



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARIA ANGÉLICA VEIGA DA SILVA

**ANÁLISE DE ALAGAMENTO DE DOIS TÚNEIS URBANOS DA
CIDADE DO RECIFE-PE UTILIZANDO UM MODELO
HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO**

Recife, PE
2022



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARIA ANGÉLICA VEIGA DA SILVA

**ANÁLISE DE ALAGAMENTO DE DOIS TÚNEIS URBANOS DA
CIDADE DO RECIFE-PE UTILIZANDO UM MODELO
HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares

Recife, PE
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

S586a Silva, Maria Angélica Veiga da
Análise de alagamento de dois túneis urbanos da cidade do Recife utilizando um modelo hidrológico e hidráulico. / Maria Angélica Veiga da Silva. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2022.

114 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Túneis. 2. Alagamentos. 3. Técnicas Compensatórias. 4. SWMM. I. Construção Civil – Dissertação. II. Soares, Willames de Albuquerque (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690.028

MARIA ANGÉLICA VEIGA DA SILVA

ANÁLISE DE ALAGAMENTOS DE DOIS TÚNEIS URBANOS DA
CIDADE DO RECIFE UTILIZANDO UM MODELO
HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

BANCA EXAMINADORA:

Orientador



Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares
Universidade de Pernambuco

Examinadores



Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Universidade de Pernambuco



Profa. Dra. Lêda Cristina da Silva
Universidade de Pernambuco

Recife-PE
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me redirecionar tantas vezes para o caminho e me dar forças, principalmente nesses últimos dois anos no qual houve tantas provações em minha vida.

Aos meus filhos Artur e Valentina, meus grandes motivadores, obrigada por não me fazerem desistir e por compreenderem a ausência da mamãe em tantos momentos e por tantas noites.

Aos meus pais Godeliever e Valdeli por acolherem a mim e meus filhos em sua casa nesse último ano e por todo apoio, incentivo e amor que sempre nos deram.

Ao meu namorado Luís Maranhão pelo apoio, carinho e compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu orientador Willames Soares pela orientação, confiança e paciência durante toda essa longa e exaustiva jornada.

À todos os professores que compartilharam o conhecimento e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco que sempre me auxiliaram.

À Rayssa Siqueira e Marcos Barbosa que disponibilizaram parte de seu tempo me orientando e me ajudando, obrigada pelo apoio e paciência em passar todo conhecimento adquirido sobre o modelo SWMM. A Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB), nas pessoas dos engenheiros Pedro Oliveira, Jeferson Nascimento e Cíntia Rafaela, que disponibilizaram parte dos dados necessários para a pesquisa. Aos meus amigos que sempre me incentivaram: Clareana, Maria Eduarda, Mariângela, Lucas, Mônica, Natacha, Ana Luiza, Nathália, Maria Clara, Priscila, Maisa, entre outros, agradeço pela paciência, pela amizade e força em todos os momentos. Por fim agradeço à todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

RESUMO

Nas últimas décadas os municípios brasileiros apresentaram uma urbanização acelerada e não planejada. Nas cidades de médio e grande porte a densificação e o ritmo urbano intenso ensejam a adoção de medidas que propiciem e agilizem o deslocamento. Novas técnicas de engenharia, geologia e geotécnica possibilitaram a construção de extensos túneis urbanos de forma a transpor barreiras geotopográficas e viabilizar o tráfego com maior facilidade e fluidez. A cidade do Recife possui atualmente 05 túneis urbanos que são de extrema importância para o trânsito da cidade, porém a ocorrência de alagamentos acaba inviabilizando o propósito original deles que é a simplificação do deslocamento urbano. O objetivo do trabalho é inserir o sistema de drenagem existente dos Túneis Josué de Castro e da Abolição através da utilização do modelo hidrológico e hidráulico, SWMM (Storm Water Management Model) desenvolvido pela U. S. EPA (United States Environmental Protection Agency), e avaliar através de eventos de precipitação, se os resultados simulados foram condizentes com os resultados observados além de simular para esse modelo a implantação de uma técnica compensatória que minimize os efeitos de alagamento. Para isto foi obtido junto a Prefeitura os dados do sistema de microdrenagem do local e foram 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. Após a inserção dos parâmetros e variáveis foi realizada a calibração e a validação dos modelos, que mostraram resultados satisfatórios, com erros pequenos para o escoamento superficial de -0,6% e 0,0% respectivamente para o Túnel Josué de Castro e para o Túnel da Abolição, e erro de propagação da vazão de 1,23% para o Túnel Josué de Castro e de 0,95% para o Túnel da Abolição. A lâmina máxima de alagamento e o volume de alagamento para ambos os túneis tiveram seus erros relativos com percentual abaixo de 10% entre o observado e o simulado, comprovando que a simulação foi bem-sucedida. Como proposição de técnica compensatória foram utilizados o emprego de um reservatório abaixo da pista para o Túnel Josué de Castro e a uma bacia de retenção para o Túnel da Abolição, porém em ambos os casos os empregos das técnicas foram insuficientes para resolver o problema de alagamento. Foi sugerido um sistema de bombeamento que não falhe, onde haja monitoramento do nível dos reservatórios e das bombas de desalagamento para que problemas de funcionamento sejam percebidos com antecedência e possam ser resolvidos antes de situações de alagamentos.

Palavras chave: Túneis, Alagamentos, Técnicas Compensatórias, SWMM.

ABSTRACT

In the last decades, Brazilian municipalities showed an accelerated and unplanned urbanization. In medium and large cities, densification and the intense urban rhythm give rise to the adoption of measures that facilitate and speed up displacement. New engineering, geological and geotechnical techniques enabled the construction of extensive urban tunnels in order to overcome geotopographic barriers and facilitate traffic with greater ease and fluidity. The city of Recife currently has 05 urban tunnels that are extremely important for city traffic, but the occurrence of flooding ends up making their original purpose unfeasible, which is to simplify urban displacement. The objective of this work is to insert the existing drainage system of the Josué de Castro and Abolição Tunnels through the use of the hydrological and hydraulic model, SWMM (Storm Water Management Model) developed by the U. S. EPA (United States Environmental Protection Agency), and to evaluate through of precipitation events, if the simulated results were consistent with the observed results, in addition to simulating for this model the implementation of a compensatory technique that minimizes the effects of flooding. For this, data from the local microdrainage system was obtained from the 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 rain and tidal curve. After the insertion of parameters and variables, the models were calibrated and validated, which showed satisfactory results, with small errors for surface runoff -0.6% and 0.0% respectively for the Josué de Castro Tunnel and for the Tunnel da Abolição and flow propagation error of 1.23% for the Josué de Castro Tunnel and 0.95% for the Abolition Tunnel. The maximum flood depth and flood volume for both tunnels had their relative errors with a percentage below 10% between the observed and the simulated ones, proving that the simulation was successful. As a proposal for a compensatory technique, the use of a reservoir below the track for the Josué de Castro Tunnel and a detention basin for the Abolition Tunnel were used, but in both cases the uses of the techniques were insufficient to solve the flooding problem. It was suggested a pumping system that does not fail, where there is monitoring of the level of the reservoirs and the relief pumps so that malfunctions are noticed in advance and can be resolved before flooding situations.

Keywords: Tunnels, Flooding, Compensatory Techniques, SWMM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa de urbanização brasileira	21
Figura 2 – Principais efeitos da urbanização nas variáveis hidrológicas.....	23
Figura 3 - Modificação geográfica da cidade do Recife com os aterramentos.....	25
Figura 4 – Médias mensais de precipitação no Recife.....	26
Figura 5 – Alagamento do Túnel Josué de Castro devido à precipitação de 13/06/2019: (A) imagem do interior do Túnel; (B) Imagem da sua saída para a Av. Antônio de Góes.....	27
Figura 6 – Túnel retratado por Da Vinci.....	29
Figura 7 – Túnel retratado por Henard.....	29
Figura 8 – Túnel retratado por Sant’Elia.....	29
Figura 9 – Ciclo Hidrológico.....	38
Figura 10 – Dinâmica de Escoamento na bacia, hietogramas e hidrogramas.....	40
Figura 11 – Correção dos Níveis do Porto na Cidade do Recife.....	48
Figura 12 - Estrutura do Túnel Prefeito Augusto Lucena: margem esquerda (A) e margem direita (B)	55
Figura 13 – Estruturas do Túnel Chico Science: a sua entrada (A) e a interligação com a Ponte Prof. Lima de Castilho (B).....	57
Figura 14 – Estruturas do Túnel Josué de Castro.....	58
Figura 15 – Passarela para travessia do Túnel Josué de Castro.....	58
Figura 16 – Estruturas do Túnel Felipe Camarão.....	60
Figura 17 – Canteiro Central do Túnel Felipe Camarão.....	60
Figura 18 – Estruturas do Túnel da Abolição.....	62
Figura 19 – Escadaria de Acesso para a Praça.....	62
Figura 20 – Áreas de contribuição para o Túnel da Abolição.....	65
Figura 21 – Localização do “Nó 23”	69
Figura 22 – Localização do “Nó 13”	71
Figura 23 – Precipitação ocorrida no dia 13/06/2019	73
Figura 24 – Precipitação ocorrida no dia 14/01/2022	75
Figura 25 - Gráfico com a relação precipitação x maré no dia da precipitação de 13/06/2019.....	75
Figura 26 - Gráfico com a relação precipitação x maré no dia da precipitação de 14/01/2022.....	75

Figura 27 – Localização do Túnel Josué de Castro e a delimitação das bacias inseridas na área de abrangência do estudo.....	76
Figura 28 - Sentido da drenagem implantada na Av. Herculano Bandeira e Antônio de Góes.....	78
Figura 29 - Jusante da Galeria da Av. Antônio de Góes na rua Cacilda Jolanda – Pina	79
Figura 30 - Jusante da Herculano Bandeira.....	79
Figura 31 - Jusante da Galeria da Av. República Árabe Unida.....	79
Figura 32 – Local onde existia o dispositivo de drenagem antes da construção do Túnel	80
Figura 33 – Único dispositivo de captação da Rua Nogueira de Souza.....	80
Figura 34 - Rua Arquiteto Augusto de Souza sem ponto de captação.....	81
Figura 35 - Rua Manoel Brito com duas captações.....	81
Figura 36 - Fotos da grelha de captação de água Túnel Josué de Castro lado esquerdo(A) e direito (B)	82
Figura 37 - Imagem do Túnel alagado às 17 horas do dia 13 de junho de 2019.....	82
Figuras 38 - Imagem do Túnel ainda alagado na manhã do dia 14/06/2019.....	76
Figura 39 – Área de alagamento resultante do evento extremo de precipitação do dia 13/06/2019.....	83
Figura 40 - Operação para rebaixamento do nível d’água dentro do túnel após precipitação do dia 13/06/2019.....	84
Figura 41 - Representação dos condutos de armazenamento do Túnel Josué de Castro.....	87
Figura 42 – Localização do Túnel da Abolição e a delimitação das bacias inseridas na área de abrangência do estudo.....	88
Figura 43- Sentido da drenagem implantada no Túnel da Abolição até o seu exutório.....	90
Figura 44 – Esquema de Drenagem do Reservatório do Túnel da Abolição.....	91
Figura 45 – Detalhe da Estação de Bombeamento - Perfil.....	91
Figura 46 – Detalhe da Estação de Bombeamento - Corte.....	92
Figuras 47 - Pontos de captação de água no interior do Túnel da Abolição lado esquerdo (A) e direito (B)	92
Figura 48 - Imagem da Praça central acima do Túnel da Abolição.....	93
Figura 49 - Alagamento durante a construção do Túnel da Abolição.....	93
Figura 50 - Alagamento do dia 28 de maio de 2015 devido à falha no sistema elétrico.....	93
Figura 51 - Alagamento do dia 24 de julho de 2015 no Túnel da Abolição	94

Figura 52- Alagamento do dia 02 de janeiro de 2016 no Túnel da Abolição	94
Figura 53 - Obras de recuperação para controle das infiltrações	94
Figura 54 - Alagamento do dia 13 de junho de 2019 no Túnel da Abolição.....	94
Figura 55 – Faixa interditada para requalificação das paredes do Túnel da Abolição	95
Figura 56 - Alagamento do dia 14 de janeiro de 2022 no Túnel da Abolição	95
Figura 57 - Alagamento do Túnel da Abolição devido à chuva ocorrida no dia 13 de junho de 2019.....	96
Figura 58 - Imagem da Área de Alagamento no Túnel da Abolição.....	96
Figura 59 - Representação das áreas de contribuição, do Nó 13 e da Bacia de detenção.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de vidas impactadas e ocorrências de alagamentos, enxurradas, inundações e chuvas intensas no período de 2010-2019 no Brasil.....	24
Tabela 2 - Classificação da intensidade da precipitação acumulada em 24 horas para Recife-PE	27
Tabela 3 - Classificação dos Túneis segundo a NFPA 502.....	31
Tabela 4 - Municípios de Pernambuco com instrumento legal regulador do serviço de manejo de águas pluviais em 2008.	36
Tabela 5 – Modelos Hidrológicos Aplicados a Drenagem Urbana.....	42
Tabela 6 – Resumo das características dos Modelos Hidrológicos.....	43
Tabela 7 – Parâmetros físicos e variáveis de entrada do modelo SWMM.....	45
Tabela 8 – Coeficiente n de Manning - escoamentos à Superfície Livre.....	46
Tabela 9 – Armazenamento em depressões.....	46
Tabela 10 – Lista de medidas de controle na fonte.....	50
Tabela 11 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Prefeito Augusto Lucena.....	56
Tabela 12 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Chico Science.....	57
Tabela 13 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Josué de Castro.....	59
Tabela 14 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Felipe Camarão.....	61
Tabela 15 – Resumo dos dados técnicos do Túnel da Abolição.....	62
Tabela 16 – Taxas de infiltração.....	67
Tabela 17 – Classificação das Técnicas Compensatórias.....	72
Tabela 18 – Resumo dos dados da maré no dia 13/06/2019	74
Tabela 19 – Resumo dos dados da maré no dia 14/01/2022.....	74
Tabela 20 – Síntese dos dados de entrada das áreas de contribuição do Túnel Josué de Castro.....	77

Tabela 21 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 13/06/2019 no Túnel Josué de Castro.....	85
Tabela 22 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 14/01/2022 no Túnel Josué de Castro.....	86
Tabela 23 – Comparativo entre os resultados obtidos para os eventos de precipitação do dia 13/06/2019 sem e com os Conduitos de Armazenamento.....	87
Tabela 24 – Síntese dos dados de entrada das áreas de contribuição do Túnel da Abolição....	89
Tabela 25 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 13/06/2019 no Túnel da Abolição.....	97
Tabela 26 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 14/01/2022 no Túnel da Abolição.....	97
Tabela 27 – Comparativo entre os resultados obtidos para os eventos de precipitação do dia 13/06/2019 sem e com a Bacia de detenção.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento (Brasília)
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CLP - Controlador Lógico Programável
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DER-PE – Departamento de Estradas de Rodagem (Pernambuco)
DHN-MB – Diretoria de Hidrografia e Navegação (Marinha do Brasil)
EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (Recife)
EPA - Environmental Protection Agency
ESIG – Informações Geográficas
FIFA – Federação Internacional de Futebol Associado
GSM - Global System for Mobile Communications
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF – Intensidade-Duração-Frequência
IDTP- Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
Iot - Internet das Coisas
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
LID – Low Impact Development
MDRU – Ministério do Desenvolvimento Regional e Urbano
MQTT – Message Queuing Telemetry Transport
NBR – Norma Brasileira
NFPA – National Fire Protection Association (USA)
PCSWMM – Personal Computer Storm Water Management Model
RFID - Identificador de Rádio Frequência
SbN - Soluções baseadas na Natureza
SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SMMM – Storm Water Management Model

SuDS – Sustainable Drainage Systems

US-EPA – U.S Environmental Protection Agency

WSN - Redes de sensores sem fio

WSUD – Water Sensitive Urban Desing

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa da Pesquisa	17
1.2 Objetivos	19
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	19
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 O processo de urbanização no mundo e no Brasil.....	20
2.2 Impactos da urbanização na drenagem urbana do Brasil.....	21
2.3 Impactos da urbanização na drenagem urbana Recife	24
2.4 Importância dos Túneis – Mundial/Brasil/Recife.....	28
2.5 Túneis e Drenagem	30
2.6 Gestão da drenagem urbana no Brasil e em Recife	33
2.7 Modelagem matemática como ferramenta auxiliar à gestão da drenagem urbana	37
2.7.1 <i>Simulação Hidráulico Hidrológica</i>	37
2.7.2 <i>Modelos Hidrológicos e suas classificações</i>	40
2.7.3 <i>Modelos Existentes na Literatura</i>	42
2.7.4 <i>O modelo SWMM (Storm Water Management Model)</i>	44
2.8 Soluções alternativas ou compensatórias para mitigação dos alagamentos em túneis urbanos	49
2.9 Sistemas de monitoramento para drenagem urbana.....	52
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA	54
3.1 Caracterização da área de estudo	54
3.1.1 <i>Túnel Prefeito Augusto Lucena</i>	54
3.1.2 <i>Túnel Chico Science</i>	56
3.1.3 <i>Túnel Josué de Castro</i>	58
3.1.4 <i>Túnel Felipe Camarão</i>	60
3.1.5 <i>Túnel da Abolição</i>	61
3.2 Modelagem.....	63
3.2.1 <i>Articulação com os órgãos gestores da drenagem urbana do Recife e de concessões dos Túneis</i>	63
3.2.2 <i>Seleção do modelo hidráulico-hidrológico a ser utilizado</i>	64
3.2.3 <i>Parâmetros e variáveis de entrada para o modelo</i>	64

3.2.3.1 Delimitação e caracterização das áreas de contribuição	65
3.2.3.2 Largura média das subáreas	65
3.2.3.3 Declividade superficial das áreas	66
3.2.3.4 Coeficiente de rugosidade de Manning	66
3.2.3.5 Altura do armazenamento em depressões.....	66
3.2.3.6 Percentual de áreas Impermeáveis das Bacias	67
3.2.3.7 Taxa de infiltração	67
3.2.3.8 Eventos de Precipitação.....	67
3.2.3.9 Curva de Maré.....	68
3.3 Montagem da rede	68
3.4 Calibração e Validação do Modelo Hidrológico-Hidráulico	69
3.5 Simulação de Técnica Compensatória em Drenagem Urbana	71
4 RESULTADOS	73
4.1 Estudo no Túnel Josué de Castro	76
4.1.1 Diagnóstico da Rede de drenagem existente	78
4.1.2 Resultados das Simulações no SWMM	84
4.1.3 Avaliação da utilização de medida compensatória	86
4.2 Estudo do Túnel da Abolição:	88
4.2.1 Diagnóstico da Rede de drenagem existente	89
4.2.2 Resultados das Simulações no SWMM	96
4.2.3 Avaliação da utilização de medida compensatória	98
4.3 Sistema de monitoramento.....	100
4.3.1 Análise financeira do sistema de automação	101
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	103
REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

O novo Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC, em sua sigla em inglês), publicado em 2022, afirma que, num cenário mundial, as populações urbanas cresceram mais de 397 milhões de pessoas entre 2015 e 2020, com mais de 90% desse crescimento ocorrendo em regiões menos desenvolvidas (IPCC 2022).

