

Aplicação do modelo SWMM para análise de alagamento de túnel urbano na cidade do Recife – PR.

Application of the SWMM model for the analysis of urban tunnel flooding in the city of Recife – PE.

Aplicación del modelo SWMM para el análisis de inundaciones en un túnel urbano en la cidade do Recife – PE.

Maria Angélica Veiga Da Silva

Mestre em Engenharia Civil, POLI-UPE, Brasil
mavs@poli.br

Willames de Albuquerque Soares

Professor Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares, POLI-UPE, Brasil.
was@poli.br

Marco Aurelio Calixto Ribeiro de Holanda

Doutorando em Tecnologias Energéticas e Nucleares, UFPE, Brasil.
Marco.calixto@ufpe.br

RESUMO

Os alagamentos em centros urbanos tem sido recorrentes, principalmente em centros urbanos com um crescimento desordenado e uma rede coletora deficitária. Neste contexto, a cidade do Recife-PE apresenta uma vulnerabilidade a alagamentos na ocorrência de precipitações moderadas e fortes. Deste modo, objetivou-se simular a inserção de um reservatório de detenção no do Túnel da Abolição, situado em uma área central de Recife-PE, por meio de um modelo hidrológico-hidráulico, avaliando seus efeitos na minimização dos alagamentos dentro do túnel, a partir de eventos de precipitação ocorridos na cidade. Para isto foram obtidos, junto a Prefeitura do Recife, os dados do sistema de microdrenagem do local e definidos os parâmetros e variáveis necessários para a simulação hidráulico-hidrológica, tais como: delimitação e caracterização das áreas de contribuição, chuva de projeto e curva de maré. Posteriormente foi realizada a calibração e a validação do modelo, que gerou resultados satisfatórios, com erros inferiores a 10%. Entretanto, o local de estudo apresenta uma condição de escoamento desfavorável, o sistema de drenagem concentra a água pluvial captada para o interior do túnel e a implantação de um reservatório de detenção, apesar de diminuir volume e altura no ponto de controle, não é resolutive. Por conta disso, sugeriu-se um sistema de monitoramento como proposta para antecipar as possíveis falhas do bombeamento e evitar os alagamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento Superficial. Modelagem hidrológica. Susceptibilidade urbana.

ABSTRACT

Floods in urban centers have been recurrent, mainly in urban centers with disorderly growth and a deficient collection network. In this context, the city of Recife-PE is vulnerable to flooding in the event of moderate and heavy rainfall. Thus, the objective was to simulate the insertion of a detention reservoir in the Túnel da Abolição, located in a central area of Recife-PE, through a hydrological-hydraulic model, evaluating its effects in minimizing flooding inside the tunnel, from precipitation events that occurred in the city. For this purpose, data from the local micro-drainage system were obtained from the Recife City Hall and the parameters and variables necessary for the hydraulic-hydrological simulation were defined, such as: delimitation and characterization of the contribution areas, project rainfall and tide. Subsequently, calibration and validation of the model were carried out, which generated satisfactory results, with errors of less than 10%. However, the study site has an unfavorable flow condition, the drainage system concentrates the rainwater collected into the tunnel and the implementation of a detention reservoir, despite reducing volume and height at the control point, is not resolving. Because of this, a monitoring system was suggested as a proposal to anticipate possible pumping failures and avoid flooding.

KEY WORDS: Surface Runoff. Hydrological Modeling. Urban Susceptibility.

RESUMEN

Las inundaciones en los centros urbanos han sido recurrentes, principalmente en los centros urbanos con crecimiento desordenado y con una red de recolección deficiente. En ese contexto, la ciudad de Recife-PE es vulnerable a inundaciones en caso de lluvias moderadas y fuertes. Así, el objetivo fue simular la inserción de un embalse de detención en el Túnel da Abolição, ubicado en una zona central de Recife-PE, a través de un modelo hidrológico-hidráulico, evaluando sus efectos en la minimización de inundaciones en el interior del túnel, a partir de la precipitación. Hechos ocurridos en la ciudad. Para ello, se obtuvieron datos del sistema de microdrenaje local de la Alcaldía de Recife y se definieron los parámetros y variables necesarios para la simulación hidro-hidráulica, tales como: delimitación y caracterización de las áreas de aporte, precipitación del proyecto y marea. Posteriormente se realizó la calibración y validación del modelo, la cual generó resultados satisfactorios, con errores menores al 10%. Sin embargo, el sitio de estudio tiene una condición de caudal desfavorable, el sistema de drenaje concentra el agua de lluvia recolectada en el túnel y la implementación de un reservorio de detención, a pesar de reducir el volumen y la altura en el punto de control, no se resuelve. Por ello, se planteó como propuesta un sistema de monitoreo para anticipar posibles fallas de bombeo y evitar inundaciones.

PALABRAS CLAVE: Escorrentía superficial. Modelado hidrológico. susceptibilidad urbana.

1 INTRODUÇÃO

O novo Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC, 2022), afirma que em um cenário mundial as populações urbanas tiveram um aumento de mais de 397 milhões de pessoas entre 2015 e 2020, com mais de 90% desse crescimento ocorrendo em regiões menos desenvolvidas. O World Resources Institute Brasil (WRI, 2015), publicou em seu Manual de Desenvolvimento Urbano Orientado ao Transporte Sustentável (DOTS) que a população de regiões menos desenvolvidas era afetada por estar em áreas afastadas dos grandes centros urbanos, pelo fato de as cidades não serem conectadas e por não disporem de um serviço de transporte coletivo de qualidade para o deslocamento até os centros de interesse e o restante da cidade.

