a aplicabilidade das diversas fórmulas empíricas disponíveis.

Usando o hidrograma unitário adimensional exibido na Figura 1, o hidrograma resultante pode ser construído para qualquer distribuição de chuva, dividindo em número de elementos da precipitação efetiva unitária e desenhando o hidrograma unitário para cada um. O hidrograma resultante seria então a soma de todos os hidrogramas unitários. O NRCS desenvolveu uma base de dados de hidrogramas unitários a partir de parâmetros que descrevem as características das bacias hidrográficas, bem como os padrões de precipitação para locais geográficos específicos.

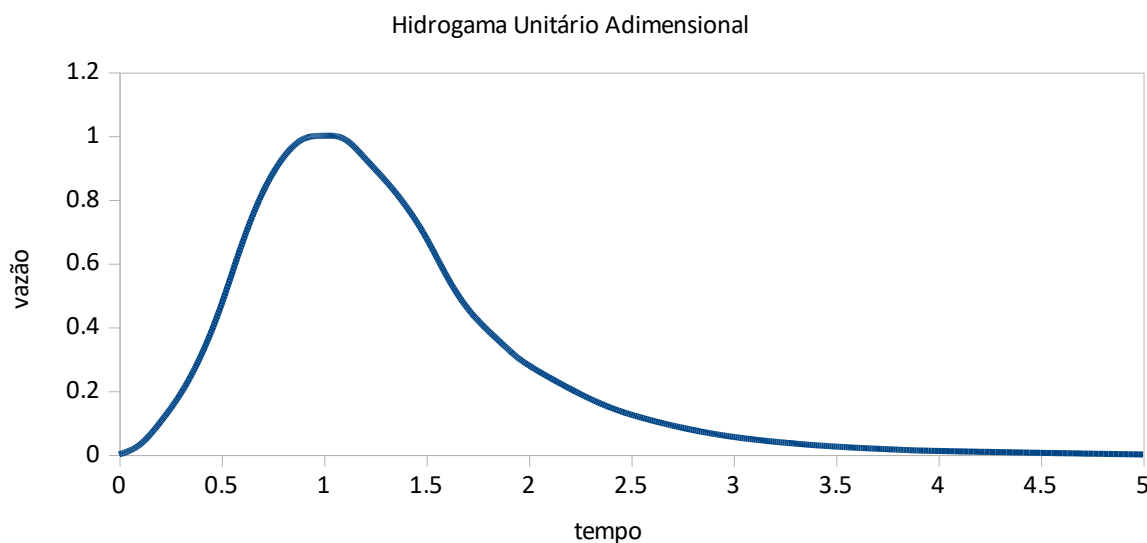


Figura 1. Hidrograma unitário adimensional.

Dispositivos hidráulicos

Existem dois tipos básicos de estrutura de controle, orifício e vertedouro. Algumas estruturas mais sofisticadas utilizam uma combinação de ambas, mas nesse caso o comportamento hidráulico pode ser decomposto nesses dois dispositivos, observando-se as respectivas faixas de operação.

O orifício é uma abertura na parede de um recipiente ou reservatório, através da qual a água pode escoar. Em geral, assume-se que a parede é fina e que as bordas da abertura são retas, as principais variações do coeficiente de descarga do orifício são devidas à geometria do orifício (forma e localização), às condições de aproximação e ao valor da carga hidráulica (GRIBBIN, 2009).

Quando a estrutura de descarga apresenta controle de orifício, sob a ação de uma carga hidráulica de montante, a vazão é dada por:

$$Q = C_d A \sqrt{(2gH)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

Q: vazão, em m³/s;

C_d:: coeficiente de descarga do orifício, adimensional;

A: área do orifício, em m²;

h: carga total, em m.

Os vertedores são estruturas que, operando sempre com superfície livre, exercem controle de soleira, devendo ser galgadas pelo fluxo. A vazão nesse caso depende da carga hidráulica, que no caso de vertedores retangulares é relacionado à vazão de acordo com a fórmula:

$$Q = CLH^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

Q: vazão, em m³/s;

C: coeficiente de descarga do vertedor, m^{1/2}. s⁻¹;

L: largura efetiva do vertedor, em m;

H: carga sobre a crista, em m.

O coeficiente de descarga apresenta variações em função da forma da soleira, do tipo de aproximação e da variação da carga hidráulica.

Método de Puls

Quando se analisa o problema do abatimento de hidrogramas em reservatórios, depara-se com um problema de escoamento não permanente. O escoamento é caracterizado por uma grande profundidade e, conseqüentemente, baixa velocidade, de modo que os termos dinâmicos da equação dinâmica do escoamento são desprezíveis (Tucci, 2012).

A forma amplamente difundida na bibliografia deve-se ao trabalho de Puls (1928), divulgado posteriormente de forma mais ampla como método de Puls modificado (Butler, 1957).

A água que entra no reservatório ao longo do tempo se refere a vazão afluente e fica temporariamente armazenada para sair pela tubulação, para então ser chamada de vazão efluente. Esta deve ser menor que aquela como decorrência do armazenamento. Essa redução de vazão é chamada de atenuação ou laminação. E o procedimento para calcular seu valor é chamado de propagação.

O Modelo de Puls caracteriza-se por supor que existe uma relação entre o volume armazenado e a vazão efluente, sendo esta, portanto, independente da vazão afluenta. Isso equivale a assumir que a superfície do reservatório se mantenha plana e horizontal, o que é em muitos casos apenas uma aproximação dada a existência do remanso.

Para determinar a propagação dos cursos d'água em reservatórios, ou seja, bacias de detenção, o Método de Puls é amplamente utilizado. Ele consiste na equação da continuidade, que é um balanço da água que entra e da água que sai. Que consiste na discretização do tempo, ou seja, passa-se de uma equação infinita (derivada) para finita (intervalo de tempo Δt), podendo ocorrer erros nos resultados devido a esse fato. Quanto maior a discretização de tempo maior as chances de ocorrer um erro. Nos exemplos utilizados é necessário que a vazão de pico seja um ponto na tabela de propagação, para isso temos que discretizar o tempo de uma forma coerente.