Segundo Governo do Brasil (2021) as projeções do próprio IBGE para o ano de 2021 e que são utilizadas para todos os cálculos do governo apontam para uma concentração da população em grandes municípios. Um total de 17 municípios possuem mais de 1 milhão de habitantes, sendo 14 deles capitais, ou seja, esse grupo concentra 21,9% da população (46,7 milhões de pessoas). Outros 49 municípios têm mais de 500 mil moradores e 326 possuem mais de 100 mil pessoas. O estado de Pernambuco possui 4,54% da população brasileira com aproximadamente 9 milhões de habitantes e o município do Recife, possui 1.653.46 habitantes, ocupando o nono lugar de município mais populoso do Brasil.

Nas grandes metrópoles o aumento da densidade populacional requer a implementação de equipamentos de engenharia, como túneis, pontes e viadutos, que possibilitem um deslocamento mais rápido das pessoas dentro da cidade.

“Novas técnicas de engenharia, geologia e geotécnica possibilitaram a construção de extensos túneis urbanos de forma a transpor barreiras geotopográficas e viabilizar o tráfego com maior facilidade e fluidez.” Igualmente, a crescente preocupação e consciência ambiental contemporânea estabelece um quadro de minimização de interferências inconsequentes ao meio natural. Assim, “O sentido de “atravessar” pode contribuir para manter grandes extensões (externas) de terreno intactas (ao menos na superfície)”. (MIYAMOTO, 2010, p. 22).

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

A cidade do Recife possui atualmente 05 túneis urbanos que são de extrema importância para o trânsito da cidade. De acordo com estudo feito pela Tom Tom Traffic em 2018 (JC ONLINE, 2019), a cidade ocupa o 10º lugar de 403 cidades no ranking de pior trânsito no mundo e a interrupção do tráfego em algum deles prejudicaria ainda mais a mobilidade.

Segundo o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (IDTP) 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 vivem o maior percentual da população (IDTP, 2017).

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. Pesquisas do IDTP mostram o impacto da mudança climática na mobilidade urbana, afirmando que os sistemas ficam vulneráveis aos longos períodos de temperaturas mais elevadas ou extremas, assim como ao aumento do volume, frequência e intensidade de chuvas (ITDP, 2017).

Assim, diante do cenário de incertezas das alterações climáticas e de todos os problemas gerados pelo processo de urbanização, o Brasil vem nas últimas décadas modificando a gestão da drenagem urbana.

As grandes mudanças em curso na área de saneamento no Brasil foram a publicação da Lei n.º 14.026/2020 e do Decreto Presidencial n.º 10.588/2020, somadas à concentração de diversas atribuições e políticas públicas em um único ministério, o Ministério do Desenvolvimento Regional e Urbano (MDRU), que demonstram a importância do tema para a União. Conseqüentemente, por serem eles os titulares do planejamento e da provisão de serviços nessas áreas, o assunto também é tratado com relevância pelos municípios e pelos estados, que são os responsáveis pelo fomento e execução de infraestruturas, gestão ambiental e da água (IPEA, 2022).

A implantação de modelos hidrológicos possibilita a mudança da visão mais localizada para uma visão mais panorâmica, proporcionando um entendimento geral da área, com a interligação dos sistemas, e a possibilidade de antecipação dos problemas de drenagem e conseqüentemente um melhor dimensionamento dos projetos.

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 Monteiro et al. (2021), diversos estudos demonstram que o SWMM é utilizado em diversas partes do mundo como aplicação para realização de planejamento, análise e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais, sistemas coletores de águas residuárias, tanto em áreas urbanas quanto em áreas não urbanas, sendo possível simular o comportamento hidrológico e hidráulico, além de visualizar resultados da modelagem em diversos formatos e de possibilitar a extração de gráficos e tabelas.

Para Ferreira (2022), a dinâmica da drenagem tradicional utiliza um sistema em rede que tem início na via pela sarjeta e continua nas galerias subterrâneas que encaminham os volumes de águas até o exutório, tendo como objetivo a remoção imediata das águas no meio urbano, assim conseqüentemente com o adensamento da ocupação urbana, todo o sistema deveria ser atualizado para que não houvesse sobrecarga do sistema com o excessivo escoamento superficial e suas conseqüências como alagamentos urbanos.

Segundo Santos e Mendes (2022), diversos países como o Brasil, não utilizavam sistemas planejados de drenagem urbana, o dimensionamento era feito a partir da eficiência hidráulica da quantidade de água, sem o controle da qualidade dessas águas, dos impactos nos corpos hídricos receptores e dos processos de recarga dos lençóis freáticos. O resultado disso é a necessidade de intervenções futuras que causam transtornos à população, risco de doenças, perda de vidas, além de danos ambientais e econômicos.

Segundo Christofidis (2019) recentemente no Brasil, houve um avanço das interrelações entre as medidas estruturais e os ecossistemas, denominado por soluções baseadas na natureza

(SbN) para a gestão da água, orientando para que as concepções dos planejamentos urbanos sejam compatíveis com a capacidade do ser humano, melhorando assim a interface entre os humanos e sua atuação no ambiente, com a ampliação do olhar e da consciência para respeitar os ecossistemas e os ambientes hídricos.

Além disso os sistemas de monitoramento são importantes e fundamentais para alertar sobre riscos de calamidade pública e emergências para que os órgãos responsáveis pela segurança sejam acionados e que sejam tomadas as medidas necessárias em função da segurança pública.

Assim, diante das características de uma cidade litorânea; do seu sistema de drenagem; e perante os efeitos das alterações climáticas, que afetam o nível médio do mar, os padrões de precipitação, e acentuam as possibilidades de alagamentos dos túneis, inviabilizando o seu propósito original, que é a simplificação do deslocamento urbano, pretende-se com esse trabalho contribuir para que sejam observadas e implementadas soluções alternativas para drenagem urbana como opção mais sustentável e para melhoria na fluidez do tráfego, principalmente em períodos de alta precipitação.

1.1 Justificativa da Pesquisa

Nas últimas décadas, o Estado de Pernambuco apresentou um processo acelerado e não planejado de urbanização. O crescimento econômico do Estado, principalmente com a ocorrência de grandes projetos como a implantação do polo petroquímico no Porto de Suape e o fato de Recife ter sido uma das sedes da Copa do Mundo, embora a Arena da Copa esteja em outro município da região metropolitana trouxeram repercussões para a cidade, para o seu planejamento, para sua gestão urbana e principalmente para a mobilidade urbana (LINS; BURGOS; MONTEIRO, 2017)

Até o ano de 2011 existiam apenas três túneis na cidade do Recife e posteriormente, foram projetados mais dois túneis, o Túnel Felipe Camarão, inaugurado em 2012, e o Túnel da Abolição, inaugurado 2015, que foram projetados a fim facilitar o escoamento do trânsito que havia crescido progressivamente devido a urbanização acelerada. Em épocas de chuva ou até mesmo de maré elevada, ocorrem o alagamento dos túneis, o que geralmente ocasiona sua interdição.

Como grande parte da cidade do Recife é composta por aterros executados sob áreas de alagamentos, o curso natural das águas das precipitações e das marés em sua preamar, que anteriormente seguiam um caminho para seu exutório, atualmente estão impedidos pelos aterros, e isso ocasiona o escoamento dessa água para outras áreas (SILVA JÚNIOR, 2015) e quando essas águas se direcionam para os túneis por exemplo, elas podem aumentar a pressão de empuxo nessas obras subterrâneas além de poder causar alagamentos (MIYAMOTO, 2010).

Segundo Verçosa (2019), devido a seus aspectos fisiográficos, Recife é uma cidade vulnerável às inundações e alagamentos. Isso se deve aos seguintes fatores: ser uma cidade litorânea; ser constituída geologicamente por rochas sedimentares; ter o relevo composto por uma planície rodeada por morros; apresentar um clima tropical quente e úmido, com alta pluviosidade no período chuvoso; ter tido um processo de urbanização desordenado, com a ocupação de locais impróprios para a habitação, tais como áreas inundáveis, de morros e de encostas e sem a implantação de sistemas de drenagem.

Além disso, 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 o período entre março e agosto o de 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.

Durante os últimos cinco anos houve 2 mortes por afogamento em dois túneis da cidade do Recife. Tal cenário indica a necessidade de investimento e monitoramento nos pontos de alagamentos para que essas situações sejam evitadas.

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, 2019).

Diante do exposto, a importância do presente trabalho será verificar o sistema de drenagem existente de dois túneis urbanos da cidade do Recife, sendo eles o Túnel Josué de Castro no bairro do Pina e do Túnel da Abolição no bairro da Madalena e verificar a possibilidade de emprego de técnicas compensatórias para mitigar os alagamentos desses equipamentos de engenharia, através da utilização do software SWMM, no qual será possível inserir o sistema de drenagem existente e verificar os resultados com o emprego de outras soluções de drenagem.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa identificar qual solução técnica compensatória em drenagem urbana seria viável para minimizar os problemas de alagamentos de dois Túneis Urbanos de uma cidade ao nível do mar.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo proposto, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Diagnosticar os túneis estudados, com base na evolução do processo de urbanização, situação da rede de drenagem existente e alagamentos ocorridos;
- Inicialmente avaliar o comportamento de cada túnel, com base na simulação hidráulico-hidrológica, utilizando os dados físicos locais e dos eventos chuvosos predefinidos;
- Verificar e propor uma alternativa compensatória visando à mitigação dos impactos dos alagamentos em cada túnel objeto de estudo e avaliar os resultados de seu emprego.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O processo de urbanização no mundo e no Brasil

O urbanismo, como é conhecido atualmente, surgiu entre o final do séc. XIX e o início do séc. XX, despontando que intervenções eram necessárias para as cidades que sofriam com o grande aumento da população, oriundas sobretudo do êxodo rural, e as quais apresentavam problemas de habitação, de insalubridade e de locomoção.

Porém, desde a antiguidade, os povos romanos primavam pela execução de uma cidade planejada ortogonalmente integradas por vias pavimentadas abastecida por aquedutos e rede de esgotos. O planejamento seguia as tradições etruscas e gregas, especialmente as das cidades helenísticas. A cidade helenística, como aponta Mumford, (1998 apud ALBUQUERQUE, 2020) é equipada com sistema sanitário, possui ordenação geométrica e tende a uma estética unificada. Hipódamo de Mileto (498-408 a.C.) foi um teórico da cidade grega, representante da antiga Escola Jônia.

Hipódamo foi o introdutor de uma planificação apoiada em ruas largas que se cruzavam em ângulos retos, como um tabuleiro de xadrez. Já o traçado em tabuleiro das cidades planejadas era uma tradição da Jônia, desde o sec. VII, aplicado às colônias gregas que se espalhavam pelo mundo mediterrâneo e outras regiões interioranas. O desenho reticulado designava áreas distintas adequadas ao modo de vida e divisão de classes gregas, estabelecendo as áreas comerciais, residenciais e as ágoras planejadas. Foi o primeiro arquiteto grego conhecido a conceber um planejamento urbano e a estrutura de uma cidade a partir de um ponto de vista que privilegiava a funcionalidade (ALBUQUERQUE, 2020).

Para Castro (2014), fazendo uma contraposição entre as dinâmicas das cidades da antiguidade greco-romana, as cidades do período medieval, na qual a sociedade estava em formação e a produção agrícola era a principal fonte de subsistência, estavam centralizadas no poder político que privilegiava o comércio e conseqüentemente havia a desarticulação da sua rede urbana.

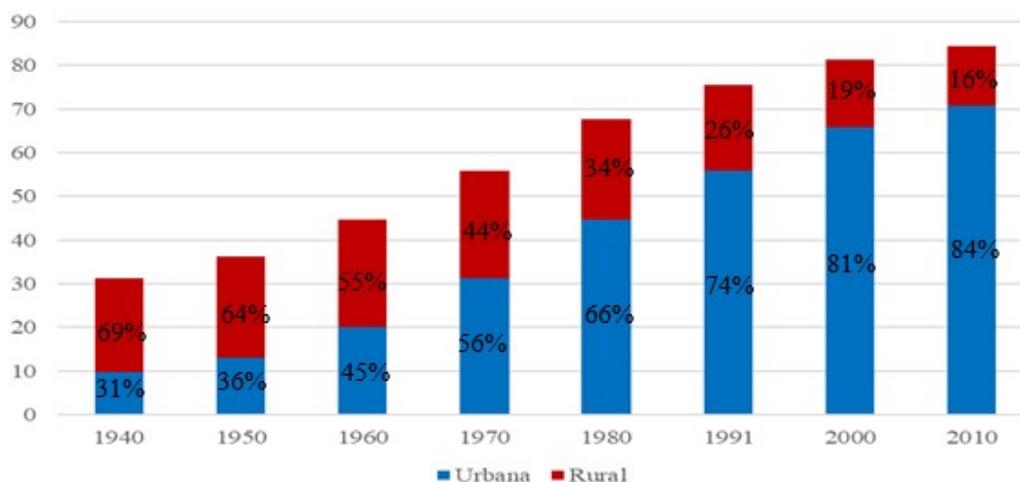
Considerando as questões políticas e econômicas, não podemos reconhecê-las como urbanas, pois as cidades, [...] não se distinguem do campo, como as cidades antigas - fornecedoras de serviços políticos e religiosos, reais e / ou imaginários, em troca

do excedente alimentar produzido pelo campo -, mas se constituíam acessórios da economia feudal (SPÓSITO, 1988, p. 31, apud Castro 2014, p.43).

Já o processo de urbanização no Brasil teve seu início no século XX, juntamente com o processo de industrialização, que foi responsável pelo deslocamento da população da área rural para a área urbana.

A Figura 1 a seguir mostra o gráfico com a evolução da taxa de urbanização brasileira desde o ano de 1940 até o ano de 2010 com os dados do último censo do IBGE (2010), onde observa-se que a taxa da população urbana em 2010 já superava 80% do percentual da população rural.

Figura 1 – Taxa de urbanização brasileira.



Fonte: Adaptado pela Autora IBGE (2010).

2.2 Impactos da urbanização na drenagem urbana do Brasil

O processo de desenvolvimento urbano geralmente resulta na redução das áreas em solo natural que são substituídas por solo impermeável, e com isso há o direcionamento das águas pluviais e dos esgotos para os corpos d'água adjacentes e para os canais de drenagem. A consequência dessa substituição gera um impacto grave no ciclo hidrológico. O aumento do fluxo de águas superficiais e a redução da recarga dos aquíferos podem ocasionar alterações

na drenagem, aumentando a possibilidade de ocorrência de enchentes e deslizamentos, conferindo riscos à saúde e à vida humana (BENINI; MEDIONDO, 2015).

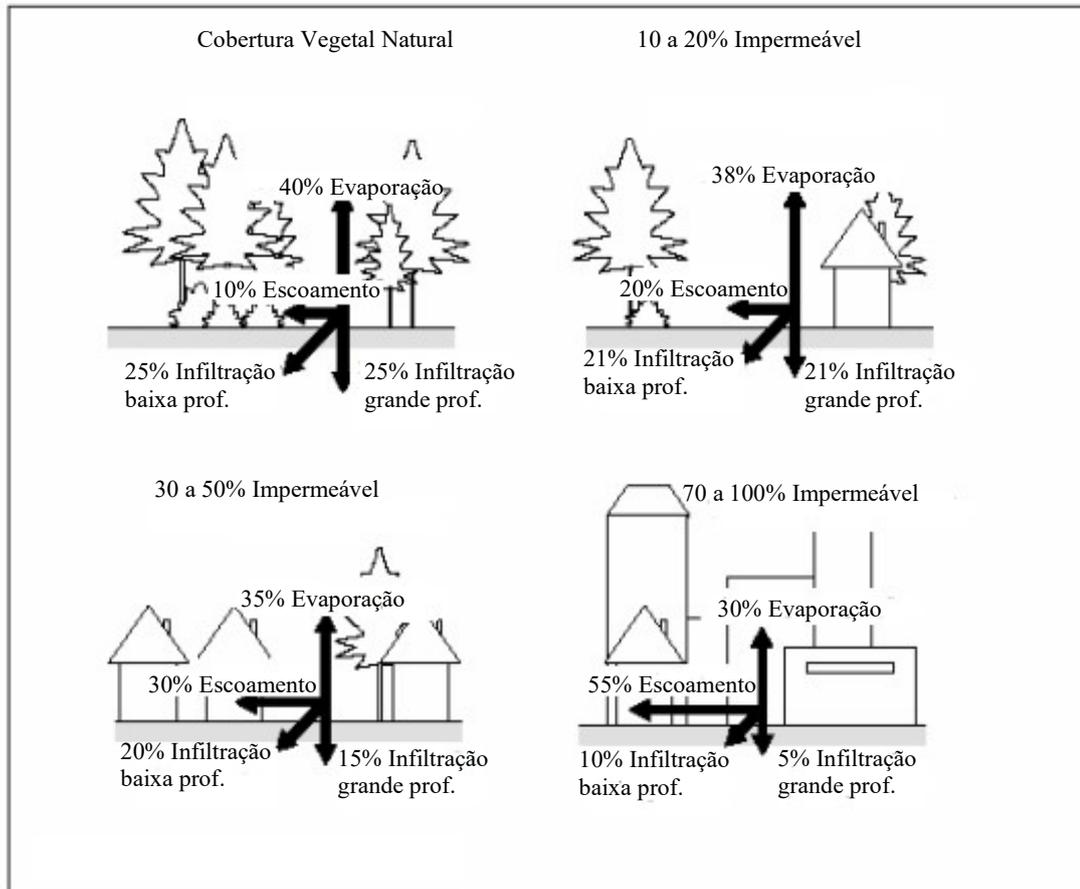
Segundo Mesquita e Lima Neto (2020), a urbanização sem planejamento impacta diretamente na hidrologia, pois o acréscimo da impermeabilização aumenta a quantidade e intensidade dos alagamentos e acentua o volume do escoamento superficial, podendo causar maiores transtornos à população local. Barros (2005) 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 das chuvas.

Ainda segundo o autor (BARROS, 2005) o processo de urbanização, sem planejamento e indisciplinado além de provocar altos índices de impermeabilização do solo da bacia, gera o crescimento do volume de sedimentos nos canais de drenagem, o lançamento de resíduos sólidos e lixo nos córregos e galerias, ocupações irregulares de áreas de várzea, erro de dimensionamento dos projetos de drenagem, muitas vezes transferindo alagamentos de uma área para outra, dentre outros aspectos.

Alagamento é definido como o acúmulo de água provocado por chuvas intensas, em áreas parcialmente ou totalmente impermeabilizadas, onde a rede de drenagem pluvial do local não supre a vazão escoada, por fatores de entupimento ou problemas no sistema de drenagem (CPRM, 2017).

A United States Environmental Protection Agency (US-EPA, 1999) apresentou em seu estudo: Resumo dos dados preliminares de Água de chuva urbana - Melhores Práticas de Gestão os efeitos da urbanização em algumas variáveis do ciclo hidrológico que se modificam em função do percentual da área impermeabilizada. Na Figura 2 a seguir, podemos observar o efeito da substituição da cobertura natural do solo pela urbanização sobre o ciclo hidrológico, à medida que o nível de impermeabilidade aumenta em uma bacia hidrográfica, mais chuva é convertida em escoamento, assim os efeitos são o aumento do volume do escoamento superficial, redução da recarga dos aquíferos, da evaporação e da intercepção. Nos locais onde a taxa de impermeabilização é de 70% a 100% o percentual de volume de escoamento superficial é de 55% do total precipitado, enquanto esse percentual era equivalente a apenas 10% da precipitação para a situação de cobertura natural do solo.