Miyamoto (2010) e Berglund et al. (2020) correlacionam o aumento da densidade populacional com a necessidade de implantação de equipamentos de engenharia, como túneis, pontes e viadutos e o uso de infraestruturas inteligentes que possibilitem um deslocamento mais rápido das pessoas.

Segundo Medeiros (2019), o bom funcionamento de uma cidade depende dos sistemas e infraestruturas, como por exemplo a rede de transportes, que permitem a mobilidade de bens e pessoas, promovendo o acesso a saúde, trabalho, lazer, moradia, entre outros, garantindo a vitalidade da própria cidade.

Para favorecer o tráfego das cidades é imprescindível que os Planos Diretores adotem em seu planejamento uma infraestrutura urbana de qualidade para que a densidade gere impactos positivos nas áreas urbanas e crie cidades mais prósperas e sustentáveis (WRI, 2015). Para o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) é importante salientar a importância da pavimentação das vias urbanas como elemento de melhoria para a locomoção nas cidades.

Para Mesquita e Lima Neto (2020) e Holanda e Soares (2019), que analisaram os impactos da impermeabilização do solo na hidrologia de uma bacia hidrográfica urbana, foram observados que a urbanização sem planejamento impacta diretamente na hidrologia, pois o acréscimo da impermeabilização aumenta a quantidade e intensidade dos alagamentos e acentua o volume do escoamento superficial, podendo causar maiores transtornos à população local e aos transeuntes. Barros (2005), por sua vez, afirma que o aumento gradativo do volume de escoamento superficial para o mesmo índice de precipitações torna obsoleto o sistema de drenagem projetado, impossibilitando o escoamento adequado das águas pluviais.

Além do aumento da impermeabilização do solo, fatores como o aumento da temperatura da superfície global estão diretamente ligados ao aumento de precipitações intensas em alguns locais e de períodos mais longos de seca em outros. Assim, diante das projeções de volume e frequência dessas precipitações extremas, espera-se o aumento da ocorrência de alagamentos (DUARTE et al., 2021; VERÇOSA, 2019).

Estudo realizado por Wanderley et al. (2018) sobre a precipitação diária da cidade do Recife demonstrou que todos os meses do ano são propícios a ocorrência de valores diários extremos, acima de 50 mm de precipitação, sendo que o período entre março e agosto apresentam maior probabilidade. Portanto, isso reafirma a suscetibilidade da área de estudo aos eventos extremos de chuvas diárias e a relevância do assunto perante o planejamento do sistema de drenagem da cidade.

Situações de alagamentos podem causar interrupções ou redução do desempenho nos

modos de deslocamento, podendo interferir direta ou indiretamente no padrão de comportamento da população e na distribuição de insumos e serviços em uma cidade, notadamente nas regiões metropolitanas que são as mais vulneráveis, pois concentram a maioria dos transportes coletivos e individuais, e onde vive o maior percentual da população (IDTP, 2017).

As soluções de drenagem do sistema tradicional geralmente transferem o problema de alagamentos para as áreas jusantes, acelerando o escoamento da água pluvial. Assim desde a década de 70 houve um avanço na busca e emprego de soluções alternativas, entre elas as chamadas “técnicas compensatórias”. (BAPTISTA et al., 2015). O uso de técnicas compensatórias podem ser opções válidas para reduzir a vazão e conseqüentemente os alagamentos. (KÄNDLER, et al., 2022; ZHU et al., 2019).

Um meio de se avaliar o desempenho dessas soluções alternativas, antes de sua implantação, é a utilização de modelos hidrológicos e hidráulicos (HOLANDA et al., 2020; MONTEIRO et al., 2021). A utilização de modelos hidráulicos e hidrológicos possibilitam tanto a verificação do redimensionamento dos sistemas de drenagem, quanto da simulação do emprego de técnicas compensatórias, representando uma ferramenta fundamental na gestão dos recursos hídricos (PARISI et al., 2020).

Um dos modelos hidrológicos que vem sendo largamente utilizado ultimamente para prognóstico dos efeitos da impermeabilização, causada principalmente pela urbanização, e para simulação de alternativas para reestabelecer condições ambientais mais favoráveis é o modelo Storm Water Management Model (SWMM). Segundo Lewis e Michelle (2022) o SWMM é um modelo dinâmico de simulação de chuva-escoamento usado para simulação de evento único ou de longo prazo (contínua) da quantidade e qualidade do escoamento principalmente de áreas urbanas.

Nesse contexto, objetivou-se inserir o sistema de drenagem existente do túnel urbano de uma cidade costeira e plana impactado pela precipitação e pelo nível da maré, através da utilização do modelo hidrológico e hidráulico, SWMM, e avaliar o comportamento da drenagem do local de estudo observando se os resultados simulados foram condizentes com os resultados observados e propor, a partir desse modelo, uma solução para minimizar os efeitos de alagamento.