Estudo de Caso

Nesta seção apresenta-se a aplicação metodológica, os critérios utilizados para o dimensionamento dos reservatórios, os métodos e equações utilizados para chuva de projeto e o amortecimento das cheias, analisando o desempenho da laminação e retardo de tempo dos dispositivos de saída.

Localização do reservatório

A simulação operacional do reservatório de detenção foi aplicada na avenida Alberto Craveiro, no bairro Castelão, em Fortaleza (CE), considerando-se as condições de local do estudo é bastante afetado por precipitações intensas, sobretudo suscetível aos volumes estagnados de chuvas. À guisa de exemplo, no dia 19/02/2019, a cidade foi atingida severamente por uma chuva de 105 mm, provocando alagamentos, tornando impraticável o trânsito em várias vias e prejudicando até mesmo o comércio local (Diário do Nordeste, 2019).

A pesquisa consiste em estabelecer o melhor critério de dimensionamento para o adequado funcionamento do reservatório de detenção, conforme os dispositivos de saída, a localização escolhida é um ponto crítico de inundação nas proximidades da BR 116 (Figura 2) onde a bacia de contribuição do Rio Cocó está localizada.

A área disponível para implantação do reservatório será em terreno desocupado com aproximadamente 9.4 hectares de área, que quando não tiver funcionando como reservatório o intuito é de que possa ser usado como quadra poliesportiva com arquibancadas (Figura 3), nesse link <https://youtu.be/Cw6w8wIngww> é possível ver a maquete eletrônica do projeto.

A integração do reservatório como equipamento de lazer gera uma multifuncionalidade. Como a cidade de Fortaleza passa por esteio de chuvas em boa parte do ano, a estrutura de manejo das águas pluviais quando não utilizada será útil como área de lazer, podendo receber jogos de diversas modalidades e um local propício para atividade física ao ar livre, com o compromisso da comunidade de conservação do dispositivo estrutural.



Figura 2. Localização do reservatório. Fonte: Google Earth Pro (imagem de 26 agosto 2013)



Figura 3. Projeto urbanístico com reservatório.

Critérios de dimensionamento

Para realização do estudo foi concebido um reservatório com revestimento em concreto e capacidade para 6000 metros cúbicos, com dispositivos de controle variando a quantidade de orifícios com diâmetro de 30, 40 e 60 centímetros com vertedouro retangular de soleira 2.5 e 5 metros. Foram simulados vazões de entrada para diversos Tr, CN, duração da chuva e área de contribuição da bacia de 40 hectares.

Para a vazão de projeto utiliza-se a equação de chuvas de Fortaleza que foi desenvolvida na Universidade Federal do Ceará (UFC), em 2011, com base nos últimos trinta anos de registros pluviográficos contínuos, ou seja, de 1970 a 1999 para obter a intensidade de chuva (Silva *et al.*, 2013). Deve-se considerar uma precipitação uniformemente distribuída (Equação 4).

$$i = \frac{2345.29Tr^{0.173}}{(t+28.31)^{0.904}}$$

Equação (4)

Onde:

i: é a intensidade média de chuva mm/h para uma duração em minutos;

Tr: é o período de retorno da precipitação em anos;

t: é o tempo de duração da chuva em minutos.

O período de retorno (Tr), a duração da chuva (t) e a intensidade de chuva (i) estabelecem uma relação conhecida como curva IDF, representada por uma curva exponencial ou hiperbólica. É recomendado que cada cidade possua a sua, pois elas ajudam na determinação da vazão de projeto em obras.

A Figura 4 mostra a relação da precipitação total e a parcela de precipitação efetiva (que se transforma em escoamento superficial direto), correspondente a uma chuva intensa em Fortaleza com tempo de duração de 60 minutos, tempo de retorno de 50 anos e CN da bacia contribuinte de 80.

Para obter o hidrograma de projeto deve-se associar a parcela de cada bloco que escoar a uma determinada precipitação efetiva unitária, fixando o tempo de duração, achar o hidrograma unitário dimensional, para então descobrir a vazão e o hidrograma do bloco. Aplicando os princípios da proporcionalidade e da superposição é possível calcular os hidrogramas resultantes de eventos complexos, a partir do hidrograma. Este cálculo é feito através da convolução das ordenadas de cada bloco. O hidrograma é, normalmente, definido como uma função em intervalos de tempo discretos. Na Figura 5, o tempo de concentração foi determinado pela fórmula de Schaake (Equação 5), aplicável para bacias urbanas menores que 0.7 km², adotando a área da bacia 40 ha, área impermeável de 0.5 e declividade de 1% para uma chuva com tempo de duração de 60 minutos.

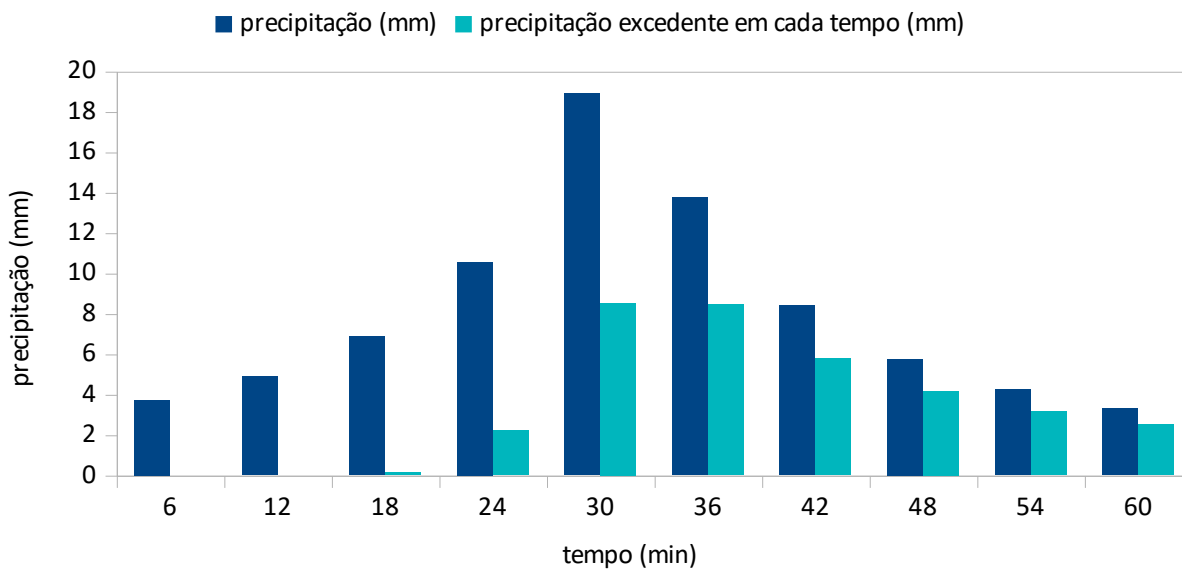


Figura 4. Precipitação total x Precipitação excedente.