Figura 2 - Principais efeitos da urbanização nas variáveis hidrológicas



Fonte: Adaptado pela autora de US-EPA (1999)

É importante salientar a importância da pavimentação das vias urbanas como elemento de melhoria para a locomoção nas cidades, que com o aumento da população e consequentemente o aumento da quantidade dos automóveis que circulam pelas vias se faz necessária para a viabilização da locomoção. Em contrapartida, a impermeabilização generalizada dos solos pode representar um catalisador para a ocorrência de eventos de erosão, assoreamentos, alagamentos, inundações e proliferação de vetores de problemas de saúde pública. Assim, é imprescindível a existência de rede composta por sistemas de drenagem superficial aliada à drenagem subterrânea eficientes, que funcionarão como mecanismo de controle dos problemas oriundos da impermeabilização do solo no perímetro urbano das cidades (IBGE, 2010).

Dados do relatório no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) mostram os impactos dos fenômenos de alagamentos, enxurradas, inundações e chuvas intensas no Brasil. A Tabela 1 a seguir, mostra que no período de 2010 à 2019 houve um registro de 8462 ocorrências que implicaram em 43.155.915 de vidas afetadas. Sendo o grupo enxurradas com o maior número de ocorrências, enquanto o maior número de vidas impactadas foi decorrente das chuvas intensas.

Tabela 1 – Número de vidas impactadas e ocorrências de alagamentos, enxurradas, inundações e chuvas intensas no período de 2010-2019 no Brasil

Fenômenos	Vidas Impactadas	Ocorrências
Alagamentos	2.124.747	885
Enxurradas	14.804.237	3.637
Inundações	10.414.792	1.899
Chuvas Intensas	15.812.139	2.041
Total	43.155.915	8.462

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021)

2.3 Impactos da urbanização na drenagem urbana Recife

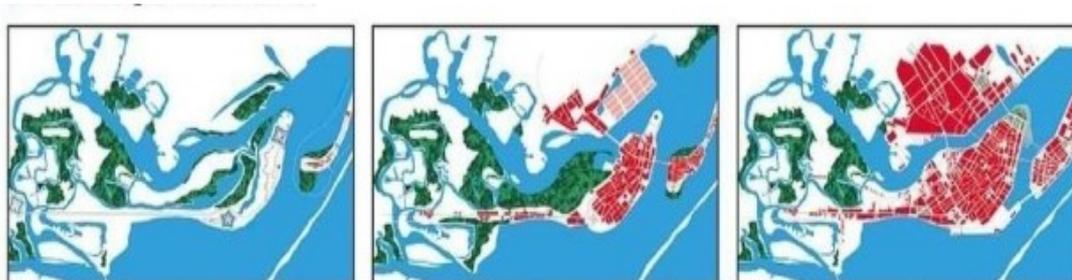
No ano de 2022 a cidade do Recife completou 485 anos. Em sua formação inicial ela se apresentava como uma estreita faixa de areia resguardada por uma linha de arrecifes, que são formações rochosas submersas situadas logo abaixo da superfície de águas oceânicas, e que formavam um ancoradouro.

À princípio havia a Vila de Olinda, que devido ao posicionamento e as características físicas favoráveis passou a abrigar um porto. O povoado tinha cerca de 200 habitantes, em sua maioria composta de marinheiros, carregadores e pescadores, e foi se desenvolvendo pelo seu entorno, principalmente devido à atividade comercial, até que no ano de 1537 foi registrada a Vila do Recife (DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2016).

Analisando mapas antigos elaborados pelo arquiteto Luiz Mota Menezes (DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2016), é possível perceber como o crescimento da cidade do Recife causou

impactos visíveis sobre os seus mananciais. Podemos observar na Figura 3 a seguir, como a cidade foi se expandindo devido a aterros e como a urbanização influenciou nesse cenário.

Figura 3 - Modificação geográfica da cidade do Recife com os aterramentos



1648 Os mapas elaborados pelo arquiteto José Luiz Mota Menezes mostram o avanço da cidade sobre os mananciais. Os pontos vermelhos são de construções.

1840 Neste mapa é possível perceber a multiplicação das construções na cidade. A ocupação na capital avança para as áreas dos Coelhos, Cabanga e Afogados.

1932 O crescimento da cidade sobre áreas aterradas é nítido. Na década de 1930, a taxa de urbanização do Recife era de aproximadamente 30%. No ano de 2016 era de 90%.

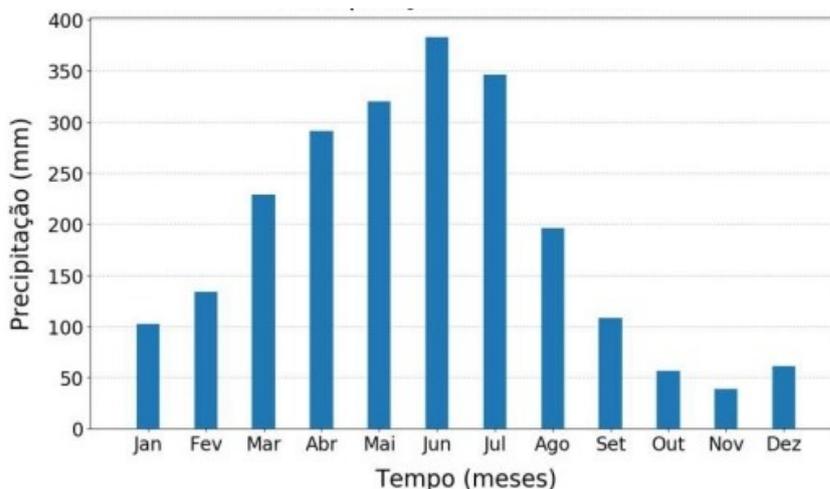
Fonte: Diário de Pernambuco (2016)

Como grande parte da cidade do Recife é composta por aterros executados sob áreas de alagamentos, o curso natural das águas de precipitações, que anteriormente seguiam quando a maré subia atualmente está impedido pelos aterros, e isso ocasiona o escoamento dessa água para outras áreas (SILVA JÚNIOR, 2015). Nessas condições, mesmo pequenos volumes pluviométricos são capazes de gerar alagamentos intensos em cidades urbanizadas, com diversos transtornos e possibilidade de desastres (TUCCI, 2005).

Os dados de precipitação na cidade no Recife não apresentam uma homogeneidade, essa inconstância temporal de precipitação é uma de suas características. Segundo SOUZA (2013 apud SILVA JÚNIOR, 2015), a região apresenta um clima tropical úmido, e a sua pluviosidade é bastante elevada, com média anual de precipitação de 2.303 mm e sua intensidade variando bastante ao longo dos anos.

Recife apresenta dois períodos climáticos no ano: o período seco e o chuvoso, que compreende os meses de março a agosto, com pluviosidade máxima de 391 mm no mês de junho. A Figura 4 a seguir, apresenta a distribuição das precipitações médias mensais da estação pluviométrica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no bairro do Curado (VERÇOSA, 2019).

Figura 4 - Médias mensais de precipitação no Recife



Fonte: Verçosa (2019)

Segundo Verçosa (2019), estudos comprovam que o aumento das precipitações intensas em alguns locais e de períodos mais longos de seca em outros, estão diretamente ligados ao aumento da temperatura da superfície global, assim diante das projeções de volume e de frequência dessas precipitações extremas, espera-se também o aumento dos riscos de alagamentos e inundações.

Os trabalhos dos autores Souza, Azevedo e Lincoln (2012) e Wanderley et. al (2018 e 2021) mostram a classificação do tipo de chuva colocadas no nível de análise diária para definir a partir de quantos milímetros uma chuva pode ser definida como um evento danoso na cidade do Recife. E estabeleceram que precipitações acima de 50 mm são classificadas como precipitações extremas, ou seja, chuvas muito fortes. A Tabela 2 a seguir, ilustra a intensidade das chuvas em milímetros e sua classificação correspondente.

Tabela 2 - Classificação da intensidade da precipitação acumulada em 24 horas para Recife-PE relacionada às ordens quantílicas

Classificação	Intensidade (mm)
Dia seco	$P < 2,2$
Chuva Muito Fraca	$2,2 \leq P < 4,2$
Chuva Fraca	$4,2 \leq P < 8,4$
Chuva Moderada	$8,4 \leq P < 18,6$
Chuva Forte	$18,6 \leq P < 55,3$
Chuva Muito Forte	$P \geq 55,3$

Fonte: Adaptado pela autora de Souza, Azevedo e Lincoln Araújo (2012)

A Figura 5 a seguir, mostra o alagamento do Túnel Josué de Castro (A) e os transtornos ocasionado no trânsito devido a interdição do mesmo (B) durante o evento de chuva do dia 13/06/2019 que foi de 149,2 mm, ou seja, uma chuva com quase o triplo do valor da classificação para chuva muito forte, que é de 55,3 mm.

Figura 5 – Alagamento do Túnel Josué de Castro devido à precipitação de 13/06/2019: (A) imagem do interior do Túnel; (B) Imagem da sua saída para a Av. Antônio de Góes



Fonte: FOLHA PE (2019)

Além das precipitações, a cidade do Recife também sofre a influência do nível do lençol freático, visto que a citada cidade é costeira e sofre variações entre 2,0 m e 10,0 m do nível médio dos mares, assim, o comportamento do nível do mar em relação aos sistemas de drenagem é fator determinante para o eficiente desempenho durante os eventos extremos de chuva, sobretudo nos locais com drenagem por gravidade (SILVA JÚNIOR 2014, 2015).

Mesmo em dias sem a ocorrência de chuvas as marés são capazes de inundar áreas. Esse tipo de ocorrência é conhecido como inundação de dia de sol e consiste no alagamento de áreas baixas costeiras em razão do retorno da maré através da drenagem (SWEET; PARK, 2014; SADLER et al., 2017). Em casos mais graves as conforma es de alinhamento da Lua com o Sol provocam marés astron micas mais elevadas, conhecidas como marés de sizígia. (CABRAL; ALENCAR, 2005).

De acordo com a Diretoria de Hidrologia e Navega o do Ministério da Marinha (DHN-MB, 2020) na cidade do Recife as marés de sizígia podem alcançar na preamar 2,70 m e na baixa-mar -0,10 m, resultando em uma amplitude máxima da ordem de 2,80 m. O zero da Marinha está 1,122m abaixo do zero do IBGE e 0,25m acima do zero da Prefeitura da Cidade do Recife. Durante as preamares haverá uma diminui o na diferença de altitude entre a área a ser drenada e o local para onde a água irá fluir, o que pode deixar o sistema mais lento.

2.4 Importância dos Túneis – Mundial/Brasil/Recife

Os túneis e constru es subterrâneas sempre tiveram finalidades importantes, e grande parte das cidades modernas transformou o subterrâneo em um recurso indispensável.

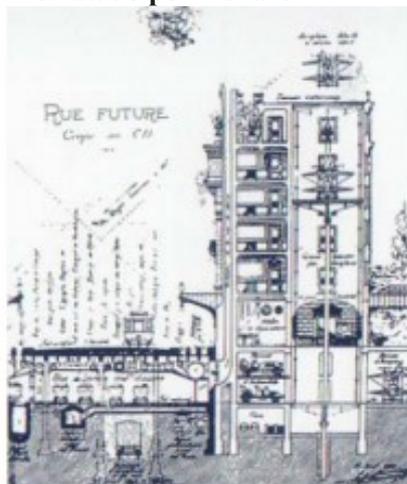
Historicamente vários artistas representaram através de suas obras os túneis de tempos longínquos. As Figuras 6, 7 e 8 exibidas posteriormente, mostram respectivamente: uma obra de Da Vinci (1490) que retratou um túnel da cidade de Londres; uma obra de Henard (1903) que desenhou o espaço subterrâneo da França e uma obra de Sant’Elia (1913) que retratou o estilo da arquitetura internacional modernista entre os anos de 1925 e 1965. O primeiro túnel da história da engenharia moderna construído sob o leito do rio T misa em Londres (1843) pelo engenheiro civil francês Marc Isambard Brunel, é a própria antítese da limitada conceitua o de que um túnel se define exclusivamente como uma passagem através de morros (SILLOS 2006, apud MIYAMOTO 2010).

Figura 6 – Túnel retratado por Da Vinci



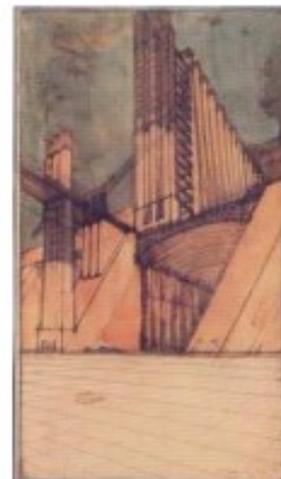
Fonte: The elements of urban form through history. London (THAMES; HUDSON, 1992, apud MIYAMOTO, 2010).

Figura 7- Túnel retratado por Henard



Fonte: Offre et demande d'espace souterrain in Von Meiss, (PIERRE; RADU, p. 31, 2004, apud MIYAMOTO, 2010).

Figura 8 – Túnel Retratado por Sant'Elia



Fonte: International Style: Modernist Architecture form 1925 to 1965. (KÖLN; BENEDIKT TASCHEN VERLAG GMBH, p. 20, 1998, apud MIYAMOTO, 2010).

No Brasil, os túneis rodoviários mais antigos foram construídos na cidade do Rio de Janeiro. O túnel da rua Alice também chamado de Túnel Rio Comprido-Laranjeiras, inaugurado em 1887, é o túnel mais antigo da cidade, ligando os bairros do Rio Comprido (Rua Barão de Petrópolis) e Laranjeiras (Rua Alice), através do morro dos Prazeres. Até à inauguração do Túnel Rebouças e do Túnel Santa Bárbara, era a única via para quem pretendia transitar entre a Zona Norte e a Zona Sul sem passar pelo centro da cidade. A sua galeria foi ampliada em 1952, passando a ter duzentos e vinte metros de comprimento por dez de largura. (LUCENA, 2018).

Se fizermos referência entre túneis e água, remetemos a um dos túneis mais famosos, o Eurotúnel, que liga que liga Folkestone, Kent, no Reino Unido, com Coquelles, em Pas-de-Calais, perto de Calais, no norte da França, sob o Canal da Mancha no Estreito de Dover. No seu ponto mais baixo, atinge 75 metros de profundidade. Ele tem mais de 50 quilômetros (38 deles subaquáticos) e é um meio de transporte para passageiros, carros e carga. (REIG FABADO, 2008).

Quando possível, a locação de um túnel deve ser acima do nível da água, caso contrário, deve ser esperada a entrada d'água através do teto e das paredes laterais. Em certas condições, pode ser necessária a aplicação de métodos especiais à construção, como o da couraça, ou a aplicação de rebaixamento do nível d'água.

Na cidade de Recife, que é o objeto de estudo desta dissertação, existiam três túneis até o ano de 2011, sendo o Túnel Prefeito Augusto Lucena, o primeiro a ser construído no ano de 1997, e cuja principal função é desafogar o trânsito das vias arteriais nos arredores do bairro de Boa Viagem e facilitar o acesso ao bairro de Setúbal. O segundo túnel construído foi o Chico Science no ano de 2000. Ele foi concebido com a função de descongestionar um trecho crítico no encontro da Av. Abdias de Carvalho com a Av. Beira Rio e Rua da Benfica. E no ano de 2007 foi inaugurado o túnel Josué de Castro, conhecido como o túnel do Pina, que foi a primeira obra da Via Mangue, importante via expressa de ligação da zona sul ao centro (FONTE, 2011).

Até que foi escolhida para ser uma das cidades sede da Copa do Mundo de 2014 promovida pela Federação Internacional de Futebol (FIFA), e com isso sofreu considerável impacto urbanístico, além da implantação do polo petroquímico no porto de SUAPE, da instalação da fábrica da JEEP e de abrigar um dos maiores Parques tecnológicos do Brasil, o Porto Digital.

Foram projetados mais dois novos túneis para facilitar o escoamento do trânsito: o Túnel Felipe Camarão com 300 m de comprimento, cuja obra foi subsidiada pelo Governo do Estado de Pernambuco para reduzir os congestionamentos no cruzamento das Avenidas Mascarenhas de Moraes e Maria Irene e o Túnel da Abolição com 287 m de comprimento, localizado no cruzamento da Rua Real da Torre com a Rua da Benfica, que fez parte da implantação do corredor leste-oeste, para facilitar a conexão da área central da cidade do Recife com os municípios a oeste da Região Metropolitana do Recife.

2.5 Túneis e Drenagem

De acordo com a National Fire Protection Association (NFPA-502, 2008) as categorias dos túneis são determinadas conforme o comprimento específico, existindo cinco categorias de túneis conforme ilustrado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Classificação dos Túneis segundo a NFPA 502

Classificação	Comprimento (m)
Categoria X:	Menos de 90 m
Categoria A:	A partir de 90 m
Categoria B:	A partir de 240 m e onde a distância máxima de qualquer ponto no interior do túnel até um local seguro não exceda 120m
Categoria C:	A partir de 300 m
Categoria D:	A partir de 1000m.

Fonte: NFPA 502 (2008)

Ainda segundo a NFPA 502 (2008) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua Norma Brasileira (NBR) nº 15661 existem parâmetros de segurança e conforto que devem ser seguidos nos projetos dos túneis (ABNT, 2019).

Devido às características de umidade em túneis, em geral, há forte tendência à minação. Além disso, a presença de água num túnel aumenta a insalubridade nesse ambiente. Por isso, é particularmente importante destacar uma diretriz preconizada pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR-15661, 2019):

“Para garantir o desempenho, o revestimento dos túneis, bem como as demais estruturas a ele vinculadas, deve-se considerar, nas fases de projeto, construção e operação/manutenção, medidas e soluções que visem eliminar ou controlar patologias como infiltrações e falhas nos sistemas de impermeabilização, corrosão de armadura, fissuras em geral, falhas em juntas e seus elementos de vedação e proteção, falhas e degradação de elementos auxiliares de suporte do revestimento, falhas e degradação de elementos de drenagem do maciço, lixiviação do concreto, degradação de elementos de ligação no caso de revestimentos segmentados, degradação de elementos de fixação e suporte de equipamentos, entre outras (...)” .

Ainda de acordo com a ABNT NBR-15661/2019, devem estar estabelecidos no projeto de um túnel rodoviário a coleta, armazenagem e descarga de efluentes que se façam presentes no seu interior.

Por se apresentarem num ambiente mais restrito, a coleta das águas provenientes de drenagem seria mais fácil do que em ambientes abertos, como por exemplo em estradas.

Para o U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration (2009) apud Miyamoto (2010), há basicamente dois tipos de sistemas de proteção à água: com dreno (aberto) e sem dreno (fechado).

- Aberto:

“O sistema de proteção à água do tipo aberto permite que a umidade do solo penetre no sistema de drenagem do túnel. [Neste caso,] normalmente a área da abóbada é provida com um sistema de proteção à umidade que forma um guarda-chuva de proteção que drena a água de maneira que ela penetre nas cavidades em volta do arco em um sistema (de drenagem) que se localiza na base das laterais dos túneis na face exterior. O sistema aberto é frequentemente utilizado em túneis em rocha onde as taxas de infiltração são baixas. Este sistema é normalmente instalado entre o apoio inicial (revestimento inicial) do túnel e o apoio final (revestimento permanente) do túnel. O sistema aberto geralmente permite um apoio final mais econômico já que a pressão hidrostática é grandemente reduzida ou eliminada” (U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration (p 1-14, 2009) apud Miyamoto (2010).