2 METODOLOGIA

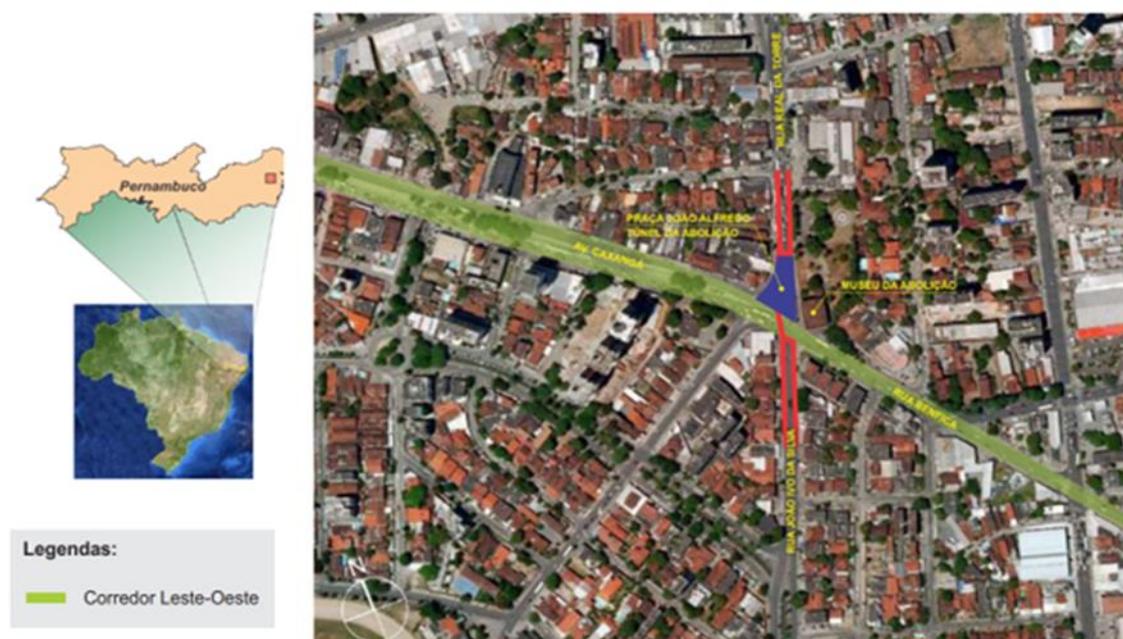
2.1 Caracterização da área de estudo

A Cidade de Recife está localizada no estado de Pernambuco na região nordeste do Brasil. Possui uma população estimada em 1.653.461 habitantes e uma área de 218,5 km², ocupando o nono lugar do ranking dos municípios mais populosos do estado. É uma cidade litorânea constituída geologicamente por rochas sedimentares e com o relevo composto por uma planície rodeada por morros. Apresenta um clima tropical quente e úmido, com alta pluviosidade no período chuvoso compreendido entre os meses de março a agosto e com pluviosidade máxima de 391 mm no mês de junho. Apresenta um processo de urbanização desordenado, com a ocupação de locais impróprios para a habitação, tais como áreas inundáveis, de morros e de encostas e possui sistemas de drenagem vulneráveis às oscilações das marés (IBGE, 2021; SILVA JÚNIOR et al., 2020; VERÇOSA, 2019).

Atualmente a cidade possui cinco túneis urbanos que são de extrema importância para

a locomoção dos habitantes na cidade, de modo que a interrupção do uso de algum desses equipamentos afeta sensivelmente a mobilidade. A área de estudo específica é o túnel urbano denominado de Túnel da Abolição, localizado na Rua Real da Torre e que passa sob a Rua Benfica (Figura 1). Ele, que está sob a responsabilidade do Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco (DER-PE), possui 287 m de extensão, 8,8 m de altura e é o mais recentemente construído, tendo suas obras concluídas no ano de 2015.

Figura 1 – Formatação da margem do túnel



Fonte: Word, 2021.

Observa-se na Figura 1 a localização do Túnel da Abolição e do Corredor Leste-Oeste, com o Museu da Abolição situado ao lado do túnel e a praça João Alfredo logo acima dele. O objetivo da construção do túnel foi eliminar um dos mais importantes cruzamentos da cidade, a interseção do Corredor Leste-Oeste com a 2ª Perimetral, no sentido dos bairros da Torre para Afogados, otimizando um dos principais pontos de retenção do corredor Av. Caxangá/Rua Benfica, melhorando consideravelmente a velocidade média do tráfego misto e do corredor de transporte da Av. Caxangá.

O citado túnel se diferencia dos demais por ter as contenções constituídas por estacas secantes com 600 mm de diâmetro. Essa tecnologia foi escolhida pelo baixo nível de vibrações emitidas, dado que nos arredores do local existem construções históricas, como o Museu da Abolição, que dá nome ao túnel e que possui uma extensa área externa e de solo permeável. Na parte superior e central do túnel foi implantada uma praça para integrar e humanizar os arredores do Museu da Abolição.

2.2 Modelagem

A região de estudo foi dividida em duas áreas de contribuição definidas a partir dos dados disponibilizados na plataforma eletrônica - Portal de Informações geográficas da cidade do Recife (Prefeitura do Recife – ESIG) que fica sob responsabilidade da Autarquia de

Manutenção e Limpeza Urbana do Recife (EMLURB), no qual pode-se extrair a planta da cidade em ambiente CAD e as informações de drenagem. A rede possui informações quanto à localização dos poços de visita (PV) e suas cotas, além das dimensões e comprimentos das galerias. Apesar disso, tendo sido constatada a ausência de alguns desses dados, estes foram estimados e replicados por semelhança. Outras informações sobre o projeto da drenagem interna do Túnel da Abolição foram extraídas do seu projeto executivo (GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO, 2012).