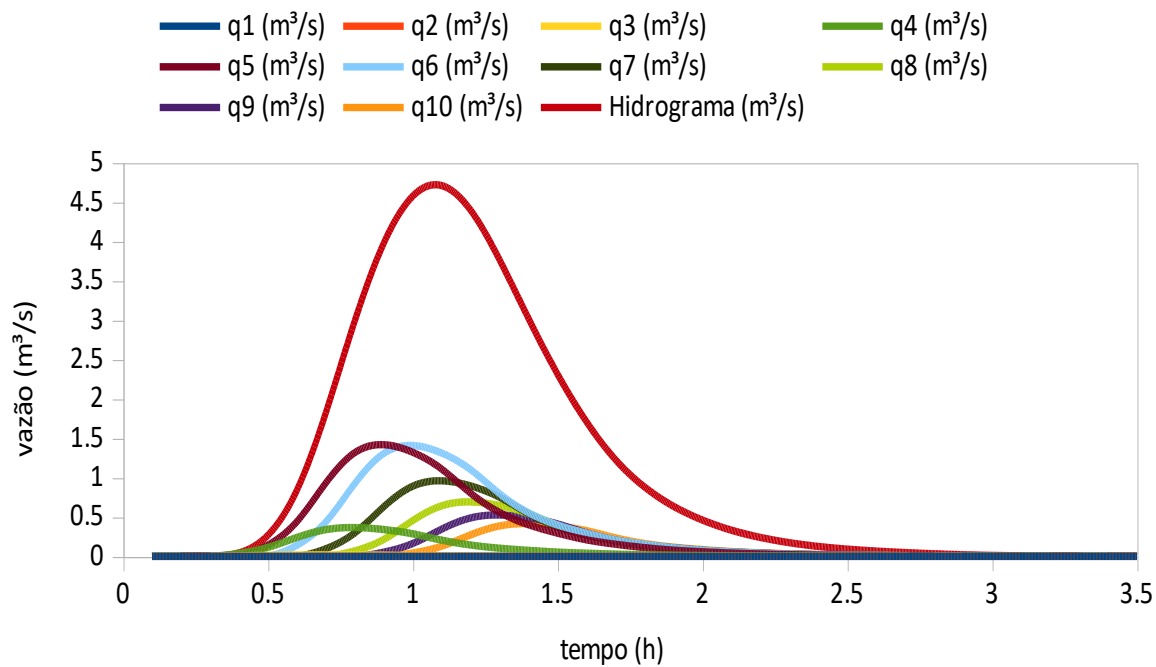


Figura 5. Hidrograma de projeto.

$$T_c = 0.0828(L^{0.24})(S^{-0.16})(A_{imp}^{-0.26})$$

Equação (5)

Onde:

T_c :: tempo de concentração em horas;

L: largura da bacia em km;

S: declividade dado em m/m;

A_{imp} :: área impermeável varia de 0 a 1.

Aplicação do modelo

Para aplicação do modelo foi dimensionado um reservatório para suportar o dobro da sua capacidade de volume que é aproximadamente 6000 m³, área total construída de 5157.12 m², altura da arquibancada de 2.70 m, com degraus de 80x45cm, cota da soleira do vertedouro de 1.50 m, largura da soleira de 5 m, para quatro orifícios de 30 cm de diâmetro (Figuras 6 e 7).

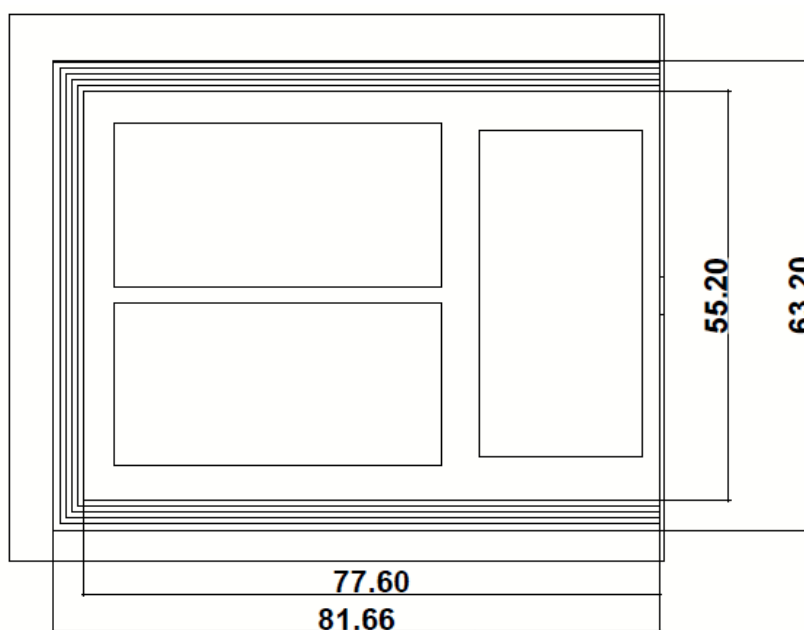


Figura 6. Planta baixa do reservatório

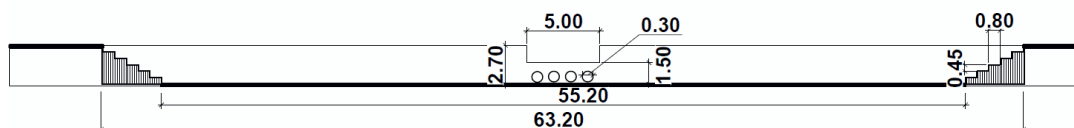


Figura 7. Corte do reservatório.