- Fechado:

“O sistema de proteção à água do tipo fechado, frequentemente referenciado como sistema em reservatórios, se estende por todo o perímetro do túnel e objetiva excluir completamente a [possibilidade de] penetração da umidade do solo no sistema de drenagem do túnel. (...) O apoio final deve ser projetado para receber toda a pressão hidrostática da água. Este sistema é aplicado frequentemente em solos permeáveis onde o descarte da umidade do solo no túnel poderia ser significativa [e poderia modificar o nível do] lençol freático (...)” (U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration (p. 1-14, 2009) apud Miyamoto (2010).

Ou seja, o sistema de proteção à água é usado para permitir ou não que a água proveniente da umidade do solo penetre através de aberturas no subsolo. Segundo Miyamoto (2010), vários estudos realizados em diversos países (Alemanha, Austrália, China, EUA etc.), limitam a 110mL/m² /dia, a taxa de infiltração permitida em túneis, onde a maior preocupação é como evitar que esta quantidade relativamente grande de água, repleta de material poluente advindas dos próprios automóveis, seja despejada diretamente na rede de drenagem da cidade, sem qualquer tipo ou nível de tratamento.

Por fim, destaca-se que:

“A drenagem deve ser prevista em túneis para atender às águas de superfície, assim como recolher águas oriundas de infiltração (vazamento). Entretanto, as linhas de drenagem e os poços coletores e as bombas devem ser dimensionados para acomodar a intrusão da água e/ou água utilizada em combate a incêndio. Eles devem ser desenhados de forma que o fogo não se espalhe através do sistema de drenagem em tubos adjacentes, através do isolamento. Por razões de segurança, PVC, fibra de vidro em tubulações ou outros materiais combustíveis não devem ser utilizados” (U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration (p. 1-14, 2009), apud Miyamoto (2010).

2.6 Gestão da drenagem urbana no Brasil e em Recife

Segundo diretrizes da política urbana do Plano Diretor de Drenagem Urbana da cidade do Recife as estratégias de ordenamento da estrutura urbana, da forma e dos usos da cidade deve ser realizada de modo sustentável, e o sistema de drenagem faz parte do conjunto de melhoramentos públicos existentes em uma área urbana, assim como as redes de água, de esgotos sanitários, de cabos elétricos e telefônicos, além da iluminação pública, pavimentação de ruas, guias e passeios, parques, áreas de lazer, e outros, porém em relação aos outros melhoramentos urbanos, ele tem uma particularidade: o escoamento das águas das tormentas sempre ocorrerá, independente de existir ou não sistema de drenagem adequado, e a qualidade desse sistema determinará se os benefícios ou prejuízos à população serão maiores ou menores.

Durante o desenvolvimento das cidades a priorização para as infraestruturas de habitação e saneamento tiveram baixa valorização no planejamento urbano. Atualmente essa deliberação está nos custando a realização de mais obras de infraestrutura e com custos mais elevados, sobretudo no segmento de drenagem em águas pluviais. Nos últimos cinquenta anos o debate sobre a sustentabilidade e o apelo à qualidade de vida, correlacionados com os altos custos fixos e operacionais das infraestruturas tradicionais, abriram a oportunidade para se promover soluções sustentáveis, o que implica num desafio não apenas para os executores de obras e prestadores de serviços, como também para os municípios, os estados e a União, que possuem a função de planejamento e execução de políticas e aperfeiçoamento de seus instrumentos norteadores (SANTOS; MENDES, 2022).

Segundo Carmo e Marchi (2013), a ideia de planejamento, juntamente com o advento da Constituição Federal de 1988, obrigou os municípios a implementarem mudanças importantes, notadamente através do planejamento urbano como princípio constitucional, que teve como objetivo ordenar o desenvolvimento das funções sociais das cidades e garantir o bem-estar de seus habitantes, e posteriormente a regra constitucional, foi regulamentada com a edição do Estatuto das Cidades e da Lei de Saneamento nº 11.445/2007, que engloba a drenagem urbana.

A Constituição Federal em seus artigos 4º, 6º e 8º relata os objetivos relativos à função social, sustentabilidade ambiental e integração interurbana:

Art. 4º Constituem objetivos relativos ao cumprimento do princípio da função social da cidade os seguintes:

III - assegurar a todos e às gerações futuras o exercício do direito à cidade sustentável sob as óticas urbana, ambiental, econômica e social, conservada e integrada, abrangendo o direito à terra urbana, à moradia com adequadas condições de habitabilidade, às infraestruturas de saneamento e de mobilidade urbana, especialmente no que diz respeito à mobilidade ativa e aos transportes públicos, aos serviços públicos, assim como à cultura, ao trabalho e ao lazer;

Art. 6º Constituem objetivos relativos ao cumprimento do princípio da sustentabilidade ambiental ecologicamente equilibrada os seguintes:

I - melhorar a integração das funções dos elementos naturais – rios, córregos, canais e sistema de áreas verdes – com os elementos estruturadores do território, tais como sistema viário, transporte coletivo, infraestrutura de saneamento básico e serviços públicos em geral;

Art. 8º Constituem objetivos relativos ao cumprimento do princípio da Integração metropolitana e intraurbana os seguintes:

II - promover melhorias nos sistemas de fluxos de pessoas e bens, e as integrações físico-funcionais que ultrapassem os aspectos de atração socioeconômica e cultural, e impliquem gestões conjuntas e articuladas dos sistemas de bacias hidrográficas, sistemas de transporte público e de saneamento básico (BRASIL, 1988).

Mudanças na área do Saneamento vieram com a Lei 14.026/2020 que dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de

Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. E com o Decreto Presidencial no 10.588/2020 que estabelece regras para a alocação de recursos federais para a concretização dos objetivos estabelecidos no novo marco legal do saneamento, somadas à concentração de diversas atribuições e políticas públicas em um único ministério, o Ministério do Desenvolvimento Regional e Urbano (MDRU).

O novo marco legal do saneamento sancionado em julho de 2020 tem o objetivo de universalizar e qualificar ainda mais a prestação de serviço no setor de saneamento, onde a meta é garantir que 99% da população brasileira tenha acesso à água potável e 90% ao tratamento e a coleta de esgoto até 2033. Entre as principais mudanças para o novo marco temos:

- A obrigatoriedade dos processos licitatórios: A nova lei extingue os contratos firmados sem licitação entre municípios e empresas estaduais, e exige a abertura de licitação para concorrer à vaga de prestadores de serviço públicos e privados;
- A participação da iniciativa privada na prestação do serviço de saneamento: A nova lei permite que empresas privadas entrem no processo de licitação para prestar serviços de saneamento, juntamente com as companhias estaduais;
- Cobrança sobre os serviços de limpeza urbana: A partir do Novo Marco, as cidades devem começar a cobrar tarifas e taxas sobre os serviços de poda de árvores, varrição de ruas, limpeza de bocas de lobo, abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos;
- Abolição dos lixões em todo território nacional: As capitais têm até 2021 e os municípios com menos de 50 mil habitantes tem até 2024 para cumprir a norma. A solução para o problema seria o investimento em modelos mais sustentáveis, como coleta seletiva e aterros sanitários.;
- A Agência Nacional de Águas (ANA) passa a regular o setor: A ANA passa a editar normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. Cabe ao Ministério da Economia destacar servidores de órgãos e de entidades da administração pública federal para a ANA;
- Pequenos municípios podem contratar o serviço de água e esgoto em bloco.

Segundo dados da última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (IBGE, 2010), e que está em atualização, apenas 18% dos municípios brasileiros apresentam instrumentos reguladores do serviço de manejo de águas pluviais, e a Região Nordeste é a que apresenta o menor percentual de municípios, apenas 9,6%. No Estado de Pernambuco dos 185 municípios do Estado, dos 68 planos se encontravam aprovados pelas câmaras municipais de vereadores, apenas 14 Planos estavam finalizados sendo eles: Amaraji, Cabo de Santo Agostinho, Caruaru, Custódia, Gravatá, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Paudalho, Petrolândia, Quipapá, Recife, Santa Cruz do Capibaribe, São José do Egito, São Lourenço da Mata (Tabela 4).

Tabela 4 - Municípios de Pernambuco com instrumento legal regulador do serviço de manejo de águas pluviais em 2008.

Instrumento regulador do serviço de manejo de águas pluviais	Municípios	
	Unidades	%
Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais	4	2
Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano	14	8
Plano Diretor de Recursos Hídricos	1	1
Plano Diretor Integrado de Saneamento Básico	3	2
Outros	8	4
Total	27	15

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e de Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008 (2010).

Os planos de gestão são muito importantes, pois possibilitam uma gestão eficiente da drenagem urbana municipal, porém para implementá-los é indispensável a vontade política para o desentrelaçamento no desenvolvimento do setor. O plano diretor de drenagem urbana existente na cidade do Recife foi elaborado pela Encibra em 1978, e foi atualizado pela Lei nº 18.770, publicada no Diário Oficial do Recife em 30/12/2020 e republicado com alteração pela Lei complementar nº 02/ 2021 em 24/04/2021, que explicita em seu texto:

“Art. 164. A política urbana de meio ambiente, sustentabilidade, enfrentamento às mudanças climáticas e de defesa civil observará as seguintes diretrizes:

IX - Controlar a expansão urbana informal sobre áreas de fragilidade ambiental e unidades protegidas;

XX - Promover a conscientização pública e a educação para a preservação e proteção ambiental;

XXVIII - Elaborar e implementar plano de adaptação às mudanças climáticas;

XXXV - Promover medidas e ações para a drenagem urbana com o intuito de reduzir os impactos ambientais dos alagamentos, enchentes e inundações;

XXXVI - Promover a ampliação e o aperfeiçoamento dos sistemas de coleta, tratamento e disposição final de esgoto.” (Lei complementar nº 02/ 2021 em 24/04/2021)

2.7 Modelagem matemática como ferramenta auxiliar à gestão da drenagem urbana

Grande parte dos problemas relacionados à drenagem urbana como a contaminação do solo e de mananciais superficiais e subterrâneos, às perdas econômicas e sociais, ao aumento da frequência de inundações e alagamentos, e a perda de saúde dos ecossistemas urbanos, advém de alterações de qualidade e quantidade do regime hidrológico devido a interferência humana.

Comumente, na engenharia de recursos hídricos a utilização dos modelos hidrológicos funciona como ferramentas que auxiliam num melhor entendimento dos processos hidrológicos existentes na bacia, tais como: precipitações extremas, modificações do uso e ocupação do solo, escoamento superficial, entre outros. Assim, as entidades gestoras de sistemas de saneamento podem utilizá-la para planejar e validar projetos do sistema de drenagem. (VERÇOSA, 2019).

2.7.1 Simulação Hidráulico Hidrológica

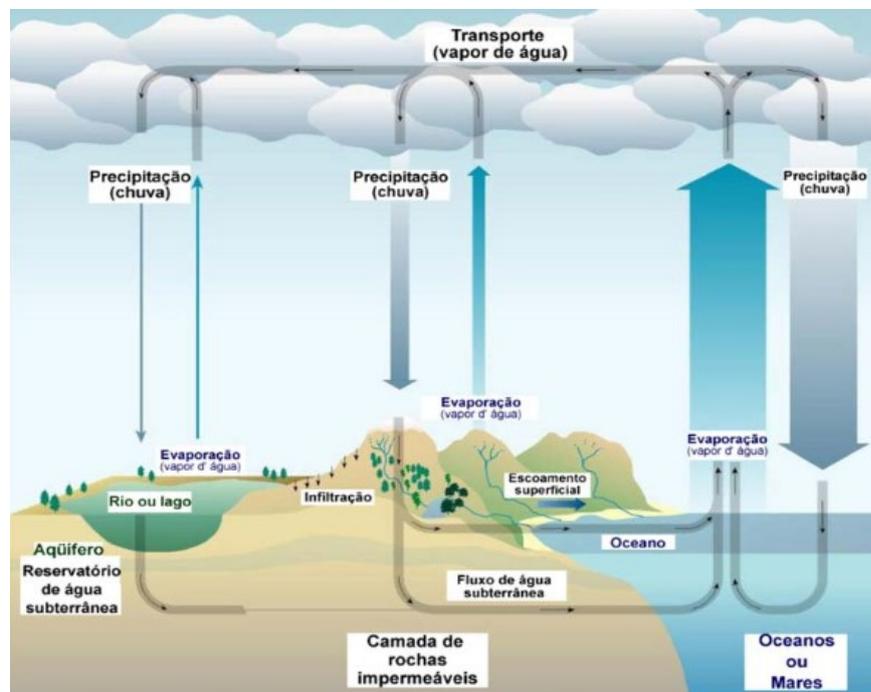
O ciclo hidrológico é o conceito central da hidrologia, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes.

A Figura 9 apresentada a seguir, ilustra a representação do ciclo hidrológico que envolve os processos a seguir:

- Evaporação das águas dos mares e rios;

- Condensação, que é a formação do vapor;
- Precipitação, que pode ocorrer em forma de chuva, neve, granizo etc. Parte da precipitação evapora antes de atingir a superfície terrestre;
- Infiltração de parte da precipitação que chega ao solo, que pode infiltrar atingindo os aquíferos (percolação), escoando lentamente até os rios e lagos (escoamento subterrâneo)
- Escoamento superficial é a parte da precipitação que escoam superficialmente para os rios, lagos e oceanos através da gravidade.

Figura 9 – Ciclo Hidrológico



Fonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2022)

Segundo Barrella (2001), a bacia hidrográfica pode ser definida como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático. As águas superficiais que escoam convergem pelas partes mais baixas para o ponto de saída que é o seu exutório. Uma bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias e cada uma das sub-bacias pode ser considerada uma bacia hidrográfica.

“Cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. Portanto, os termos bacia e sub-bacias hidrográficas são relativos. (TEODORO et al., p. 139, 2007).

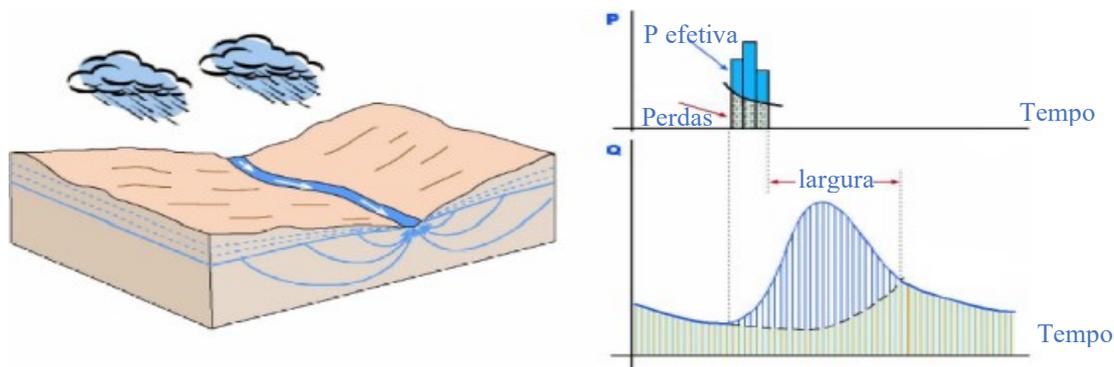
As características principais da bacia hidrográfica são área de drenagem, comprimento do rio principal, declividade do rio e declividade da bacia. A área de uma bacia hidrográfica pode ser estimada a partir da delimitação dos divisores da bacia em um mapa topográfico.

O tempo de concentração é o tempo gasto que uma gota de chuva que precipita no ponto mais remoto da bacia leva para atingir seu exutório. As características das bacias referentes ao comprimento e a declividade do curso d'água principal, e a declividade média da bacia, influenciam diretamente no tempo de viagem da água ao longo do sistema. O tempo de concentração de uma bacia diminui com o aumento da declividade e aumenta com o aumento da rugosidade e do comprimento do curso d'água principal (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

O monitoramento da precipitação é de extrema importância para estudos de modelagem hidrológica com diferentes enfoques, desde disponibilidade hídrica à poluição dos corpos d'água receptores de efluentes, tendo em vista que essa é uma variável de entrada nos modelos. O monitoramento de vazões no exutório da área de contribuição também é fundamental para compreender o comportamento hidrológico de uma bacia, porém deve ser aliado ao adequado monitoramento pluviométrico para se ter um conjunto de informações mais completo sobre os processos ocorridos na área (SILVA; CARVALHO; KOIDE, 2021).

Hidrograma é a representação gráfica da variação da vazão na seção de saída (exutório) da bacia hidrográfica ao longo do tempo, em razão da precipitação ocorrida sobre a bacia, ou seja, é a quantidade de água que passou por uma seção do rio ao longo do tempo. Na Figura 10 apresentada posteriormente, observa-se a dinâmica de escoamento de água ao corpo hídrico receptor por superfícies vertentes e sistema subterrâneo de drenagem na bacia. No ponto mais à jusante (mais baixo), encontra-se o exutório da bacia por onde passa todo o escoamento. O hietograma consiste na representação gráfica da precipitação com relação ao tempo.

Figura 10 – Dinâmica de Escoamento na bacia, hietogramas e hidrogramas.



Fonte: Souza, Gonçalves e Goldenfum (p. 5, 2007).

No período chuvoso, o escoamento superficial representa a maior parte do volume escoado, esgotando-se pouco depois (período do tempo de concentração) do final da precipitação. O escoamento subterrâneo é o que garante a vazão no rio durante o período de estiagem. Com isto, o hidrograma corresponde à integração de todos os processos do ciclo hidrológico entre a precipitação e vazão na bacia hidrográfica. Segundo Fraga (2013), o aumento significativo do volume de água pluvial escoada forma os pontos de alagamento e/ou, por muitas vezes, os alagamentos urbanos.

2.7.2 Modelos Hidrológicos e suas classificações

Os primeiros modelos hidrológicos computacionais começaram a ser criados na década de 60, com o início da utilização dos computadores. Desde então, inúmeros modelos foram propostos para a simulação da ocorrência da água nas diversas fases do ciclo hidrológico.

Comumente, a modelagem hidrológica é aplicada na avaliação do impacto da urbanização sobre o escoamento superficial (SURIYA; MUDGAL, 2012). Uliana et. al (2019) e Parisi (2019) concordam que os modelos de simulação combinados com o monitoramento hidrológico servem como eficientes ferramentas no prognóstico aos efeitos causados às bacias hidrográficas pelo crescimento urbano, auxiliando com o planejamento adequado das cidades, além disso, a parametrização e a análise da performance de um modelo hidrológico permitem sua consolidação para avaliação de estratégias de gerenciamento de recursos hídricos e para previsão de eventos extremos.

Segundo Tucci (1998, apud COLLODEL 2009), os modelos de gerenciamento dos recursos hídricos podem ser modelos de comportamento, que apresentam o comportamento de um sistema, prenunciando a resposta deste quando estiver sujeito a diferentes entradas ou a modificações em suas características; modelo de otimização que busca as melhores soluções para problemas específicos da Engenharia de Recursos Hídricos e os modelos de planejamento, que buscam soluções hidráulicas, hidrológicas e econômicas, englobando também considerações socioeconômicas e ambientais.