Para os dados pluviométricos foram utilizadas as informações aferidas pela estação pluviométrica do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), localizada no bairro da Boa Vista, distante 1,5 Km do túnel. Para as informações da tábua da maré foram utilizados os dados disponibilizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN). De posse dos dados, dois eventos pluviométricos foram utilizados na calibração e validação do modelo. Para essa calibração foram reajustados os parâmetros: 1) coeficiente de rugosidade de Manning para os condutos, 2) altura da camada de sedimento depositado nos condutos e 3) área alagada no nó de controle, para simular com a capacidade hidráulica da rede instalada mais próxima à realidade. Após a calibração, foi realizada a validação do modelo com a utilização de outro evento pluviométrico e posteriormente verificada a possibilidade de adoção de uma bacia de detenção na área de estudo para mitigar os alagamentos.

3 RESULTADOS

3.1 Precipitação e maré

O evento de precipitação que foi utilizado para a calibração ocorreu no dia 13/06/2019, causando vários transtornos à população da Cidade do Recife. No período de 24 h, entre os dias 13 e 14 de junho, o CEMADEN registrou um total de 149,20 mm de precipitação sobre o Recife, sendo o sexto maior valor acumulado de chuva em 24 h para o mês de junho desde 1961. Essa precipitação corresponde a 38% da média de chuva esperada para este mês (391 mm). Um segundo evento de precipitação foi utilizado na análise. Este, ocorreu entre em 14/01/2022, com um volume acumulado de 91,16 mm e que também causou alagamentos em vários pontos da cidade e também no Túnel da Abolição. As Figuras 2 e 3 demonstram a relação de precipitação e maré por intervalos de horas, nos respectivos eventos.

Figura 2 – Relação precipitação versus maré no dia da precipitação de 13/06/2019

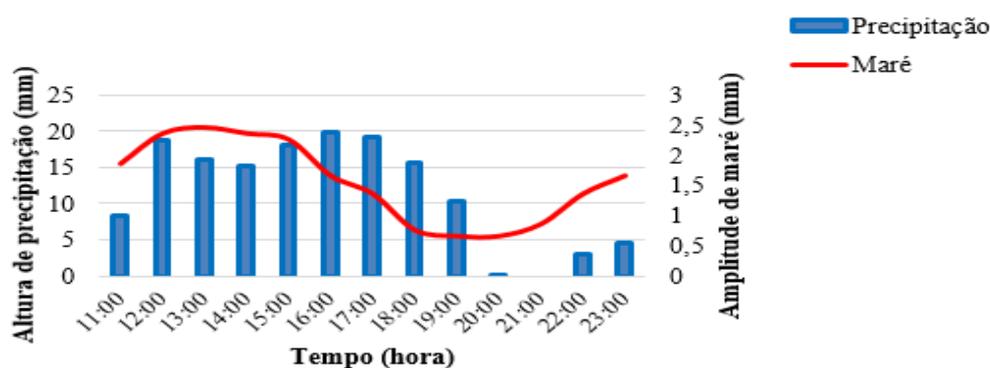
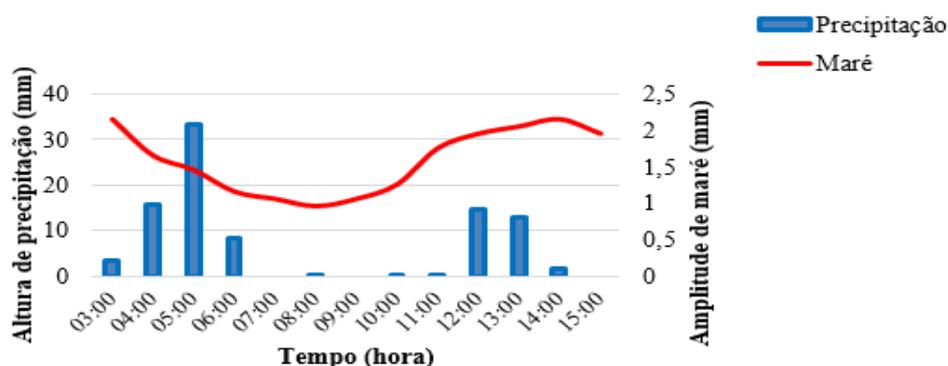


Figura 3 – Relação precipitação versus maré no dia da precipitação de 14/01/2022



Conforme mostra a Figura 2, referente ao evento do dia 13/06/2019, houve um período de oito horas de precipitação ininterrupta, totalizando 142 mm, e no meio deste período, a maré atingiu uma altura máxima de 2,50 m. Para o evento do dia 14/01/2022, a Figura 3 mostra que houve uma concentração pluviométrica maior da entre as três e as seis horas, tendo sido aferido um total de 61,05 mm. No horário de maior precipitação a maré estava com altura de 1,50 m, e apesar do intervalo sem chuvas entre as 7 h e 00 min e 11 h e 00 min, a precipitação retornou por volta das 12 h, coincidindo com a subida da maré.