O diâmetro do orifício é algo que deve ser levado em consideração. É necessária a colocação de grelha para cobrir o tubo, como vivemos numa sociedade em que o vandalismo predomina, tubos com diâmetros muito grande podem representar perigo para os transeuntes, pois se arrancadas as grelhas, ficam buracos enormes nos quais uma criança pode cair durante uma chuva com uma lâmina d'água.

Segundo Gribbin (2009), o coeficiente de descarga, C_d , é uma constante de proporcionalidade adimensional, responsável pela redução do fluxo em razão da perda de carga na entrada. O valor experimental de C_d para orifícios de borda reta varia de acordo com o tamanho, a forma e a quantidade de carga. No entanto, para a maioria das aplicações, resultados confiáveis podem ser obtidos com o uso de $C_d = 0.62$.

Com os dados de dimensionamento do reservatório, foi gerado a Figura 8 para relacionar a cota, vazão e volume, o cálculo da vazão está diretamente ligado a diferença de cota, sendo que, até a cota da soleira do vertedouro (1.50 m) o orifício atua sozinho, quando a capacidade máxima do reservatório é atingida passa a atuar em conjunto, orifício e vertedouro, extravasando o excesso para garantir a integridade do reservatório para não ocorrer transbordamento, sendo importante essa análise ao dimensionar o volume de projeto.

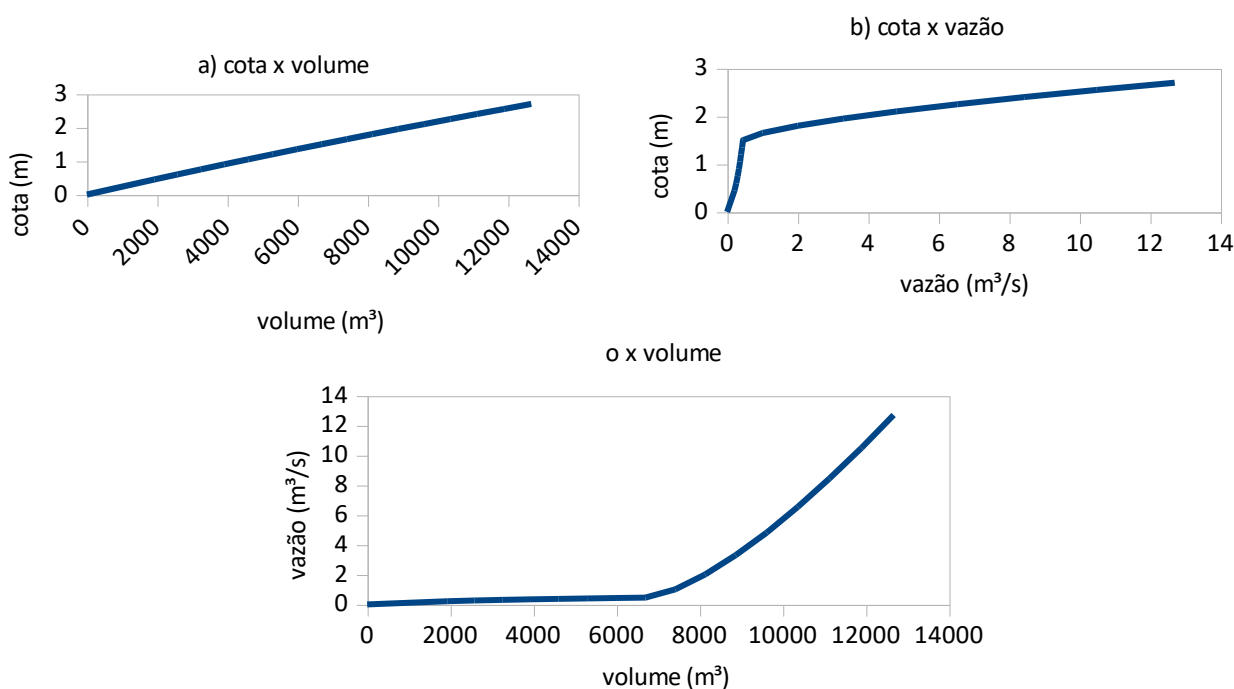


Figura 8. Gráficos da propagação no reservatório.

Utilizando os parâmetros do reservatório de vazão de saída (O), volume (S) e intervalo de tempo (Δt) pode ser determinado a vazão amortecida em relação ao tempo, para isso, deve-se utilizar as equações $(2S/\Delta t)+O$ e $(2S/\Delta t)-O$ para cada vazão de saída em relação a cota do reservatório (Fig. 9). Com o hidrograma de projeto em intervalos discretos de tempo, é possível interpolar os valores das vazões para achar o hidrograma amortecido pelo reservatório