Existem várias classificações dos modelos hidrológicos, eles podem ser classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), pelo tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), pela forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), pela existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e pela existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Ainda de acordo com Almeida e Serra (2017), os modelos estocásticos utilizam as séries de vazão observadas em pontos específicos, e a partir de certas hipóteses sobre seu comportamento permitem que estas sejam representadas por um dos diversos tipos de modelos de séries temporais normalmente utilizados; e os modelos determinísticos, representam o sistema físico natural, ou seja, os processos do ciclo hidrológico, de modo que, a partir de dados de entrada, tais como os volumes precipitado e evaporado, condições iniciais de umidade do solo, cobertura vegetal, entre outros, possam ser fornecidas as séries de vazões, são conhecidos como modelos chuva-vazão.

Segundo Machado (2005), em um modelo conceitual as equações utilizadas para a modelagem do sistema são fundamentadas em leis que regem os vários processos do sistema e no modelo empírico há um ajuste das respostas desejadas através de uma equação que em geral não tem relação com as leis que regem os processos do sistema.

Os modelos são contínuos quando procuram reproduzir o comportamento contínuo de um sistema ao longo do tempo de acordo com um conjunto de equações, geralmente, diferenciais, enquanto em um sistema discreto a resposta é representada por uma sequência cronológica de

eventos, e cada evento que ocorre num instante de tempo (CARVALHO, 2011, apud PEREIRA 2015).

Os modelos concentrados têm como variável principal o tempo, eles não levam em consideração a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo. As variáveis de chuva, evaporação, vazão e outras são consideradas em termos médios da bacia, já os modelos distribuídos, além de considerar como cada fenômeno ocorre ao longo do tempo, também consideram as variações espaciais, ou seja, considera como cada um desses processos acontece entre os elementos de área das bacias (MACHADO, 2005).

Por fim, os modelos são ditos estacionários ou dinâmicos de acordo com a existência da dependência temporal, são estacionários quando um conjunto de dados de entrada produz um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo, e dinâmicos quando utilizam o resultado de uma interação como entrada para uma próxima iteração (CÂMARA; MONTEIRO, 2003).

2.7.3 Modelos Existentes na Literatura

Atualmente existe uma quantidade expressiva de modelos hidrológicos à disposição dos profissionais da área de recursos hídricos. Na tabela 5 estão apresentados os principais modelos utilização com agência criadora, o ano de criação e o tipo de modelagem.

Tabela 5 – Modelos Hidrológicos Aplicados a Drenagem Urbana

Código	Nome	Agência Criadora	Ano
MOUSE	Modelling of Urban Sewer	DHI	1985
CHM	Chicago Hydrograph Method	City of Chicago	1959
ILLUDAS	Illiois Urban Drainage Area Simulator	III. Water Survey	1972
STORM	Storage, Treatment, Overflow Runoff Model	Corps os Engineers	1974
TR-55	SCS Technical Release 55	SCS	1975
DR 3M	Distributed Routing Rainfall-Runoff Model	USGS	1978
IPH-2	Instituto de Pesquisas Hidráulicas	IPH-UFRS	1987
PCSWMM	Personal Computer Storm Water Management Model	CHI Water	1972
SWMM	Storm Water Management Model	EPA	1971

Fonte: VIESSMAN e LEWIS (2002), modificado pela autora

A concepção e existência de diversos modelos pode ser explicada pela diferença de capacidade de simulação entre eles. Na tabela 6 a seguir, são apresentadas um resumo das características de alguns dos modelos hidrológicos citados anteriormente, entre eles o SWMM, que foi o escolhido para o estudo devido ser um software que dispõe de seu código de fonte aberto e no qual a partir dos dados dispostos possuía a maior abrangência e flexibilidade para a realização das simulações necessárias.

Ele é um software tão fácil e amigável que a Computational Hydraulics International Water (CHI Water), a partir do código aberto desenvolveu o programa PCSWMM, uma interface de melhor navegabilidade que possui aplicações em consonância com o SWMM, além de integrar ferramentas de geoprocessamento voltadas à gestão de águas.

Tabela 6 – Resumo das características dos Modelos Hidrológicos

Capacidades de Simulação	Modelos				
	CHM	ILLUDAS	STORM	IPHS2	SWMM
Múltiplas sub-bacias	x	x	–	x	x
Entrada de diversos hietogramas	x	–	–	x	x
Evaporação	x	–	x	–	x
Degelo	–	x	x	–	x
Escoamento de base	x	x	–	x	x
Escoamento de superfície de áreas impermeáveis	x	x	x	x	x
Escoamento de superfície de áreas permeáveis	x	x	x	x	x
Áreas diretamente conectadas	–	x	–	–	x
Balanço Hídrico entre eventos	x	–	x	x	x
Escoamento em sarjetas	x	x	x	–	x
Propagação em galerias	x	x	x	x	x
Múltiplas seções transversais	–	–	–	–	x
Escoamento sob pressão	–	–	–	–	x
Derivação	–	x	x	x	x
Estações-elevatórias	–	x	–	–	x
Armazenamento	–	x	x	x	x
Cálculo de nível	–	x	–	x	x
Cálculo de velocidades	–	x	–	x	x
Simulação contínua	–	–	x	x	x
Escolha do passo de tempo	x	x	–	x	x
Cálculo de projetos	x	x	–	x	x
Código computacional disponível	x	x	x	x	x

Legenda: x Permite a simulação

– Não Permite a simulação

Fonte: MACHADO (1981); VIESSMAN e LEWIS (2002), apud COLLODEL (2009)

2.7.4 O modelo SWMM (*Storm Water Management Model*)

O Storm Water Management Model – SWMM (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - SWMM), da U.S. Environmental Protection Agency- EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas, pode ser utilizado para a simulação de um único evento chuvoso, bem como, para uma simulação contínua de longo prazo (LENHS/UFPB, 2010).

O SWMM considera distintos processos hidrológicos que produzem escoamentos procedentes de áreas urbanas. Entre estes se encontram (LENHS/UFPB, 2010):

- Precipitações variáveis no tempo.
- Evaporação de águas empoçadas.
- Acumulação e degelo da neve.
- Interceptação de precipitações por armazenamento em depressões.
- Infiltração das precipitações em camadas do solo não saturadas.
- Percolação da água infiltrada nas camadas dos aquíferos.
- Troca de fluxo entre os aquíferos e o sistema de drenagem.
- Modelagem do fluxo superficial por meio de reservatórios não-lineares.
- Captação e retenção das precipitações e dos escoamentos em diversos dispositivos de baixo impacto.

As suas variáveis de entrada descrevem quantitativamente um fenômeno que varia no tempo e no espaço e que ocorre durante o início do processo da modelagem, e as variáveis de saída representam um produto do cálculo que se julga relevante e surgem como parte dos cálculos, representando conceitos que se deseja explicitamente indicar no modelo. Na Tabela 7 a seguir, estão apresentados os parâmetros físicos de entrada do SWMM.

Tabela 7 – Parâmetros físicos e variáveis de entrada do modelo SWMM

Parâmetros	Sigla	Unidade
Área	A	ha
Largura	W	m/s
Declividade	D	%
Áreas Impermeáveis	AI	%
Coefficiente de Manning (n) - Área impermeável	NI	m ^{-1/3} s
Coefficiente de Manning (n) - Área permeável	NO	m ^{-1/3} s
Profundidade de armazenamento em depressões - Área impermeável	PI	mm
Profundidade de armazenamento em depressões - Área permeável	PA	mm
Taxa de Infiltração	I	mm ⁻¹ h

Fonte: Adaptado pela autora de Roesner (2001) apud Alisson Silva (2018)

A área é a grandeza igual à medida da superfície de uma figura plana, no SWMM deverá ser colocado a área de cada sub-bacia em acres ou hectares.

Largura característica do escoamento superficial (pés ou metros) é estimada dividindo a área da sub-bacia pelo valor médio do comprimento máximo de escoamento superficial. O comprimento máximo de escoamento superficial é o comprimento do caminho percorrido pela água superficial do ponto mais longe da sub-bacia até o ponto onde o escoamento é canalizado. Comprimentos máximos correspondentes a vários caminhos de escoamento superficial devem ser calculados, assim como a média correspondente. Estes caminhos devem refletir escoamentos lentos, tal como sobre superfícies permeáveis, mais do que escoamentos rápidos sobre terreno pavimentado. Ajustes deverão ser feitos para o parâmetro largura de forma a representar bem os hidrogramas de escoamento medidos (LENHS/UFPB, 2010).

Declividade média da sub-bacia é apresentada em porcentagem e é calculada pela razão entre a diferença de cota entre dois pontos (os topos dos poços de visita) e a distância entre eles.

A determinação do percentual das áreas impermeáveis das sub-bacias é definida pela razão entre a área de solo impermeável pela área total das sub-bacias.

O coeficiente de Manning é indicado tanto para a parcela da sub-bacia permeável, quanto para a impermeável, ele é estimado com base nas características do recobrimento do solo. Na Tabela 8 a seguir, encontra-se os tipos de superfícies e seus respectivos valores de coeficientes.

Tabela 8 – Coeficiente n de Manning - Escoamentos à Superfície Livre

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto Liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,050
Solos Cultivados cobertos de resíduos < 20 %	0,060
Solos Cultivados cobertos de resíduos > 20 %	0,170
Campo natural	0,130
Gramma curta, pradaria	0,150
Gramma densa	0,240
Gramma-bermudas	0,410
Floresta - vegetação rasteira leve	0,400
Floresta - vegetação rasteira densa	0,800

Fonte: Adaptado pela Autora de McCuen, R. et al. (1996), Hydrology, FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC, apud LENHS/UFPB (2010).

A profundidade do armazenamento também é indicada na parcela permeável e impermeável da sub-bacia (pol ou mm), ela consiste nas condições de retenção da água da chuva na superfície do solo, o manual do SWMM (LENHS/UFPB, 2010) indica os valores apresentado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Armazenamento em depressões

Superfície	Valores
Superfícies Impenetráveis	1,27 – 2,54 mm
Gramados	2,54 – 5,08 mm
Pastagem	5,08 mm
Serrapilheira	5,08 mm

Fonte: ASCE, (1992). Design e Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York, NY, apud LENHS/UFPB (2010).

A taxa de infiltração da chuva para a zona não saturada do solo da subárea permeável pode ser descrita no SWMM mediante três modelos diferentes:

- Modelo de infiltração Horton;
- Modelo de infiltração Green-Ampt;
- Modelo de infiltração baseado na Curva Número do SCS.

A equação do método de Horton assume que a infiltração, se inicia com uma taxa l_0 e decresce exponencialmente com o tempo t , conforme observa-se nas Equações 1 e 2. Depois de um tempo variável, quando a umidade do solo atinge um grau elevado (próximo da saturação), a taxa de infiltração converge para um valor constante l_b .

$$l_t = l_b + (l_0 - l_b) \exp(-k \times t) \quad (\text{Equação 1})$$

$$k = (l_0 - l_b) F_c \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

l_t – taxa de infiltração no tempo (mm/h);

l_b – taxa de infiltração final (mm/h);

l_0 – taxa de infiltração inicial (mm/h);

t – tempo (h);

k – coeficiente de decaimento (1/s).

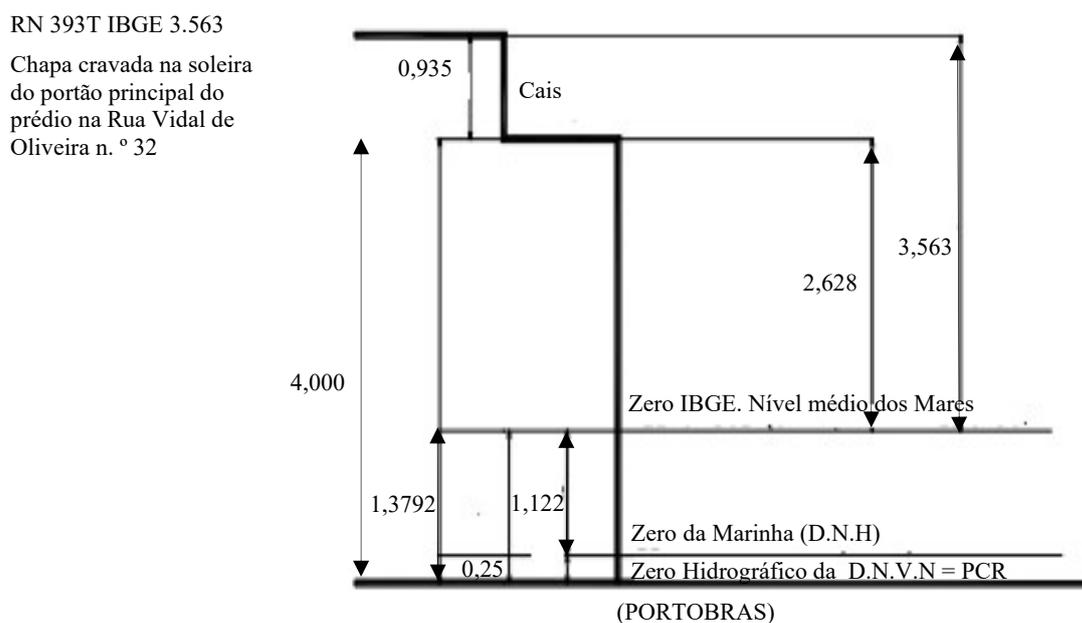
F_c - é dado como a área sob a curva da taxa de infiltração, obtida a partir da integração da equação da curva ajustada, variando no intervalo de tempo de realização do ensaio.

Além dos parâmetros citados anteriormente, o SWMM necessita das séries variáveis da curva da maré e da precipitação para os dias de análise. O modelo SWMM oferece 3 opções de formatos para os dados de chuva que são: pela intensidade, em que cada valor de precipitação é uma taxa média durante uma unidade de tempo, em (pol/h) ou (mm/hora); pela lâmina de precipitação que é dado em (pol) ou (mm) ou pelo valor acumulado que representa a precipitação acumulada que tem ocorrido desde o início da última série de valores de zero (em polegadas ou milímetros).

A curva da maré descreve como a altura da maré varia em um nó exutório a cada hora do dia. Há uma diferença entre os zeros do IBGE, da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha – DHN e a cidade do Recife.

Conforme ilustração realizada por Silva Alisson (2018), a Figura 11 esclarece as diferenças dos RN do IBGE, Marinha e Prefeitura do Recife. O RN de partida para o esquema foi a cota 3,563 m do IBGE na chapa cravada na soleira do portão principal do prédio na Rua Vital de Oliveira, 32. O zero da Marinha está 1,122 m abaixo do zero do IBGE e 0,25 m acima do zero da Prefeitura da Cidade do Recife.

Figura 11 – Correção dos Níveis do Porto na Cidade do Recife



Fonte: SILVA ALISSON (2018)

O SWMM é um modelo usado em diversos estudos, além do estudo já citado realizado por Collodel (2009) que utilizou o modelo hidrológico SWMM para avaliar diferentes níveis de detalhamento na representação da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, na cidade de São Carlos em São Paulo, submetida ao processo de transformação chuva-vazão, o estudo de Monteiro et. al (2021) que realizou uma pesquisa sobre a eficácia da simulação do software em 614 artigos, sendo 2 em periódicos, concluindo que o software era confiável como ferramenta de simulação, possibilitando uma melhor compreensão do sistema e podia ser utilizado como ferramenta de gestão para a drenagem urbana.

Na cidade do Recife temos vários estudos que utilizou o modelo SWMM: Parisi (2019), que usou o modelo para analisar a capacidade de infiltração para atenuação de alagamento de um ponto crítico na cidade do Recife; Allison 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; Silva Júnior, Silva e Cabral (2017), que estudaram alternativas compensatórias para o controle de enchentes em áreas urbanas com influência das marés em Recife; Silva Júnior (2015) que estudou sobre alternativas compensatórias 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.

2.8 Soluções alternativas ou compensatórias para mitigação dos alagamentos em túneis urbanos

As medidas de controle podem ser estruturais e não estruturais, elas têm como objetivo diminuir os efeitos causados pelas enchentes, inundações e alagamentos.

As medidas de controle podem ser estruturais, quando envolvem obras de engenharia, ou não estruturais, como zoneamento, sistemas de alerta e seguros. Um planejamento consistente deve contemplar uma integração harmoniosa entre medidas estruturais e não estruturais, e destas com o desenvolvimento urbano, seguindo sempre o critério fundamental de que não se deve ampliar a cheia natural do curso d'água (WALESH, 1989; TUCCI; GENZ, 1995; DECINA; BRANDÃO, 2016).

Cabe ao órgão público de controle, identificar e escolher qual medida deve ser implementada, se serão adotadas medidas estruturais (aplicação de estruturas físicas de controle) ou não-estruturais (normas, incentivos fiscais) avaliadas frequentemente em três escalas: na fonte, na microdrenagem ou na macrodrenagem.

Para Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal - ADASA (2018), as medidas de controle na fonte podem ser classificadas sendo por infiltração ou por armazenamento de acordo com o processo de abatimento de vazão, nas quais podem, caso necessário, funcionar ao mesmo tempo. Esses dispositivos são ainda considerados como técnicas compensatórias estruturais de controle na fonte, as quais podem ser localizadas e lineares, elas são as mais utilizadas na atualidade. Na Tabela 10 apresentada a seguir, encontra-se a lista das principais medidas de controle na fonte.

Tabela 10 – Lista de medidas de controle na fonte

Obra	Característica Principal	Função	Efeito
Pavimento poroso	Pavimento com camada de base porosa como reservatório.	Armazenamento temporário da chuva no local do próprio pavimento. Áreas externas ao pavimento podem também contribuir.	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado pelo pavimento e por eventuais áreas externas
Trincheira de infiltração	Reservatório linear escavado no solo preenchido com material poroso.	Infiltração no solo ou retenção, de forma concentrada e linear da água da chuva caída em superfície limítrofe.	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em áreas adjacentes
Vala de infiltração	Depressões lineares em terreno permeável	Infiltração no solo ou retenção, no leito da vala, da chuva caída em áreas marginais	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em áreas vizinhas
Poço de infiltração	Reservatório vertical e pontual escavado no solo	Infiltração pontual na camada não saturada e/ou saturada do solo, da chuva caída em áreas limítrofes	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em áreas contribuintes ao poço
Micro-reservatório	Reservatório de pequenas dimensões tipo "caixa d'água" residencial	Armazenamento temporário do esgotamento pluvial de áreas impermeabilizadas próximas	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial de áreas impermeabilizadas
Telhado reservatório	Telhado com função de reservatório	Armazenamento temporário da chuva no telhado da edificação	Retardo do escoamento pluvial da própria edificação.
Bacia de detenção	Reservatório vazio (seco)	Armazenamento temporário e/ou infiltração no solo do escoamento superficial da área do contribuinte	Retardo e/ou redução do escoamento da área contribuinte
Bacia de retenção	Reservatório com água permanente	Armazenamento temporário e/ou infiltração no solo do escoamento superficial da área do contribuinte	Retardo e/ou redução do escoamento da área contribuinte
Bacia subterrânea	Reservatório coberto, abaixo do nível do solo	Armazenamento temporário do escoamento superficial da área do contribuinte	Retardo e/ou redução do escoamento da área contribuinte
Condutos de armazenamentos	Condutos e dispositivos com função de armazenamento	Armazenamento temporário do escoamento no próprio sistema pluvial	Amortecimento do escoamento afluente a macrodrenagem
Faixas gramadas	Faixas de terrenos marginais a corpos de água	Área de escape para enchentes	Amortecimento de cheias e infiltração de contribuições laterais

Fonte: Silveira (2002) apud Silvia Júnior (2015)

Para Souza, Gonçalves e Goldenfum (2007), as medidas de controle na microdrenagem consistem no manejo de águas pluviais provenientes de loteamentos ou conjunto de lotes. São práticas que geralmente são empregadas para restaurar os aspectos hidrológicos, como a utilização de bacias de retenção e banhados artificiais para controle do pico de cheia, ou viabilizar o escoamento mais rápido para jusante pela ampliação/reparo de dutos pluviais.