3.2 Rede de Drenagem existente

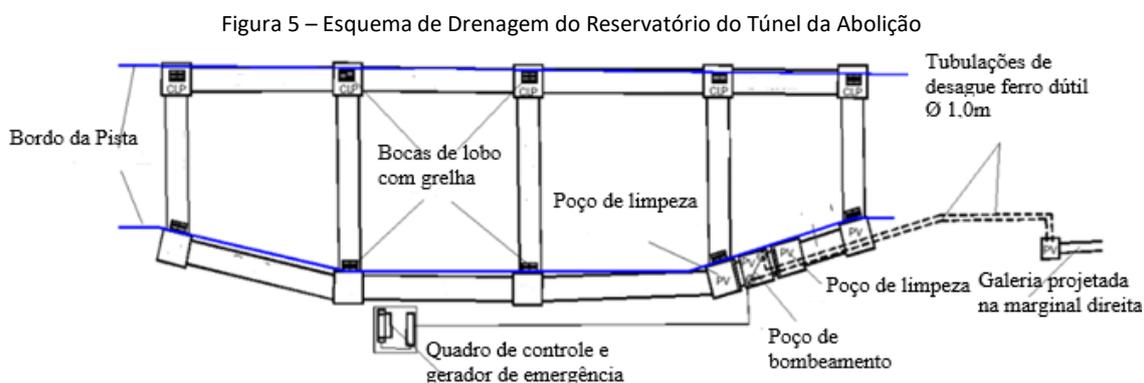
Na Figura 4 são apresentadas a imagem do Túnel da Abolição (A) e o traçado da rede de drenagem do local de estudo (B), respectivamente.

Figura 4 – A) Imagem do Túnel da Abolição e B) sua traçado da rede de drenagem



O Túnel da Abolição, Figura 4A, apresenta uma cota muito inferior, quando comparada ao nível das ruas adjacentes, Figura 4B. O traçado em destaque representa o coletor tronco principal, que possui 600 mm de diâmetro e que se inicia na Rua Real da Torre e segue até o seu exutório no canal existente na Rua João Ivo da Silva, recebendo a contribuição da rede coletora proveniente da Rua Hercílio Cunha.

Pelo fato do túnel se encontrar em cota mais baixa, foi necessário adotar um sistema de bombeamento para o redirecionamento das águas acumuladas, representado na Figura 5, em projeção horizontal.



No ponto mais baixo da pista foi construído um esquema de drenagem com função dupla de condução e armazenamento das águas acumuladas, através de tubulações de concreto com diâmetro constante igual a 1,5 m e que possui uma capacidade de 265 m³ de armazenamento. Atualmente há duas bombas de recalque seis cavalos e mais uma bomba reserva de quatro cv. No entanto, por conta de constantes furtos de fiação e outros intrínsecos à rede elétrica de alimentação, o funcionamento das bombas acaba não sendo efetivo, e na ocorrência de chuvas, o sistema não atua satisfatoriamente no escoamento a água, resultando no alagamento do túnel.

Ademais a praça situada na parte superior e central do túnel, que é constituída por sete canteiros elevados com grama que são intercalados por áreas gradeadas para iluminação e ventilação, também contribui para essa situação, conforme ilustrados pela Figura 6.

Figura 6 – Detalhe das áreas abertas para ventilação e iluminação (A) e interior do túnel em período de chuva (B).

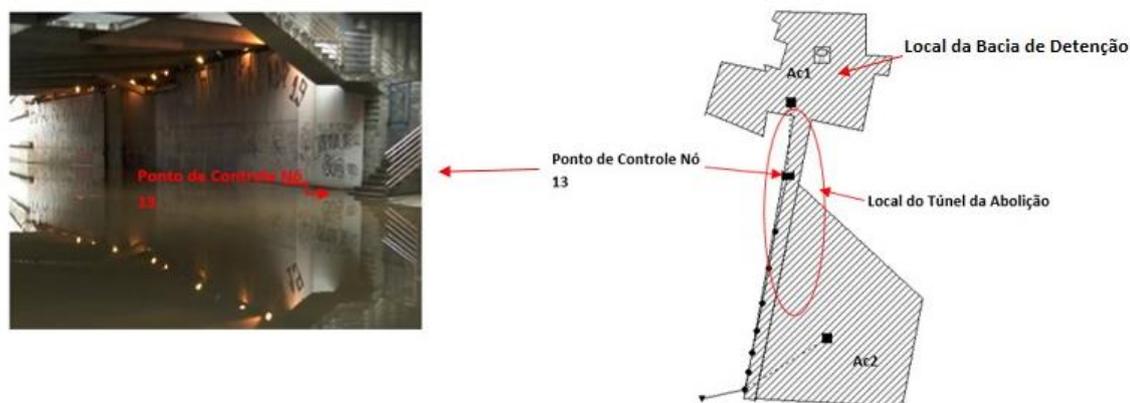


Em períodos de precipitação, os canteiros acumulam água e as direcionam para o interior do túnel, que caem em cascata pelas aberturas gradeadas, dificultando, em momentos de maior vazão, a mobilidade dos transeuntes.

3.3 Aplicação do modelo SWMM

Para simular o funcionamento atual do sistema de drenagem foram consideradas e inseridas as áreas de contribuição e o sistema de drenagem no software SWMM, Figura 7.