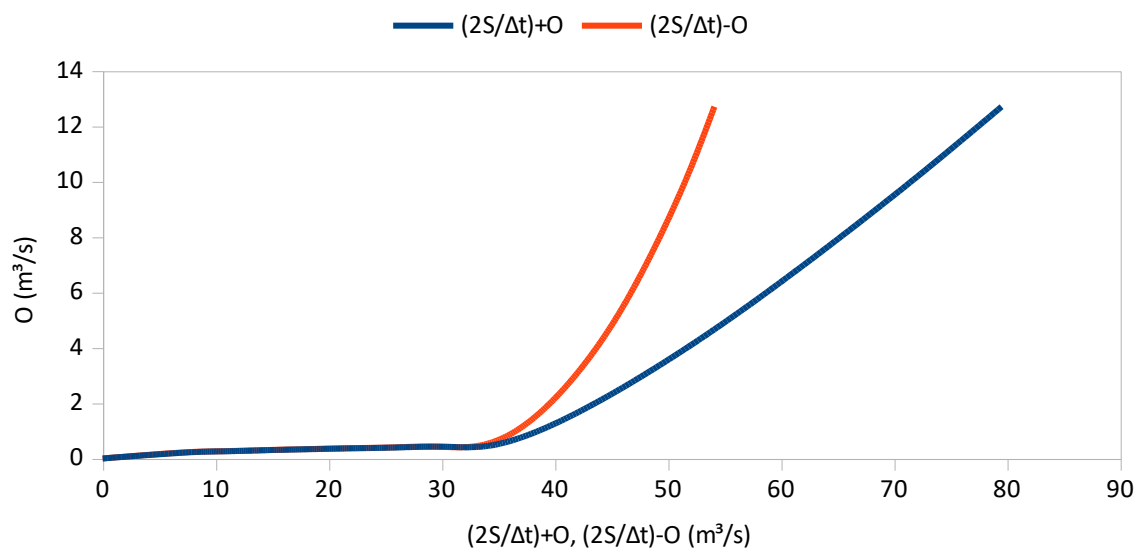


Figura 9. Parâmetros do reservatório de detenção.

No balanço hídrico do reservatório, num dado instante, a parcela de água armazenada pode ser obtida pela diferença entre o volume que entrou e o volume que saiu. Por outro lado, a maior taxa de armazenamento ocorre quando é máxima a distância entre os valores de ordenadas dos hidrogramas, podendo acontecer antes do pico de vazão afluente.

Na Figura 10 a vazão efluente máxima ocorre no ponto onde o hidrograma de saída cruza o hidrograma de entrada, o que constitui uma característica da propagação em reservatório. No hidrograma de saída o aumento da vazão acontece devido a utilização do vertedouro no tempo aproximado de 66 minutos, nesse instante, o reservatório atinge a capacidade máxima de volume ($6000m^3$).

Percebe-se também que a vazão efluente máxima de $2.90 m^3/s$ corresponde a uma elevação máxima de reservatório de aproximadamente $1.75 m$ (Figura 8b), que pode ser determinado

interpolando a taxa de descarga em relação a cota. Essa elevação se tornaria então o nível de água de projeto na bacia de detenção, passando 25 cm da cota da soleira, percebendo assim que está bem dimensionado e não ocorrerá transbordamento.

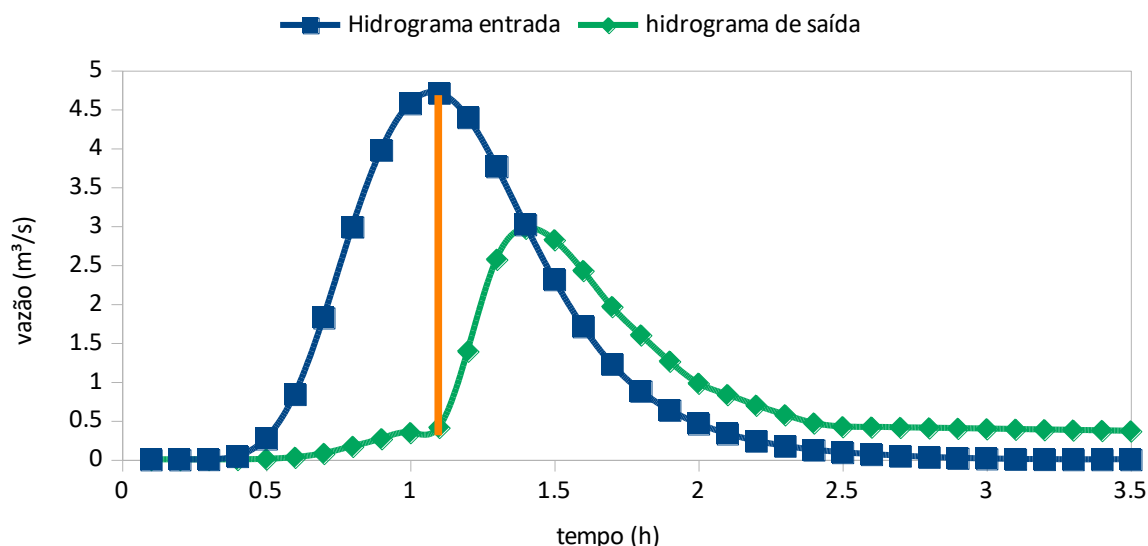


Figura 10. Hidrograma amortecido.

Finalmente, observe que a propagação resultou em uma redução da vazão efluente máxima de 4.71 m³/s (entrada) para 2.90 m³/s (saída). Isso é uma atenuação de 38.32%, obtida pela equação 6. O retardo no tempo é de aproximadamente 18 minutos.

$$\frac{\Delta Q}{Q_{af}} = \left(\frac{Q_{paf} - Q_{pef}}{Q_{paf}} \right) \times 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

$\frac{\Delta Q}{Q_{af}}$: diferença de laminação;

Q_{paf} : Vazão de pico afluente m³/s;

Q_{pef} : Vazão de pico efluente m³/s .

Resultados

Esta seção apresenta os resultados das simulações para o amortecimento de cheia no reservatório de detenção com diferentes configurações de orifício e vertedouro, variando quantidade e tamanho.

Amortecimento de cheias

Para a simulação da propagação foi adotado que os reservatórios possuem a metade da capacidade do volume de projeto, sendo utilizado o reservatório com capacidade de 6000 m³, então, foi adotado para o hietograma o período de retorno de 50 anos, duração de chuva de 60 minutos com passo de 6 minutos. Para determinar o volume de projeto foi realizado o cálculo da precipitação efetiva pela área da bacia contribuinte de cada hietograma, com parâmetro CN de 80 e área da bacia 40 hectares, gerando o volume de 13959 m³.

Durante as simulações foram constatadas algumas perturbações geradas no início e fim do escoamento (Figura 11), isso ocorre na transição entre canal e orifício, o canal para funcionar como orifício precisa estar afogado, por isso acontece essa variação na vazão. Para falha não ocorrer, é necessário calibrar os parâmetros do número de Manning e do coeficiente de descarga, a solução adotada foi considerar o orifício submerso.