Já a macrodrenagem refere-se à aplicação de medidas em cursos d'água urbanos como o planejamento de uso e ocupação do solo, com definição de áreas de preservação e de desenvolvimento residencial, comercial ou industrial, embasado em características de solo, vegetação, topografia e hidrografia da região, e a implantação de políticas em nível municipal ou de bacia com vistas à aquisição pelo poder público de áreas pertencentes às várzeas de inundação, para implantação de áreas de lazer/recreação, diminuindo prejuízos à população e ao ecossistema ribeirinho após cada evento. (SOUZA, GONÇALVES; GOLDENFUM 2007).

A nova percepção de manejo das águas no meio urbano se fortaleceu na década de 1990, quando os sistemas naturais de drenagem, o próprio solo da bacia hidrográfica e a vegetação passaram a ser mais frequentemente considerados nos projetos de controle de águas pluviais (Souza, Cruz e Tucci, 2012). A drenagem, assim repensada, não se caracterizou apenas como alternativa para resolução dos problemas urbanísticos e ambientais, mas também como um modelo financeiramente mais viável de ser implantado e mantido. Os sistemas que mais evoluíram, nessa abordagem, segundo Souza, Cruz e Tucci (2012), foram: o modelo Low Impact Development (LID), mais comumente utilizado nos Estados Unidos e na Nova Zelândia (Fletcher et al., 2015), e reconhecido no Brasil como Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (Souza e Tucci, 2005; Tavanti e Barbassa, 2012; Amanthea e Nascimento, 2015); o modelo australiano Water Sensitive Urban Design (WSUD); e o britânico Sustainable Drainage Systems (SuDS).

Um meio de se avaliar o desempenho dessas medidas antes de sua implantação é a utilização de modelos hidrológicos e hidráulicos. Com a utilização dos softwares de modelagem, é possível criar cenários e simular eventos hidrológicos para que se possam avaliar as consequências da implantação das medidas de controle (MONTEIRO et. al 2021).

2.9 Sistemas de monitoramento para drenagem urbana

Assim como os problemas de tráfego e de segurança, os sistemas de drenagem também deveriam ser monitorados. Segundo Silva Júnior et al., (2021) e INMET (2021) as inundações, enchentes e alagamentos são responsáveis por um número elevado de perdas humanas e materiais todos os anos. É usual o monitoramento do nível dos rios através de sensores de radar e de nível com tempos pré-configurados. Entretanto, para os pontos de alagamentos não há um monitoramento constante, integral e em tempo real.

Há um tempo, a Internet das Coisas (IoT) surgiu como uma infraestrutura global de computação por meio da adoção de tecnologias que transmitem e convertem dados obtidos de diferentes dispositivos, incluindo sensores digitais que permitem a troca autônoma de informações úteis por meio de tecnologias como: identificação por radiofrequência (RFID), redes de sensores sem fio (WSN) e computação em nuvem (FAROOQ et al., 2015).

As inovações tecnológicas existentes já contribuem para o funcionamento das cidades e elas apresentam recursos que não poderão ser ignoradas por profissionais que atuam na disciplina de planejamento urbano. Entre elas: o monitoramento de tráfego, que apresentam rastreamento e relatórios de tráfego em tempo real; câmeras inteligentes, que têm sido essenciais na detecção de acidentes rodoviários, violações, buracos e até mesmo a causa raiz dos incêndios; dados do sensor em tempo real e inteligência artificial avançada, onde os gêmeos digitais criarão melhor resiliência na infraestrutura da cidade inteligente, incluindo detecção precoce e resposta a eventos de grande escala, como desastres naturais ou ‘ciberataques’; entre outros (FORBES, 2020).

Assim, podemos utilizar a tecnologia à favor da drenagem urbana. O principal desafio ao projetar o hardware numa plataforma específica para controle de alagamentos é decidir quais sensores são mais adequados para monitorar a água. Os sensores de nível mais comum incluem tecnologias de: ultrassom, radar de onda guiada e transdutores de pressão (SILVA JÚNIOR et al., 2021).

Após a identificação dos pontos de alagamento e com o monitoramento em tempo real desses pontos, será possível realizar através de plataformas o acompanhamento dos níveis de água, através de sensores. Assim, com os sensores instalados, pode-se programar para que os mesmos gerem alertas a partir de um determinado nível de água, comunicando aos órgãos responsáveis sobre situações de riscos, para que os mesmos atuem com maior brevidade e agilidade.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentados a área de estudo e a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Caracterização da área de estudo

Para realização desta dissertação, foram estudados inicialmente os 5 túneis urbanos existentes da cidade do Recife, sendo eles o Túnel Augusto Lucena no bairro de Boa Viagem, o Túnel Chico Science no bairro da Ilha do Retiro, o Túnel Josué de Castro no bairro do Pina, o Túnel Felipe Camarão no bairro do Jordão e o Túnel da Abolição no bairro da Madalena, e que serão descritos a seguir. Porém as simulações se detiveram aos túneis Josué de Castro e da Abolição, por apresentarem os dados suficientes para tais simulações.

3.1.1 Túnel Prefeito Augusto Lucena

O túnel denominado Prefeito Augusto Lucena foi construído no ano de 1997 no bairro de Boa Viagem, ele fez parte do projeto de canalização do Rio Jordão e tinha a intenção de desafogar o trânsito de vias arteriais importantes na ligação da Zona Sul ao Centro do Recife (LINS, BURGOS; MONTEIRO, 2017).

Ele é constituído por duas estruturas paralelas, a estrutura marginal esquerda, e a estrutura marginal direita, em sentidos de tráfego inversos, divididas pelo Canal do Rio Jordão. Sua fundação funciona como um radier, acrescido de abas externas para combater as ações de subpressão (FONTE; VITÓRIO 2011).

As estruturas são seções retangulares em placas de concreto e pavimento de concreto, e apresentam extensão de 279,5 m para a marginal esquerda e 314,5 m para a marginal direita. Possuem larguras equivalentes a 10,9 m, onde a pista representa a largura de 9,0 m, em módulos de 4,0 m x 2,25 m e espessura máxima de 0,16 m, divididas por juntas longitudinais e transversais. As juntas são constituídas de mistura de cimento Portland e cimento asfáltico na razão em peso de 50% (FONTE; VITÓRIO 2011).

Ao longo da extensão de ambas as seções há uma variação de altura pelo fato de serem semienterradas e estarem localizadas abaixo do Viaduto Tancredo Neves e apresentarem uma laje rebaixada que funciona como entrada de ar, sendo 4,0 m a altura máxima permitida (FONTE e VITÓRIO 2011). A Figuras 12 mostra ambas as estruturas do Túnel Prefeito Augusto Lucena da margem esquerda (A) e da margem direita (B).

Figura 12 - Estrutura do Túnel Prefeito Augusto Lucena: margem esquerda (A) e margem direita (B)



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o Relatório de especificações das bombas dos Túneis realizado pela REAL ENERGY por solicitação da Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana – EMLURB (2019), o sistema de drenagem possui captação de apenas 2 locais do ponto mais baixo de cada lado do túnel, e é constituído por duas bombas modelo BCS 320 e marca Schneider, uma em cada poço, com potência de 4,0 cv Schneider cada e mais uma bomba reserva de 3 cv, que trabalham com o recalque de reservatórios existentes no ponto mais baixo de cada estrutura do túnel (quatro no total). O quadro resumo com os dados técnicos do Túnel Augusto Lucena pode ser verificado na Tabela 11, apresentada a seguir.

Tabela 11 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Prefeito Augusto Lucena

Descrição	Marginal Esquerda / Direita
Ano de construção	1997
Localização	Boa Viagem
Tipo do Túnel	Urbano
Extensão	279,5 m / 314,5 m
Largura	10,9 m
Altura limite	4 m
Classificação NFPA	categoria C
Sentido do Fluxo	Sentido duplo (Leste-Oeste)
Material	Concreto Armado
Forma	Semienterrado
Fundação	Radier
Tipos de Juntas	Jeene
Tipos de Pavimentação	Placas de Concreto
Sistema de Drenagem	Quatro bombas de 3,7 cv

Fonte: Adaptado de Fonte e Vitório (2011) e EMLURB (2019).

3.1.2 Túnel Chico Science

Outra obra estudada e que se desenvolve por baixo da Ponte Prof. Lima de Castilho no bairro da Ilha do Retiro, também na forma semienterrada, é o Túnel Chico Science. Concebido no ano de 2000 com a intenção de melhorar o trânsito entre as Av. Engenheiro Abdias de Carvalho e Av. Gov. Agamenon Magalhães.

A sua estrutura de concreto armado e protendido foi projetada na extensão de 92,7 m e largura de 22,2 m, apresentando uma interligação com grades para entrada de ar, entre o túnel e a estrutura da ponte sobreposta, além de entradas de ar circulares dispostas nas paredes de entrada e saída do túnel. Sua fundação é composta em estacas do tipo Franki, observando-se também uma parede diafragma constituída por perfis metálicos que aparentemente funciona como elemento de contenção do aterro na extremidade do túnel. A pavimentação utilizada na via principal foi em asfalto – Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), contemplando nas suas laterais internas, passeios para ciclistas e pedestres em concreto com a separação para a via principal com blocos de concreto trapezoidais (FONTE, 2011).

A figura 13 mostra respectivamente a estrutura do Túnel Chico Science a sua entrada (A) e a interligação com a Ponte Prof. Lima de Castilho (B).

Figura 13 – Estruturas do Túnel Chico Science: a sua entrada (A) e a interligação com a Ponte Prof. Lima de Castilho (B).



Fonte: Elaborado pela autora.

Para drenagem foi projetada uma estação elevatória com vazão de recalque de 6,7 L/s e ele possui 2 bombas de 1,09 cv, sendo dispostas no ponto mais baixo do túnel duas caixas de drenagem para captação da água acumulada (EMLURB, 2019). As cobertas do túnel que não correspondem ao tabuleiro da ponte, na parte externa do equipamento, apresentam calhas que drenam a água de chuva em sua extensão para os jardins dos encontros, que ficam em cima da laje do túnel (FONTE, 2011). O quadro resumo com os dados técnicos do Túnel Chico Science pode ser verificados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Chico Science

Descrição	Túnel Chico Science
Ano de construção	2000
Localização	Ilha do Retiro
Tipo do Túnel	Urbano
Extensão	92,7 m
Largura	22,2 m
Altura limite	4,5 m
Classificação NFPA	categoria C
Sentido do Fluxo	Sentido único
Material	Concreto Armado
Forma	Semienterrado
Fundação	Estacas tipo Franki
Tipos de Juntas	Jeene
Tipos de Pavimentação	CBUQ e concreto(passeio)
Sistema de Drenagem	estação elevatória com vazão de recalque de 6,7 l/s e bomba projetada com potência de 1,09 cv

Fonte: Adaptado Fonte (2011) e EMLURB (2019).

3.1.3 Túnel Josué de Castro

O túnel do Pina foi construído no ano de 2007 sob a Avenida Herculano Bandeira, e integra o complexo viário da Via Mangue, uma via expressa de ligação da zona sul com a área central da cidade do Recife. O túnel é do tipo semienterrado de geometria retangular e foi construído com uso de placas de concreto armado para contenção lateral do tipo “parede diafragma”, para contenção dos empuxos laterais de terra, além de possuir estruturas de contraventamento (pérgolas) na área externa ao túnel (FONTE, 2011).

Acima da estrutura do túnel foi construída uma passarela para a travessia da Av. Herculano Bandeira, que dispõe de acesso por elevadores ou escadas rolantes. As calçadas do complexo são pavimentadas por intertravados do tipo paver, por toda a extensão da laje do túnel como forma de viabilizar a urbanização do local. Além disso a urbanização conta com a construção de bancos de praça, grades de proteção em volta da estrutura que proporcionam uma área de vivência, mas que atualmente necessita de recuperações.

As figuras 14 e 15 mostram respectivamente as estruturas do Túnel Josué de Castro e a passarela com o acesso dos elevadores e da escada rolante.

Figura 14 – Estruturas do Túnel Josué de Castro



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Passarela para travessia do Túnel Josué de Castro



Fonte: Elaborado pela autora.

Para sua drenagem, quando da sua construção, foi projetado e construído um sistema de bombeamento com 4 (quatro) conjuntos motobombas de fabricação sulzer-abs, marca/modelo

AFP 1546 marca/modelo sulzer-abs com capacidade de bombear cada uma, um volume de 189 m³/h (52,5l/s), cuja função é recalcar a água do lençol freático e da bacia de contribuição da área do túnel para o sistema de drenagem (EMLURB, 2019).

Para instalações desses 5 (cinco) conjuntos motobombas foram construídos dois reservatórios um de cada lado do túnel e na parte mais baixa, com dimensões internas de 5,30 m de comprimento, 2,00 m de largura e 2,50 m de profundidade com um volume de 26,50 m³ cada um, totalizando dessa forma, um volume de armazenamento de 53,00 m³ (53.000,00 litros) (EMLURB, 2019).

Atualmente os dois poços possuem cada um, uma bomba tipo XFP151E-CB2.1-PE15/4 de 15 cv da marca Sulzer e mais uma reserva de 4 cv da marca Schneider, tendo espaço para expansão da bomba, controladas por um quadro com sistemas de automação. (EMLURB, 2019). O quadro resumo com os dados técnicos do Túnel Josué de Castro pode ser verificado na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Josué de Castro

Descrição	Túnel Josué de Castro
Ano de construção	2007
Localização	Pina
Tipo do Túnel	Urbano
Extensão	260 m
Largura	12,2 m
Altura limite	4,5 m
Classificação NFPA	categoria C
Sentido do Fluxo	Sentido único
Material	Concreto Armado
Forma	Semienterrado
Fundação	Estacas Pré-moldadas
Tipos de Juntas	Jeene
Tipos de Pavimentação	CBUQ
Sistema de Drenagem	2 poços, cada um com 2 bombas de 15 cv + 1 reserva de 4 cv

Fonte: Adaptado de Fonte (2011) e EMLURB (2019).

3.1.4 Túnel Felipe Camarão

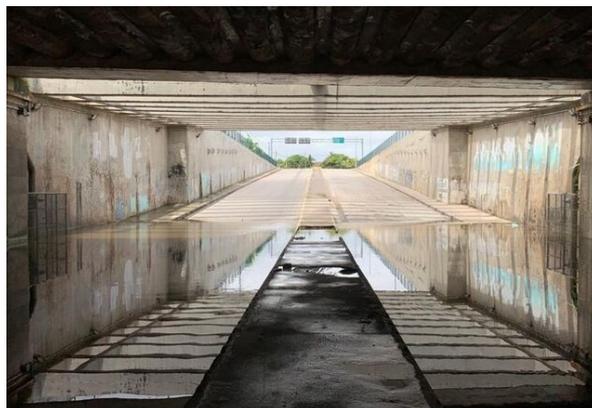
O túnel Felipe Camarão é um túnel urbano que está sob a gestão do Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco (DER-PE), ele foi inaugurado no ano de 2012 e está situado sob a Estrada da Batalha. O túnel é composto por quatro faixas, sendo as duas no sentido oeste-leste (Jordão-Boa Viagem) e as outras duas no sentido oposto, as quais são separadas por um canteiro central. As suas estruturas são em concreto armado e suas contenções laterais são compostas por cortinas atirandas de concreto travadas por vigas de coroamento. O seu pavimento é composto de asfalto – Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), (LINS; BURGOS; MONTEIRO, 2017). As figuras 16 e 17 exibidas a seguir, mostram respectivamente as estruturas do Túnel Felipe Camarão e o seu canteiro central que se encontra sem pavimentação.

Figura 16 – Estruturas do Túnel Felipe Camarão



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Canteiro Central do Túnel Felipe Camarão



Fonte: Elaborado pela Autora

O sistema de drenagem do Túnel Felipe Camarão é realizado por bombeamento, porém não foram disponibilizadas informações pelo DER. No trecho central do túnel, rente à laje superior, foi fixada uma estrutura tipo steel deck, que é uma laje composta por uma telha de aço galvanizado e uma camada de concreto, que abrange toda a sua superfície da mesma e que direciona a água para as calhas laterais, que por sua vez conduzem-nas até as caixas de coleta do sistema de drenagem (LINS; BURGOS; MONTEIRO, 2017). O quadro resumo com os dados técnicos do Túnel Felipe Camarão pode ser verificados na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 – Resumo dos dados técnicos do Túnel Felipe Camarão

Descrição	Túnel Felipe Camarão
Ano de construção	2012
Localização	Jordão
Tipo do Túnel	Urbano
Extensão	301 m
Largura	8 m
Altura limite	6 m
Classificação NFPA	categoria C
Sentido do Fluxo	Sentido duplo (Leste-Oeste)
Material	Concreto Armado
Forma	Semienterrado
Fundação	Cortinas atirantadas em concreto
Tipos de Juntas	Jeene
Tipos de Pavimentação	CBUQ
Sistema de Drenagem	sem informações

Fonte: Adaptado de Lins, Burgos e Monteiro (2017).

3.1.5 Túnel da Abolição

O túnel da Abolição fica localizado na Rua Real da Torre e passa sob a Rua da Benfica, também é um túnel que está sob a responsabilidade do Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco (DER-PE), possui 287 m de extensão e 8,80 m de largura para a pista, é o túnel com a construção mais recente, sendo entregue no ano de 2015 (LINS; BURGOS; MONTEIRO, 2017).

Segundo dados do Projeto Executivo do Túnel da Abolição (GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO, 2012), 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, pois nos arredores do local existem construções históricas, como o Museu da Abolição, que dá nome ao túnel. Na parte superior e central do túnel foi implantada uma praça para integrar e humanizar os arredores do Museu da Abolição.

A praça é constituída por sete canteiros elevados com grama, os quais acumulam água (LINS; BURGOS; MONTEIRO, 2017). As figuras 18 e 19 mostram respectivamente as estruturas do Túnel da Abolição e a escadaria de acesso à praça que está fechada.

Figura 18 – Estruturas do Túnel da Abolição



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Escadaria de acesso para a Praça



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo dados do Projeto Executivo do Túnel (GOVERNO DO ESTADO DE PE, 2012), a drenagem que é realizada através de bombas, o túnel possui um esquema de reservatório com 1 (um) poço de captação com 2 bombas de 6 cv e mais uma reserva de 4 cv. Nas calçadas da praça estão dispostos 7 ralos para o escoamento das águas pluviais, na área central da praça não há sistema de drenagem, fazendo com que a água seja direcionada para uma calha improvisada que deságua como em forma de cascata sobre a parte interna do túnel. O quadro resumo com os dados técnicos do Túnel da Abolição pode ser verificado na Tabela 15.

Tabela 15 – Resumo dos dados técnicos do Túnel da Abolição

Descrição	Túnel da Abolição
Ano de construção	2015
Localização	Madalena
Tipo do Túnel	Urbano
Extensão	287 m
Largura	8,8 m
Altura limite	5,6 m
Classificação NFPA	categoria C
Sentido do Fluxo	Sentido único (Norte-Sul)
Material	Concreto Armado
Forma	Semienterrado
Fundação	Estacas secantes
Tipos de Juntas	Jeene
Tipos de Pavimentação	CBUQ
Sistema de Drenagem	2 bombas de 6 cv + 1 reserva de 4 cv

Fonte: Adaptado de Lins, Burgos e Monteiro (2017) e Governo do Estado de PE (2012).