Figura 7 – Imagem do interior do túnel, do dia 13/06/2019, e Representação das áreas de contribuição, do ponto de controle e da bacia de detenção



A inserção do modelo no software SWMM tem como objetivo representar o funcionamento atual do sistema de drenagem, considerando as inundações na Junção "Nó 13" definido como ponto de controle. Nele o parâmetro para o volume máximo de alagamento simulado seria compatível com o observado e calculado no local durante os eventos de chuva, sem considerar a existência das bombas, já que em ambos os eventos elas estavam fora de funcionamento.

Este mesmo procedimento também havia sido adotado por outros autores que estudaram problemas de alagamentos no Recife como Silva (2018), que utilizou a modelagem hidrológica- hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco; Oliveira (2017), que estudou as alternativas compensatórias para drenagem urbana em um ponto crítico da cidade do Recife; Silva Júnior, Silva e Cabral (2014), que estudaram alternativas compensatórias para o controle de enchentes em áreas urbanas com influência das marés em Recife; Silva Júnior (2015) que estudou alternativas para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE e Silva e Cabral (2014), que estudaram sobre a atenuação de picos de vazão em área problema, realizando um estudo comparativo de reservatórios de detenção em lote, em logradouros e em grande área da bacia.

Tanto para calibração quanto para a validação do modelo, foram observadas as alturas d'água em fotos e vídeos durante os alagamentos ocorridos nos eventos de precipitação e, a partir daí, foram aferidas in loco as alturas desses alagamentos no ponto de controle.

No dia 13/06/2019, evento utilizado para calibração do modelo, obteve-se a partir dos registros fotográficos e da planta da cidade em ambiente CAD uma área aproximada de alagamento de 917 m². A altura máxima de lâmina d'água de 0,50 m no ponto de controle foi verificada através dos registros fotográficos e confirmada in loco. Para definição do volume de alagamento, considerou-se a equivalência entre a área de alagamento delimitada (917 m²) e a máxima altura da lâmina d'água observada (0,50 m) no ponto de controle, replicando a lâmina d'água no projeto topográfico de perfil do túnel, cujo produto entre estes fatores resulta, em termos estimativos, no volume alagado, que somado ao volume dos condutos de armazenamento (265 m³) resultou em um volume total estimado de 621 m³.

A seguir, na Tabela 1, apresentam-se os principais resultados obtidos para a calibração e validação do modelo.

Tabela 1 – Principais resultados obtidos para a Calibração e Validação do modelo

Aspectos	Calibração – evento de 13/06/2019			Validação – evento de 14/01/2022			
	Observado	Simulado	Erro Relativo (%)	Observado	Simulado	Erro Relativo (%)	
Lâmina Máxima de alagamento (m)	0,50	0,50	0,00%	0,45	0,49	8,89%	
Volume máximo de alagamento (m ³)	621	614	1,14%	585	540	-7,72%	
Erros de Continuidade para:	Escoamento superficial	-	-	0,00%	-	-	0,00%
	Propagação da vazão	-	-	1,01%	-	-	1,17%

Conforme apresentado na Tabela 1, durante a calibração conseguiu-se alcançar uma altura de alagamento simulada de 0,50 m no ponto de controle (Nó 13) e um volume máximo de 614 m³, apresentado respectivamente erros de 0% e 1,14% para esses parâmetros. No término da etapa de calibração obteve-se um erro médio de continuidade para escoamento superficial de 0,00% e 1,01% para propagação de vazão. Após a calibração partiu-se para a validação com a chuva do dia 14/01/2022, sendo utilizada a mesma modelagem definida na calibração, ou seja, sem alterar os parâmetros físicos do modelo, modificando apenas a série de precipitação e a curva de maré para os dados aferidos para este dia. Obteve-se erros relativos de 8,89% para altura do alagamento, visto que a lâmina foi 0,04 m maior que o observado e -7,72% para o volume máximo gerado, visto que o volume de alagamento foi 45 m³ menor que o observado. Além disso apresentaram erro médio de continuidade para escoamento superficial de 0,00% e 1,17% para propagação de vazão.

Os trabalhos citados anteriormente de Silva (2018), Oliveira (2017), Silva Júnior et al. (2017), Silva Júnior (2015) e Silva e Cabral (2014), adotaram como admissível o limite de 10% para distorções. Diante disso, pode-se constatar que a qualidade da calibração e validação foram satisfatórias, com erros inferiores ao limite dos 10% tanto entre altura e o volume do alagamento, quanto para a continuidade (escoamento superficial e propagação de vazão).

3.4 Avaliação da utilização da técnica compensatória

O Túnel da Abolição já apresenta em seu projeto uma medida de controle na fonte que é a adoção de condutos de armazenamento, cuja função é de retenção e condução das águas captadas para um poço de bombeamento, de onde a água é direcionada para seu exutório. Nesse contexto, foi simulada a inserção de uma bacia de detenção ao lado do túnel, no terreno do museu, bem como apresentado na Figura 7.

Como a área de estudo está situada ao lado de um Museu, o qual possui uma extensa área externa permeável, o local do anfiteatro (uma área circular rodeadas de degraus a céu aberto), poderia funcionar como uma bacia de detenção e parte da água captada na área de contribuição 1(Ac1), a qual antecede o Túnel, seria conduzida para essa bacia de detenção.

A seguir, na Tabela 2, está exposto o comparativo dos resultados para a precipitação ocorrida no dia 13/06/2019 com e sem a implementação da bacia de detenção proposta.