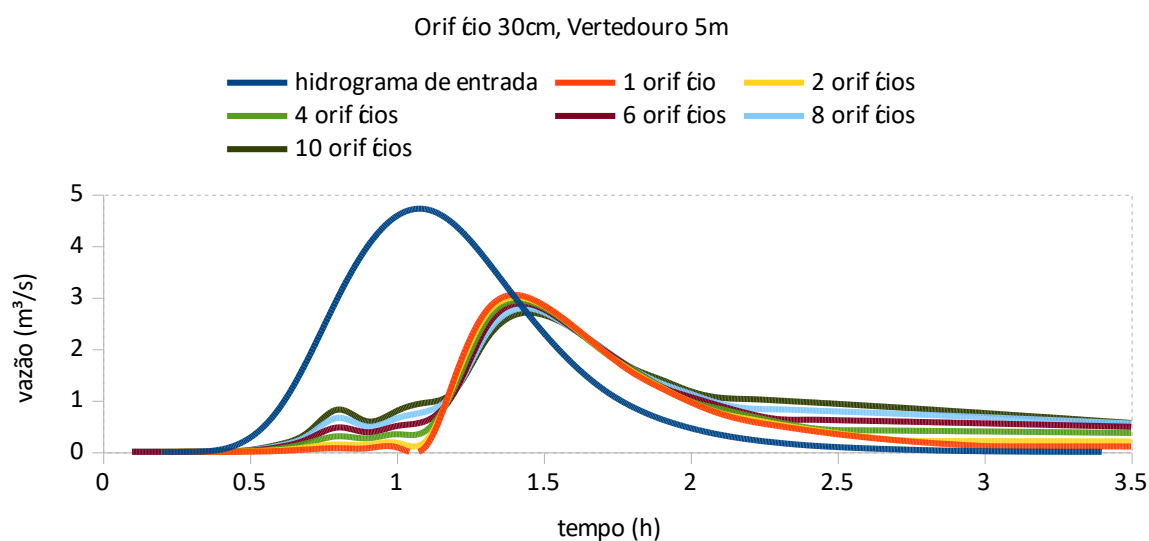


Figura 11. Reservatório de 6000 m³ com perturbação.

Foi adotado orifícios circulares e vertedouro retangular, a quantidade de orifícios varia de 1 a 10 com diâmetros de 30, 40 e 60 centímetros, para o vertedouro foram utilizados dois comprimentos de soleira, 2.5 m e 5 m. A eficiência dos dispositivos de saída será analisada pela laminação e o retardo de tempo em cada configuração do reservatório.

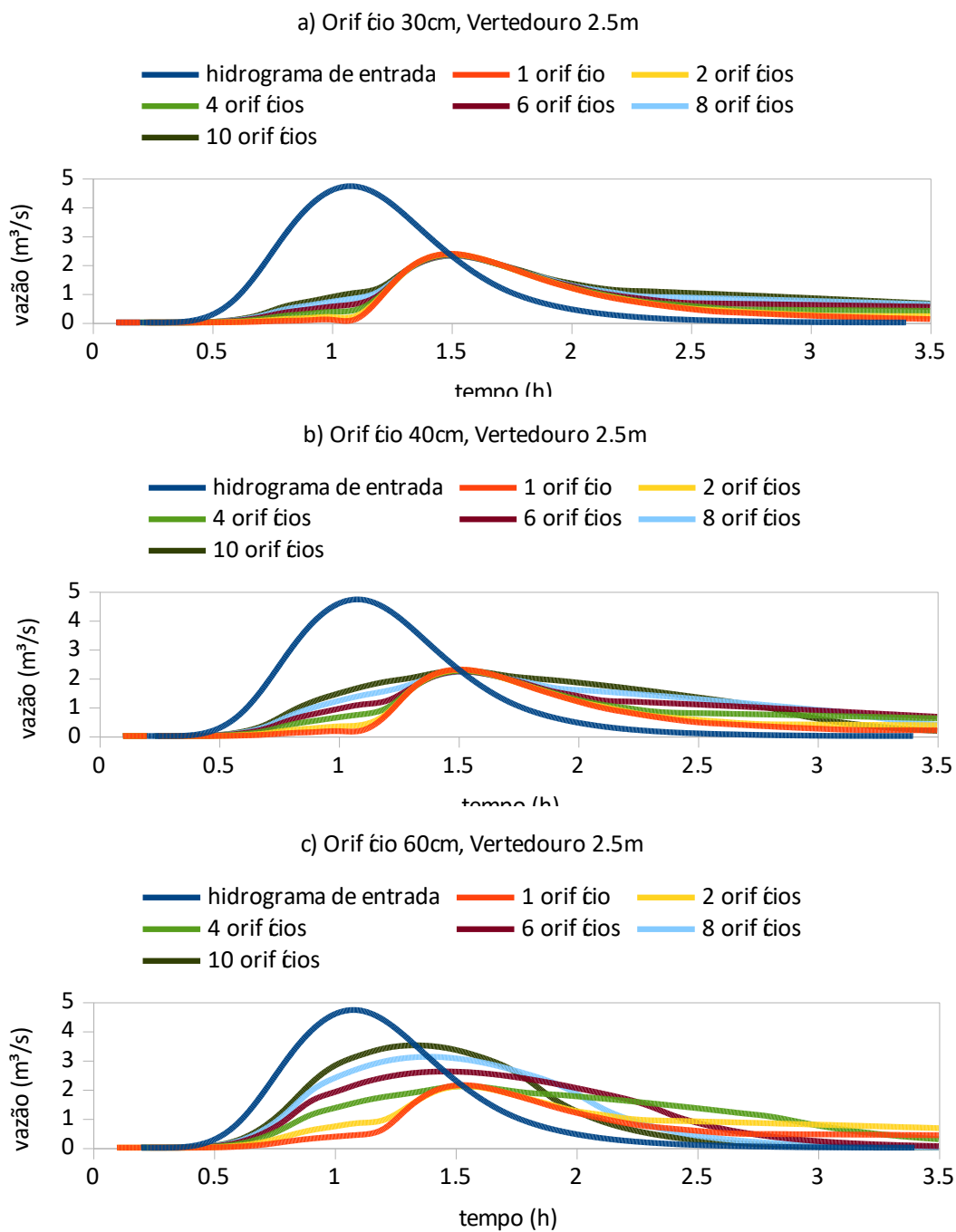


Figura 12. Método de Puls para soleira de 2.5 m.