3.2 Modelagem

Para a alcance do objetivo principal deste trabalho, o mesmo foi dividido nas seguintes etapas: revisão bibliográfica e conceitual, que subsidiaram teoricamente a construção desta pesquisa; identificação da área de estudo e a verificação da drenagem existente; escolha do modelo hidráulico-hidrológico; simulações para a definição da dinâmica do escoamento superficial das águas pluviais na área em estudo; avaliação das medidas compensatórias em drenagem urbana, visando à diminuição dos problemas de alagamentos enfrentados nos períodos de chuva.

A seguir são apresentadas a descrição das principais atividades desenvolvidas durante a dissertação e que serão discutidas ao decorrer do estudo:

- Obtenção das informações necessárias dos túneis objeto de estudo, junto aos órgãos responsáveis;
- Seleção do modelo hidráulico-hidrológico a ser utilizado;
- Definição e obtenção dos parâmetros e variáveis de entrada para o modelo;
- Montagem da rede e inserção da drenagem existente;
- Calibração e validação do Modelo Hidráulico-hidrológico;
- Avaliação da implementação de medidas compensatórias.

3.2.1 Articulação com os órgãos gestores da drenagem urbana do Recife e de concessões dos Túneis

Inicialmente foram identificados quais eram os órgãos responsáveis pela manutenção dos túneis da cidade do Recife. Tanto à Prefeitura do Recife quanto o Departamento de Estradas e Rodovias - DER-PE, foram contatados para obtenção dos dados necessários para o desenvolvimento da pesquisa. O DER-PE afirmou que não havia em seu banco de dados os arquivos dos projetos dos túneis sobre a sua responsabilidade e a prefeitura do Recife informou que a detenção dos dados sobre a drenagem não era de sua responsabilidade e sim da Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB).

A EMLURB informou possuir levantamento topográfico de apenas 18% da área do Recife e que todos os dados existentes estavam disponíveis na plataforma eletrônica – Portal de Informações geográficas da cidade do Recife (Prefeitura do Recife ESIG), que fica sob a sua responsabilidade e 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, porém há ausência de alguns desses dados que foram estimados e replicados por semelhança. Além disso as informações sobre o projeto da drenagem interna do Túnel da Abolição foram extraídas do projeto executivo do mesmo.

Houve uma grande dificuldade para obtenção e validação dos dados, por falta de registros dos órgãos de gestão. Assim, só foram obtidos dados suficientes para simulação dos Túneis Josué de Castro e o da Abolição.

3.2.2 Seleção do modelo hidráulico-hidrológico a ser utilizado

Para o atendimento dos objetivos propostos, foi necessária a utilização de um software para a modelagem da rede de drenagem existente e para verificação das possíveis alternativas que poderiam ser empregadas para a mitigação dos alagamentos dos túneis estudados.

Para simular as respostas hidrológicas foi escolhido o modelo hidrológico dinâmico SWMM (Storm Water Management Model), pois esse modelo possibilita a simulação da quantidade e qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas, e apresenta funções onde podemos inserir opções de técnicas compensatórias e avaliar de acordo com os resultados disponibilizados quais os efeitos do emprego daquela técnica na área de estudo definida, além de ser um software que dispõe de seu código de fonte aberto.

3.2.3 Parâmetros e variáveis de entrada para o modelo

São os parâmetros necessários para a simulação hidrológica chuva-vazão da área em estudo e que serão detalhados nos subitens a seguir:

equações 3 e 4 da largura equivalente e coeficiente de compacidade, respectivamente, para alcance da largura média.

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Kc} \right)^2} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

$$Kc = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo: A – Área da subárea, em km²;

P – Perímetro da subárea, em km;

L – Largura média, em m;

Kc – Coeficiente de compacidade, adimensional.

3.2.3.3 Declividade superficial das áreas

As declividades das subáreas foram obtidas através da razão entre a diferença de cotas dos poços de visita e a distância entre eles, a partir do cadastro da microdrenagem referentes ao Túnel da Abolição e ao Túnel Josué de Castro obtidos pelo site de informações geográficas da cidade do Recife (Prefeitura do Recife -ESIG).

3.2.3.4 Coeficiente de rugosidade de Manning

Como os locais de estudo tem a pavimentação constituída por Concreto Betuminoso a Quente (CBUQ), adotou-se o coeficiente de rugosidade de Manning ($n = 0,024$) para áreas impermeáveis, e para as áreas permeáveis adotou-se o coeficiente de rugosidade de Manning ($n = 0,15$), conforme utilizado por Canholi (2005), Silva Júnior (2010, 2015) e Alisson Silva (2018).

3.2.3.5 Altura do armazenamento em depressões

Para a profundidade de armazenamento, utilizou os valores conforme recomendado no Manual do usuário do SWMM (2010) e dos trabalhos de Silva Júnior (2010, 2015), Oliveira (2017) e Alisson Silva (2018), sendo então 2,54 mm para áreas impermeáveis e 5 mm para áreas permeáveis.

3.2.3.6 Percentual de áreas Impermeáveis das Bacias

Foram utilizadas as referências de ortofotos da cidade do Recife do ano de 2015, disponibilizadas na plataforma eletrônica de informações geográficas da cidade do Recife (Prefeitura do Recife – ESIG). Como as ortofotos eram antigas, houve uma conferência desses dados com imagens do Google Earth referentes ao ano de 2022 e de visitas a campo. As imagens foram exportadas e alinhadas com o desenho em CAD e com isso foram delimitadas as áreas permeáveis das bacias e realizado o cálculo para definição do percentual das áreas impermeáveis.

3.2.3.7 Taxa de infiltração

Foi escolhido o modelo de Horton devido à simplicidade na definição dos parâmetros para a sua modelagem. Não foram realizados ensaios de infiltração, sendo utilizados os resultados obtidos do trabalho de Alisson Silva (2018), conforme Tabela 16 a seguir, que realizou o teste de infiltração em sua área de estudo localizada no bairro da Benfica que fica a uma distância de 1 km do Túnel da Abolição e a 4 km do Túnel Josué de Castro.

Tabela 16 – Taxas de Infiltração

Dados Utilizados	Valores
Taxa de infiltração máxima	295,08 mm/h
Taxa de infiltração mínima	211,96 mm/h
Coefficiente de decaimento	0,163

Fonte: Adaptado pela autora de Alisson Silva (2018)

3.2.3.8 Eventos de Precipitação

Os dados de precipitação utilizados foram obtidos do monitoramento realizado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), na estação automática pluviométrica localizada no bairro da Boa Vista, nas coordenadas de -34,891 de latitude e -8,069 de longitude que fornece seus dados em milímetros, assim foi escolhido o formato do tipo Volume para os dados de chuva.

Os eventos escolhidos foram o do dia 13 de junho do ano de 2019, onde no período de 12 horas, entre 11 horas do dia e às 23 horas da noite do dia 13 de junho, foi registrado 149,2 mm sobre Recife, e o do dia 14 de janeiro de 2022 cujo volume total de precipitação aferido foi de 91,16 mm.

O tempo de retorno da chuva foi calculado pela nova equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) do Recife (Equação 5), disponibilizada pela EMLURB.

$$i = \frac{611,3425 \times T_r^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo: i – intensidade de chuva, em mm/h;

T_r - Tempo de Retorno, em anos;

t – Duração da chuva, em minutos.

3.2.3.9 Curva de Maré

Os registros dos níveis de marés foram obtidos na tábua de maré do Porto do Recife, disponibilizado no site da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Foi realizada uma interpolação para obtenção da altura da maré a cada hora e como o DHN utiliza o Sistema de Referencial de Nível da Marinha foi preciso fazer uma adequação dos níveis das marés somando 0,25 m para coincidir com os níveis da Prefeitura do Recife, visto que o levantamento cadastral da rede de drenagem foi realizado no referencial da Prefeitura do Recife.

3.3 Montagem da rede

O traçado da rede foi inserido a partir dos dados fornecidos pela EMLURB e por verificações in loco. Com a obtenção do cadastro da rede de drenagem, ela foi inserida no SWMM a partir da identificação dos objetos: Bacias, Junções/Nós e Condutos, para a partir daí serem iniciadas as etapas de calibração e validação do modelo.

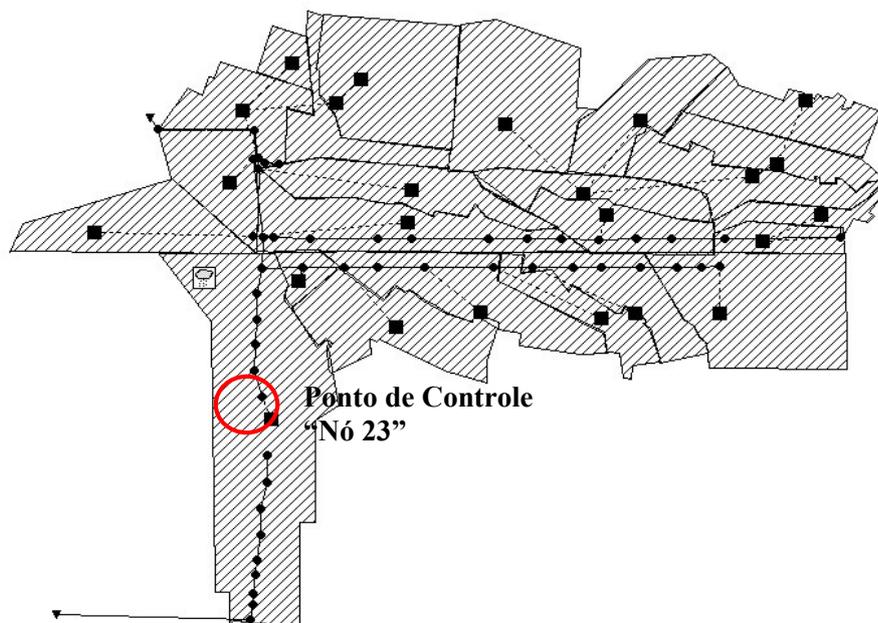
3.4 Calibração e Validação do Modelo Hidrológico-Hidráulico

Após a inserção dos parâmetros e variáveis de entrada no modelo, discutido nos itens anteriores, foi realizada a calibração do modelo com base no evento extremo de precipitação ocorrido no dia 13 de junho de 2019.

Nenhum dos dois túneis dispõem de sensores de nível ou medidores de vazão, necessários para se processar um estudo de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros, assim sendo, optou-se por realizar uma calibração simplificada do modelo. A calibração simplificada consiste no ajuste do volume máximo de alagamento e altura máxima de alagamento simulados aos observados durante a ocorrência do evento considerado, conforme metodologia aplicada por Alisson Silva (2018), Silva Júnior (2015) e Oliveira (2017).

O ponto de controle selecionado para a calibração do Túnel Josué de Castro foi o poço de visita, denominado de “Nó 23” (Figura 21), realizou-se a manipulação dos parâmetros referentes ao coeficiente de rugosidade de Manning para os condutos, a altura da camada de sedimento depositado nos condutos e a área alagada nos nós de controle e adjacentes.

Figura 21 – Localização do “Nó 23”



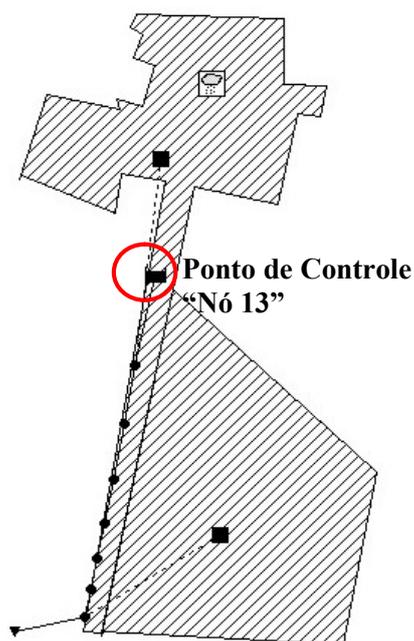
Fonte: Elaborado pela autora com o software SWMM.

O túnel apresenta as seguintes dimensões: altura útil 4,50m, largura aproximada de 12,20 m e comprimento aproximado de 260,00m. Na chuva ocorrida no dia 13.06.2019 a água que provocou o seu alagamento, e atingiu uma altura aproximada de 1,60 m em seu interior, no ponto do “Nó 23”.

Com base da lâmina e com o auxílio da ferramenta Autocad 2022, com a área do alagamento estimada pela altura máxima da lâmina d’água observada no ponto crítico estudado, com a largura média do túnel, e somado a capacidade do reservatório, estima-se que o volume d’água do alagamento provocado pelo evento de precipitação foi da ordem de 3003 m³.

Para o Túnel da Abolição o ponto de controle selecionado foi o “Nó 13” onde está localizado o reservatório (Figura 22). Esse túnel apresenta as seguintes dimensões: altura útil de 5,6 m, largura aproximada de 8,8 m e comprimento aproximado de 324,00 m (área aproximada de 2.851,00 m²). Na chuva ocorrida no dia 13.06.2019 a água que provocou o seu alagamento, e atingiu uma altura aproximada de 0,50 m em seu interior, no ponto do “Nó 13”.

Assim, com o cálculo do volume máximo estimado a partir da relação entre área determinada no perfil do túnel, de acordo com lâmina d’água atingida e a largura média do túnel, somado ao volume de capacidade do reservatório, estima-se que o volume d’água do alagamento provocado pelo evento de precipitação foi da ordem de 621 m³.

Figura 22 – Localização do “Nó 13”

Fonte: Elaborado pela autora com o software SWMM.

A calibração ideal, abrangeria experimentos com controles de todas as variáveis, realizados num ambiente controlado como em laboratórios, assim seria possível fazer uma calibração muito mais precisa.

Após a calibração do modelo foi realizada a validação, que tem por objetivo avaliar a capacidade da calibração implementada, verificando se os resultados estão próximos à realidade, comprovando sua eficiência. A validação foi realizada utilizando o evento de precipitação do dia 14/01/2022. Foram comparados o volume e lâmina máximos de alagamento simulados com os observados no ponto de controle denominado “Nó 23” para o Túnel Josué de Castro e o “Nó 13” para o Túnel da Abolição, para o novo evento de precipitação, só alterando no modelo a Curva de precipitação e a Curva da Maré. Assim como na calibração, não foram considerados o funcionamento das bombas.

3.5 Simulação de Técnica Compensatória em Drenagem Urbana

Preliminarmente dentre as alternativas compensatórias foi realizado um estudo sobre a intensidade das interferências, a possibilidade de utilizar áreas públicas ou privadas, o tipo de manutenção, o tamanho da área de ocupação, a funcionalidade e os impactos do uso da

técnica na vegetação para caracterizar cada alternativa e escolher quais dentre delas teriam possibilidade de implantação para as áreas estudadas. Abaixo a Tabela 17 mostra o resultado dessa classificação.

Tabela 17 – Classificação das Técnicas Compensatórias

TC	1	2	3	4	5	6	7
Interferência	Grande	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Áreas Privadas	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Manutenção	Grande	Moderada	Grande	Moderada	Baixa	Baixa	Baixa
Ocupação	Grande	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Funcionalidade	Grande	Moderada	Baixa	Baixa	Moderada	Moderada	Baixa
Impactos Vegetação	Moderada	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Moderada

Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1- Bacias de Detenção/Retenção | 5- Trincheiras de Infiltração |
| 2- Poços de infiltração/Retenção | 6- Valas, valetas, planos de infiltração |
| 3 - Telhados de Cobertura Vegetal | 7 - Pavimentos Permeáveis |
| 4 - Microreservatórios | |

Fonte: Elaborado pela autora

Assim, após as etapas de calibração e validação do modelo, foi escolhida uma alternativa para cada área de estudo com o objetivo de atenuar os alagamentos e que observaram a possibilidade de implantação das mesmas em cada local.

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 armazenamento e de condução das águas captadas para um poço de bombeamento no qual a água é direcionada para seu exutório. Assim foi simulada a inserção de uma bacia de detenção ao lado do túnel, no terreno do museu, que possui um anfiteatro com área aproximada de 1200 m².

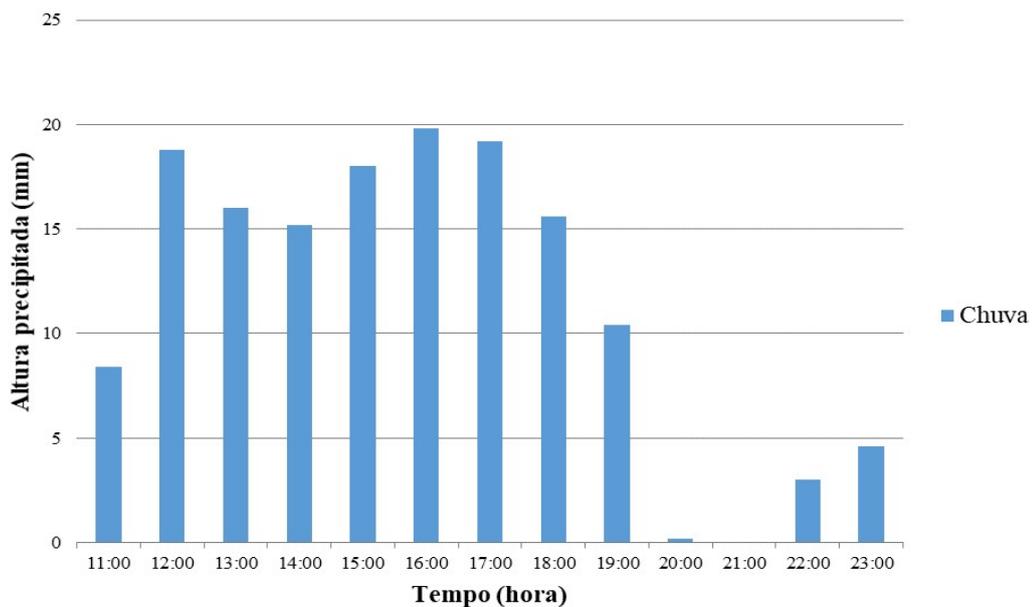
O Túnel Josué de Castro possui todo o seu sistema de drenagem realizado através de bombeamento. Foi sugerido que fosse realizado um micro reservatório de condutos de armazenamento, com capacidade aproximada de 895 m³, com a mesma funcionalidade dos condutos do Museu da Abolição, para que em tempos de maiores precipitações eles reservem parte da água.

4 RESULTADOS

A seguir serão mostradas as verificações e os resultados obtidos durante o desenvolvimento da dissertação, que permitiu avaliar através da simulação no modelo hidrológico SWMM os impactos causados nos dois túneis urbanos da cidade do Recife, o Túnel Josué de Castro e o Túnel da Abolição pelo evento extremo de precipitação ocorrido no dia 13 de junho de 2019 e pelo evento de precipitação do dia 14 de janeiro de 2022, que foi utilizado para validação.

O evento principal de precipitação do dia 13 de junho de 2019 causou vários transtornos à população da cidade do Recife. Segundo dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), o volume total de precipitação aferido na estação automática pluviométrica localizada no bairro da Boa Vista, nas coordenadas de -34,891 de latitude e -8,069 de longitude, foi de 149,2 mm. Segundo reportagem do Portal Terra (2019) este foi o maior volume de chuva ocorrido em 24 horas no ano de 2019, e também foi o sexto maior acumulado de chuva em 24 horas para o mês de junho em 58 anos de medições, desde 1961. Essa precipitação corresponde a 38% da média de chuva esperada para este mês, que é de 391 mm, tendo precipitado 149,20 mm entre 11h e 23h do dia 13. Na figura 23 está apresentado o hietograma de precipitação ocorrido nesta data.