Tabela 2 – Comparativo entre os resultados obtidos para os eventos de precipitação do dia 13/06/2019 sem e com a Bacia de detenção

Aspectos	Sem bacia de detenção	Com a bacia de detenção	Diferença Relativa (%)	
Lâmina Máxima de alagamento (m)	0,50	0,43	-14,00%	
Volume máximo de alagamento (m ³)	614	506	-17,66%	
Duração do alagamento (h)	10,79	9,90	-8,25%	
Erros de Continuidade para:	Escoamento superficial	0,00%	0,00%	-
	Propagação da vazão	1,01%	0,38%	-

Como resultados da simulação, apresentados na Tabela 2, observou-se que a lâmina máxima de alagamento e o volume máximo de alagamento diminuíram respectivamente 14,00% e 17,66% para o evento de precipitação do dia 13/06/2019. Além disso, houve um decréscimo no tempo de alagamento de uma hora em relação aos cenários sem e com a bacia de detenção. No entanto, mesmo com a adoção da bacia de detenção, as simulações apontaram que a adoção da técnica compensatória não seria suficiente para resolver o problema do alagamento, tendo em vista que a altura da lâmina d'água no ponto de controle chegaria a 0,43 m, altura suficiente para cobrir o pneu de um carro de passeio, indicando que o emprego dessa medida não é o mais adequado para resolução do problema.

Considerando que o perfil do túnel apresenta cota muito inferior ao nível das ruas adjacentes, ele próprio funciona como um reservatório e, mesmo com um volume menor, a água acumulada ainda apresenta uma lâmina alta que inviabiliza o seu uso. É necessário, portanto, um sistema de bombeamento com maior eficiência e eficácia, com monitoramento do nível dos reservatórios para onde a água é escoada e controle remoto das bombas de recalque dos túneis para que elas sejam acionadas quando atingirem níveis elevados de acúmulo. Além disso, é importante um sistema de monitoramento permanente para o caso de falhas nas bombas, visando que falhas de funcionamento sejam percebidas com antecedência e possam ser resolvidas antes de potenciais situações de alagamentos.

3.5 Análise financeira

Para complementação do estudo, foi realizada uma análise financeira reajustando o valor da licitação realizada em junho de 2020 (GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO, 2020) para a implantação de sistema de monitoramento de um túnel da cidade do Recife. O resultado alcançado na análise totalizou, em valores atuais, R\$ 314.133,63.

Para implementar este sistema, é necessário um painel para o acionamento das bombas de drenagem por soft-starter ou inversores. O controle de partida das bombas é realizado por transmissores de nível ultrassônicos e acionado de acordo com o nível dos reservatórios através de um controlador lógico programável (CLP). O CLP vem com um modem GSM (Sistema Global de Comunicações Móveis) incorporando, dessa forma, os dados das bombas e níveis dos reservatórios que são transmitidos para um servidor. Com esses dados chegando ao cliente é possível monitorar o status das bombas, níveis dos reservatórios, histórico de alarmes e tendências via telas gráficas.

4 CONCLUSÕES

Durante o estudo do local, foi verificado que ele apresenta uma condição de escoamento desfavorável, devido ao sistema de drenagem subterrâneo concentrar toda a água pluvial captada para o interior do túnel, decorrente de princípios de concepção do projeto. Além disso, há dependência do sistema de bombeamento para o escoamento da água, que se apresenta vulnerável e não possui um sistema de controle que informe com antecedência possíveis falhas. Demonstrando que o dimensionamento do sistema de drenagem concebido e a falta de monitoramento podem ser uma das causas dos recorrentes alagamentos na área estudada.

Os cenários simulados no SWMM se apresentaram aderentes ao retratar a rede de drenagem existente da área de estudo, portanto, as análises quantitativas apresentadas exprimem a realidade do sistema. Com a simulação de implantação de uma bacia de retenção que receberia o volume de água captado da área de contribuição Ac1, foram verificados a redução do volume e da altura de alagamento no ponto de controle, além da diminuição em 10% do tempo de alagamento, porém insuficientes para resolver o problema do túnel de forma que evitasse a sua interdição.

Para efetiva resolução do problema de alagamento, sugere-se a adoção de um sistema de monitoramento em tempo real para controle do sistema de bombeamento do túnel. Ainda assim, vale salientar que um sistema deste tipo ainda seria sensível a falta de energia, além do que a cidade é alvo constante de atos de vandalismo e furtos, o que também pode interromper esse monitoramento.

Reforça-se ainda a importância do correto dimensionamento de projetos, onde haja uma interligação entre as disciplinas de arquitetura, infraestrutura e drenagem. Há uma série de instrumentos legais que orientam sobre a questão das águas pluviais. Além disso, a utilização de modelos hidráulicos e hidrológicos podem possibilitar a verificação do dimensionamento dos sistemas de drenagem, inclusive com a simulação de emprego de técnicas compensatórias.

5 REFERÊNCIAS

BAPTISTA, Márcio, NASCIMENTO, Nilo; BARRAUD, Sylvie. (2015). **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora ABRH, 2015.

BARROS, Mário Thadeu Leme. **Drenagem urbana: bases conceituais e planejamento**. Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável. Tradução. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública/Núcleo de Informações em Saúde Ambiental, 2005.