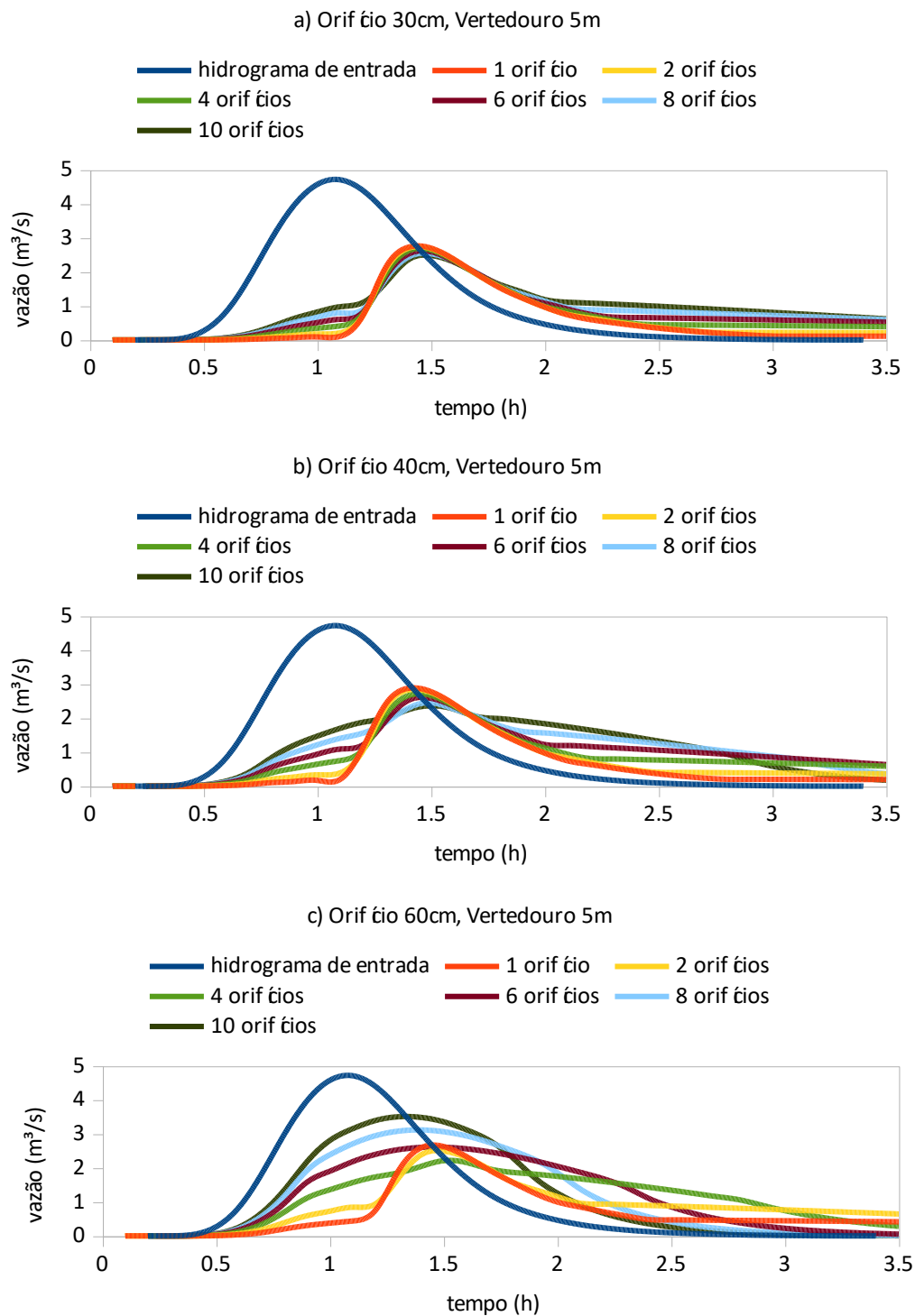


Figura 13. Método de Puls para soleira de 5 m.

Analisando a tabela 1, a maior laminação para o diâmetro de 30 cm é de 50.93 % para 10 orifícios, no segundo caso, para 40 cm o melhor rendimento foi de 52.93% com 8 orifícios e no terceiro caso, para 60 cm, foi de 55.51% para 2 orifícios. O melhor tempo de retardo de 18 minutos foi igual para os melhores rendimentos de laminação, com tempo de duração da chuva de 60 minutos. Nota-se que aumentando o diâmetro do orifício o reservatório fica super dimensionado, não utilizando sua capacidade máxima, sem fazer uso do vertedouro (Figura 12 e 13).

Tabela 1. Resultados para soleira de 2.5 m.

| | Orifício 30cm | | | Orifício 40cm | | | Orifício 60cm | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|---------------|-----------|
| | Vazão de Pico (m ³ /s) | Laminação (%) | tempo (h) | Vazão de Pico (m ³ /s) | Laminação (%) | tempo (h) | Vazão de Pico (m ³ /s) | Laminação (%) | tempo (h) |
| hidrograma de entrada | 4.71 | - | 1.10 | 4.71 | - | 1.10 | 4.71 | - | 1.10 |
| 1 orifício | 2.38 | 49.46 | 1.50 | 2.30 | 51.21 | 1.50 | 2.13 | 54.71 | 1.50 |
| 2 orifícios | 2.36 | 49.77 | 1.50 | 2.29 | 51.45 | 1.50 | 2.09 | 55.51 | 1.50 |
| 4 orifícios | 2.35 | 50.04 | 1.50 | 2.25 | 52.24 | 1.50 | 2.10 | 55.43 | 1.50 |
| 6 orifícios | 2.34 | 50.34 | 1.50 | 2.23 | 52.63 | 1.50 | 2.61 | 44.66 | 1.50 |
| 8 orifícios | 2.32 | 50.77 | 1.50 | 2.22 | 52.93 | 1.50 | 3.11 | 33.85 | 1.40 |
| 10 orifícios | 2.31 | 50.93 | 1.50 | 2.25 | 52.13 | 1.50 | 3.50 | 25.64 | 1.30 |

Na tabela 2, foram encontrados resultados inferiores de rendimento nas três configurações de orifícios e tempo de retardo para o orifício de 30 cm sendo de 1.40 horas.