BERGLUND, E. Z.; MONROE, J. G.; AHMED, I.; NOGHABAEI, M.; DO, J.; PESANTEZ, J. E.; FASAE, M. A. K.; BARDAKA, E. HAN, K.; PROESTOS, G. T.; LEVIS, J. Smart Infrastructure: A Vision for the Role of the Civil Engineering Profession in Smart Cities. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 26, n. 2, p. 1-32, 2020.

DUARTE, T. L. S.; SANTOS, G. C.; CASTELHANO, F. J. Eventos de chuvas extremas associados aos riscos de inundações e de alagamentos em Aracaju, Sergipe. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 12, n. 1, p. 256-271, 2021

Diretoria de Hidrologia e Navegação. Ministério da Marinha, DHN-MB. Tábuas de Marés para 2022. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-dosegnav-publicacoes/tabuas-das-mares>. Acesso em: 01 fev. 2022.

Governo do Estado de Pernambuco. Corredor de Transporte Público Leste-Oeste. Projeto Executivo do Túnel da Abolição. Volume 1 - Memória Justificativa e Plano de Execução da Obra. Novembro. Recife 2012.

Governo do Estado de Pernambuco. Mapa de Obras 1 Trimestre. Recife, 2020. Disponível em: http://transparencia.recife.pe.gov.br/uploads/pdf/20210419-OF.158-21-MAPA_OBRAS_1TRIMESTRE_8d17d79088950ff2d48d0f049f16a034.pdf. Acesso em: 10 fev. 2022.

Holanda, M. A. C. R.; Soares, W. A. Analysis of the effect of impermeability of urban soils on the infiltration of rainwater in the city of Recife, PE. **Ambiente e Água**, v. 14, n. 4, p. 1-10, 2019.

Holanda, M. A. C. R.; Oliveira, D. B. C.; Soares, W. A.; Silva, S. R. Analysis of the Viability of Implementing Sustainable Proposals to Reduce Tunnel Flooding in Recife, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V. 13, n. 4, p. 1904-1913, 2020.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) – 2008**. IBGE: Rio de Janeiro, 2010. 219p.

IBGE. Estimativa populacional 2021. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 jun. 2022.

IDTP. INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO. Estudo Técnico - Adaptação às Mudanças Climáticas na Mobilidade Urbana (2017). Disponível em https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEMOB/ArquivosPDF/Estudo_Tecnico_-_Adaptacao_às_mudancas_climaticas_na_Mobilidade_Urbana.pdf. Acesso em: 07 jan. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2022.

KÄNDLER, N.; ANNUS, I.; VASSILJEV, A. Controlling peak runoff from plots by coupling street storage with distributed real time control. **Urban Water Journal**, v. 19, n. 1, p. 97-108, 2022.

LEWIS, A. R.; MICHELLE, A. S. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2 February 2022, 424p. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf>. Acesso em: 07 jun. de 2022.

MEDEIROS, Camila Santos. **Vulnerabilidade dos Sistemas de Transporte em áreas de inundação**: uma mudança nos padrões de mobilidade e a busca pela adaptação às alterações climáticas. 2019. Dissertação (Mestrado em Urbanismo Sustentável e Ordenamento do Território). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2019.

MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. Impacto da impermeabilização na hidrologia de uma bacia urbana. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, XIII., 19 e 20 out. 2020, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. **Anais** [...]. Porto Alegre: Rio Grande do Sul, 2020.

MIYAMOTO, James Shoit. **Grandes túneis urbanos**: uma proposta de gestão ambiental. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MONTEIRO, Viviane Vaz; Silva, Solange; SANTOS, Felipe Corrêa Veloso; SOUZA, Anselmo Claudino. SWMM – Modelo de aplicação de modelagem hidrológica para as cidades. *In*. Gestão da Produção em Foco. Belo Horizonte: Poisson, 2021, pp. 57-63.

OLIVEIRA, Regina Lúcia Melo. **Alternativas Compensatórias para drenagem Urbana em ponto crítico da cidade do Recife – PE**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2017.

PARISI S. A.; SOARES, W. A.; FILHO, C. D. R. Análise da capacidade de infiltração para atenuação de alagamento em

um ponto crítico na cidade do Recife Recife-PE. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 236-249, 2020;

SILVA, Alisson Caetano. **Modelagem hidrológica-hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2018.

SILVA JÚNIOR, M. A. B., Silva, S. R.; CABRAL, J. J. S. P. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.22, n. 19, p. 1-12, 2017.

SILVA JÚNIOR, Marcos Antônio Barbosa. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2015.

SILVA, P. O., CABRAL, J. J. S. P. Atenuação de picos de vazão em área problema: estudo comparativo de reservatórios de retenção em lote, em logradouros e em grande área da bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 7-18, 2014.

VERÇOSA, Livia Fragoso Melo. **Modelagem Hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade do Recife, PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

WANDERLEY, L. S. A.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, A. B.; dos Anjos, R. S.; ALMEIDA, C. A. P. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149-164, 2018

WRI. World Resources Institute Brasil. Manual de Desenvolvimento Urbano Orientado ao Transporte Sustentável. Brasil, 2015. Disponível em: <https://wricidades.org/sites/default/files/DOTS%20Cidades.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2022.

ZHU, Z.; CHEN, Z.; CHEN, X.; YU, G. An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 504-514, 2019.