Tabela 2. Resultados para soleira de 5 m.

| | Orifício 30cm | | | Orifício 40cm | | | Orifício 60cm | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|---------------|-----------|
| | Vazão de Pico (m ³ /s) | Laminação (%) | tempo (h) | Vazão de Pico (m ³ /s) | Laminação (%) | tempo (h) | Vazão de Pico (m ³ /s) | Laminação (%) | tempo (h) |
| hidrograma de entrada | 4.71 | - | 1.10 | 4.71 | - | 1.10 | 4.71 | - | 1.10 |
| 1 orifício | 3.00 | 36.31 | 1.40 | 2.88 | 38.88 | 1.40 | 2.63 | 44.21 | 1.50 |
| 2 orifícios | 2.96 | 37.14 | 1.40 | 2.83 | 39.92 | 1.40 | 2.50 | 47.00 | 1.50 |
| 4 orifícios | 2.90 | 38.32 | 1.40 | 2.66 | 43.40 | 1.50 | 2.21 | 53.05 | 1.50 |
| 6 orifícios | 2.84 | 39.63 | 1.40 | 2.58 | 45.16 | 1.50 | 2.61 | 44.66 | 1.50 |
| 8 orifícios | 2.74 | 41.87 | 1.40 | 2.45 | 47.96 | 1.50 | 3.11 | 33.85 | 1.40 |
| 10 orifícios | 2.66 | 43.55 | 1.40 | 2.36 | 49.80 | 1.50 | 3.50 | 25.64 | 1.30 |

Em todas as simulações os melhores resultados de laminação foram encontrados para a soleira de comprimento de 2.5 m, devido a altura da lâmina d'água em relação a sua cota proporcionam maiores valores de vazão. Pode-se perceber, que quanto maior for o abatimento maior será o tempo de retardo. Com estes dados é possível fazer a análise dos resultados para a escolha da melhor configuração de desempenho do reservatório em relação a laminação e o tempo de retardo, sem sobrecarregar e subutilizar o sistema.

Conclusão

Reservatórios dotados de diferentes arranjos nos dispositivos de saída apresentam desempenhos significativamente distintos, ainda que a capacidade de acumulação de água seja a mesma. Portanto, há de se reconhecer a relevância da adequada seleção e dimensionamento dos elementos.

Este estudo procurou estimar o efeito dos dispositivos de saída no reservatório de detenção, avaliando sua eficiência na atenuação das vazões de uma área urbanizada na cidade de Fortaleza, atendendo aos objetivos que foi proposto, tendo gerado resultados coerentes.

Durante a época de chuva se não forem tomadas as medidas necessárias as enchentes aparecerão. O cenário urbanizado mostra o quanto a vazão pode variar com a interferência do homem no meio ambiente, além da antecipação do tempo de pico, o valor da vazão também aumenta. A técnica compensatória utilizada amorteceu os valores de vazão e tempo de retardo do pico, sendo possível prever a capacidade de acumulação do reservatório para manter a vazão igual ao cenário pré-urbanizado.

A cidade de Fortaleza possui vários parques, sendo que o espaço não é aproveitado para a utilização de técnicas compensatórias. Com o advento de espaço, outras simulações podem ser feitas e reservatórios implantados. Sendo que, as medidas compensatórias são, em geral, mais onerosas do que as medidas mitigatórias.

Para estimar a capacidade de acumulação do reservatório de detenção, é necessário estabelecer criteriosamente a estratégia de liberação da água a jusante, de forma a alcançar os benefícios efetivo da medida compensatória, seja atenuando a vazão como o retardo no tempo de pico.

A necessidade de continuidade deste estudo fica evidente, uma vez que, a variabilidade dos modelos adotados para o reservatório são grandes. Como recomendação para trabalhos futuros, devem-se estudar outros locais para a criação de reservatórios de detenção com áreas de bacia de contribuição superior, outras técnicas compensatórias para avaliar o amortecimento da cheia,

variar o tempo de concentração, usar orifícios e vertedouro com formas geométricas diferente e a viabilidade financeira para construção do reservatório.

Referencias bibliográficas

- Baptista, M. B., de Oliveira Nascimento, N., Barraud, S. (2011) *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. ABRH.
- Butler, S. S. (1957) *Engineering hidrology* (No. 551.49 B88)
- Diário do Nordeste (2019) *Fortaleza registra maior chuva do ano; alagamentos afetam bairros*. Acesso em 14 de Abril de 2020, disponível em: <https://diarionordeste.verdesmares.com.br/editorias/metro/online/fortaleza-registra-maior-chuva-do-ano-alagamentos-afetam-bairros-1.2051785>
- Gribbin, J. E. (2009) *Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais*. Cengage Learning.
- Neves, M., Tassi, R., Allasia, D. G., Villanueva, A. O. (2005) Propostas de melhorias nos reservatórios para controle de cheias urbanas. In *XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza: CONAGUA.
- Butler, S. (1957) *Engineering Hydrology*. [S.l.]: Prentice-Hall.
- Puls, L. (1928) Flood Regulation of the Tennessee River, House Document No. 185, Pt. 2, Appendix B. In *70th Congress, 1st Session, US Government Printing Office, Washington, DC*.
- Silva, F. O. E. D., Palácio Júnior, F. F. R., Campos, J. (2017) Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. 2013.
- da Silveira, A. L. L. (2005) Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. *Rev Bras Recur Hídricos*, **10**(1), 5-23.
- Tucci, C. E., Porto, R. L. L., Barros, M. T. (1995) *Drenagem Urbana: Coleção ABRH de Recursos Hídrico*. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 5.
- Tucci, C. E. (2012) *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 2.
- United States. Soil Conservation Service. Engineering Division. (1986) *Urban hydrology for small watersheds* (No. 55) Engineering Division, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.