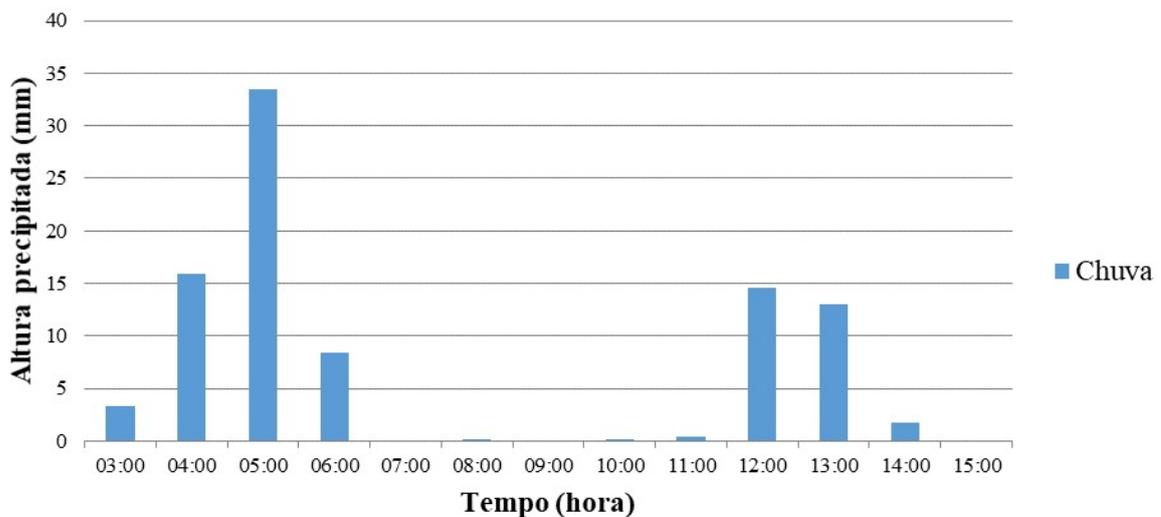
Figura 23 – Precipitação ocorrida no dia 13/06/2019



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do (CEMADEN).

Para o evento de precipitação ocorrido no dia 14 de janeiro de 2022 e segundo dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), o volume total de precipitação aferido na estação automática pluviométrica localizada no bairro da Boa Vista, nas coordenadas de -34,891 de latitude e -8,069 de longitude, foi de 91,16 mm. A Figura 24 mostra o hietograma de precipitação ocorrido neste dia.

Figura 24 – Precipitação ocorrida no dia 14/01/2022



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados do CEMADEN

Para as curvas das marés foram considerados os dados extraídos da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para os mesmos dias da precipitação. Nas Tabelas 18 e 19 estão apresentadas respectivamente os resumos dos dados da maré para o dia 13 de junho de 2019 e para o dia 14 de janeiro de 2022.

Tabela 18 – Resumo dos dados da maré no dia 13/06/2019

DATA	HORA	ALTURA (m)
13/06/2019	00:45	2,0
13/06/2019	07:20	0,5
13/06/2019	13:08	2,2
13/06/2019	19:34	0,4

Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)

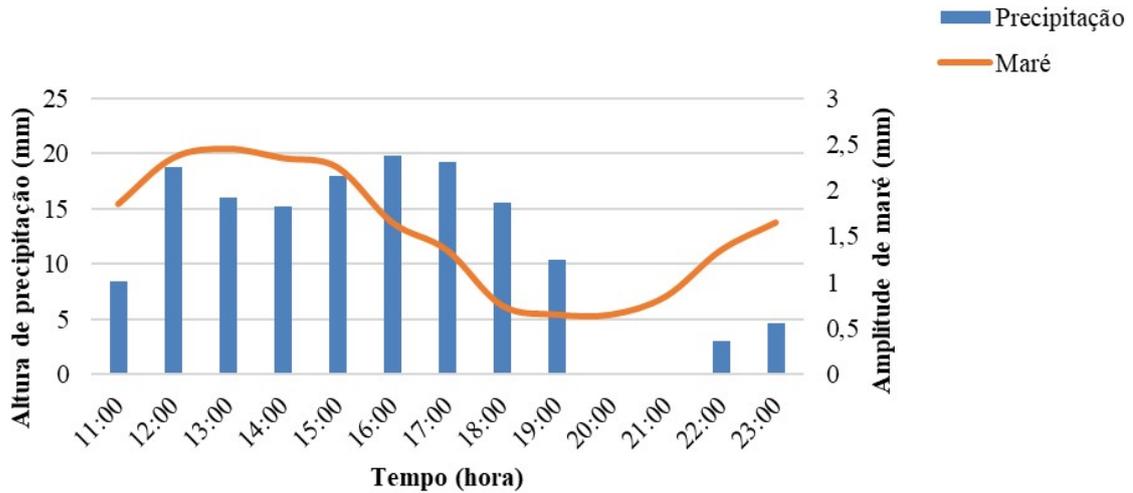
Tabela 19 – Resumo dos dados da maré no dia 14/01/2022

DATA	HORA	ALTURA (m)
14/01/2022	01:43	1,8
14/01/2022	07:53	0,7
14/01/2022	14:00	1,9
14/01/2022	20:19	0,6

Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)

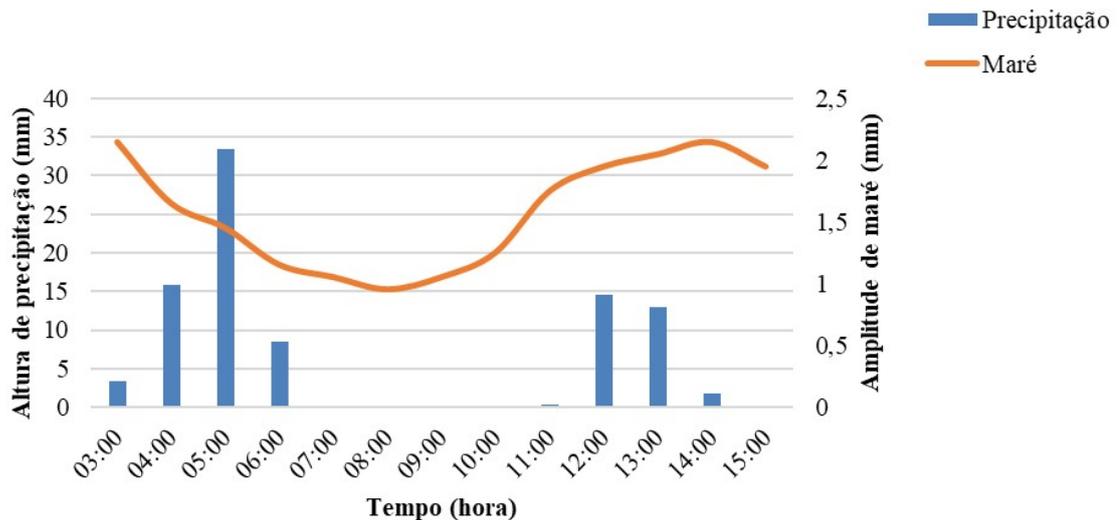
Foram realizadas interpolações entre os dias anteriores e posteriores a cada evento para o traçado da curva de maré. Após definição da curva, ela foi confrontada com o hietograma de precipitação que podem ser observados nas Figuras 25 e 26, para os respectivos dias 13 de junho de 2019 e 14 de janeiro de 2022.

Figura 25 - Gráfico com a relação precipitação x maré no dia da precipitação de 13/06/2019



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 - Gráfico com a relação precipitação x maré no dia da precipitação de 14/01/2022



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que durante o maior período de maior precipitação do dia 13 de junho, das 11:00 h até as 17:00 h, foi o período em que a maré estava com o nível da maré próximo do seu preamar, com altura de 2,5 m às 13:08 h. Embora o intervalo sem chuva das 20:00 h às

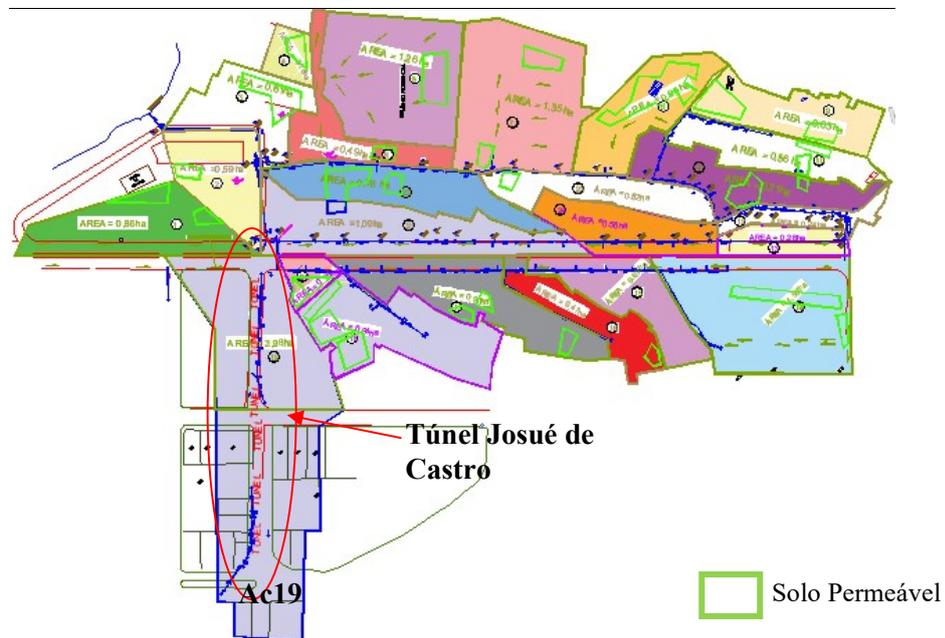
22:00, as chuvas reiniciaram juntamente com o nível da maré também na crescente, dificultando assim a diminuição dos alagamentos.

Na precipitação do dia 14 de janeiro de 2022 observa-se que no período de maior precipitação por volta das 5:00 h a maré ainda estava em preamar, e apesar do intervalo sem chuva entre as 7:00 h e às 11:00, a precipitação retornou por volta das 12:00 h, justamente com a maré subindo novamente.

4.1 Estudo no Túnel Josué de Castro

A Figura 27 apresenta as 24 áreas de contribuição utilizadas na modelagem, com a delimitação em verde dos locais que possuem solo permeável e com a indicação de onde está situado o Túnel Josué de Castro, que é a área de contribuição Ac19.

Figura 27 – Localização do Túnel Josué de Castro e a delimitação das bacias inseridas na área de abrangência do estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a delimitação das áreas de contribuições foram inseridos os valores de parâmetros de entrada do modelo SWMM. Na Tabela 20 encontram-se a síntese dos dados de entrada das áreas de contribuição.

Tabela 20 – Síntese dos dados de entrada das áreas de contribuição do Túnel Josué de Castro

AC - Área de Contribuição	Área (ha)	Le - Largura Equivalente	Comp. Do Talvegue Principal (m)	Cotas de Superfície		Is - Declividade Superficial (%)	Área Impermeável (%)	N impermeável	N permeável	Armazenamento em depressões (mm)	
				Cota montante (m)	Cota Jusante (m)					Impermeável	Permeável
Ac1	0,86	42,21	97,00	3,82	2,63	1,23%	95%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac2	0,59	49,71	68,00	3,46	3,60	-0,21%	96%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac3	0,61	34,99	7,31	3,75	3,73	0,16%	84%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac4	0,18	6,66	173,00	3,84	3,51	0,19%	81%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac5	1,26	96,99	170,00	3,84	3,51	0,19%	93%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac6	0,49	19,01	92,00	2,55	2,25	0,33%	96%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac7	1,35	87,90	60,29	2,58	2,28	0,50%	95%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac8	0,69	45,85	41,08	2,13	1,95	0,44%	74%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac9	0,63	33,32	62,00	1,30	1,30	0,00%	82%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac10	0,56	27,74	29,23	2,12	2,19	-0,24%	97%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac11	0,71	27,42	35,90	2,36	2,56	-0,55%	92%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac12	0,24	13,75	51,60	2,78	2,64	0,28%	100%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac13	0,28	26,13	100,85	2,88	2,67	0,20%	100%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac14	1,50	87,19	51,00	2,38	1,90	0,94%	92%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac15	0,60	31,56	35,00	2,15	2,10	0,14%	100%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac16	0,47	23,76	31,50	2,20	2,10	0,32%	97%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac17	0,93	58,44	131,00	0,82	0,74	0,06%	94%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac18	0,94	33,78	91,05	2,19	2,09	0,11%	85%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac19	2,91	76,15	119,00	2,55	2,45	0,08%	100%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac20	0,16	27,93	31,30	2,09	2,15	-0,19%	72%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac21	1,09	35,84	122,60	2,19	1,89	0,24%	99%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac22	0,76	29,88	40,00	2,09	2,18	-0,22%	87%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac23	0,52	24,74	40,50	3,66	3,63	0,08%	96%	0,02	0,15	2,54	5,00
Ac24	0,56	36,39	62,00	2,65	2,53	0,19%	100%	0,02	0,15	2,54	5,00

Fonte: Elaborado pela autora.

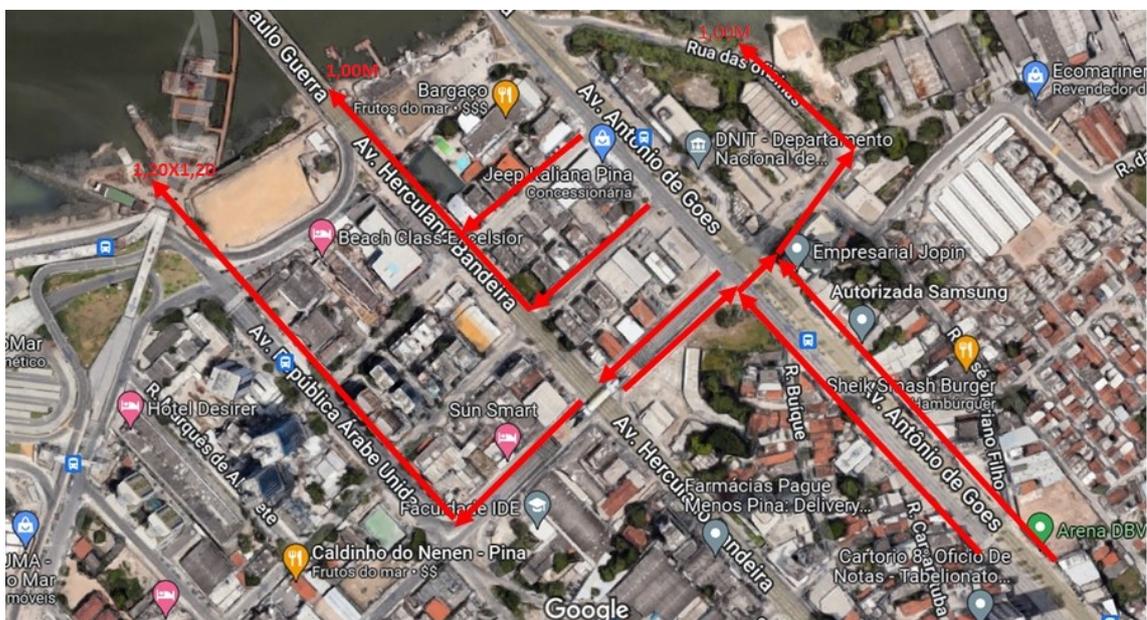
É fácil observarmos tanto pela Figura 27 quanto pela Tabela 20 que a área do Pina está quase toda impermeável. O percentual geral da área impermeável é de 92% e da área de contribuição onde o Túnel Josué de Castro se encontra (Ac19) é de 100%. Como

consequência dessa impermeabilização, houve um aumento do escoamento superficial e da frequência de alagamentos.

4.1.1 Diagnóstico da Rede de drenagem existente

Sobre o sistema de drenagem implantado no local de estudo e que se encontra representado na Figura 28 podemos observar que existem 3 sistemas troncos implantados. O primeiro na Av. Antônio de Góes que segue para Rua Cacilda Jolanda, outro que segue até o final da Av. Herculano Bandeira e um último que segue pela Av. República Árabe Unida, todos desaguardo na bacia do Pina, no Rio Tejipió. Em todos os três trechos há mudanças bruscas (90°) no sentido do fluxo da água. A EMLURB (2003) recomenda que devem ser construídos poços de visita (PVs) nas mudanças de direção. Além disso é considerada boa prática de engenharia que se utilize mudanças de direção com 30° a 45°, pois provocam retardo do fluxo à montante do sistema, e com angulações de 90° há o risco de deposição de sólidos pela erosão da parede dos PVs causado pela força centrífuga do fluxo da água.

Figura 28 - Sentido da drenagem implantada na Av. Herculano Bandeira e Antônio de Góes



Fonte: Elaborado pela autora.

Dados do acervo técnico da EMLURB mostram a situação das três jusantes no período de junho de 2019. Tanto na jusante do sistema de drenagem da Av. Antônio de Góes, que possui galeria com diâmetro de 1,00m (Figura 29) e que desagua na Rua Cacilda Jolanda, como na

jusante da República Árabe Unida com canaleta de 1,20m x 1,20m (Figura 30) e na jusante da Herculano Bandeira, que possui galeria com diâmetro de 1,00m (Figura 31) foram observadas grandes sedimentações, o que provoca retenção do fluxo.

Figura 29 - Jusante da Avenida Antônio de Góes na Rua Cacilda Jolanda – Pina



Fonte: Acervo Emlurb (2022)

Figura 30 - Jusante da Galeria da Avenida República Árabe Unida



Fonte: Acervo Emlurb (2022)

Figura 31 – Jusante da Avenida Herculano Bandeira



Fonte: Acervo Emlurb (2022)

Segundo dados da Emlurb, antes da construção do túnel havia um dispositivo de drenagem na Rua Manoel de Brito que captava a água que escoava pela linha d'água da Av. Antônio de Góes no sentido túnel e que seguia pela rua Cacilda Jolanda Porciunica até desaguar na Bacia do Pina (Figura 32).

Atualmente o dispositivo de drenagem mais próximo seria o da Rua Nogueira de Souza (Figura 33), que é o único ponto de captação ao longo de toda a rua e que se situa a uma distância maior do que 80 m da entrada do Túnel, assim sem dispositivos de drenagem mais próximos, a água da precipitação escoar naturalmente para dentro do túnel.

Figura 32 – Local onde existia o dispositivo de drenagem antes da construção do Túnel



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 33 – Único dispositivo de captação da Rua Nogueira de Souza



Fonte: Elaborado pela autor (2022).

O trecho que tem início no eixo da ponte Governador Paulo Guerra (lado sul da via) até a rua Arquiteto Augusto Reinaldo comporta-se como um divisor de água, de modo que a drenagem da Av. Antônio de Góes segue em direção ao túnel e nesse trecho só existe um ponto de captação, que é insuficiente para absorver águas precipitadas, além disso a linha d'água não apresenta declividade para direcionamento das águas para essa captação.

A drenagem do tronco da Av. Antônio de Góes é composta por duas galerias paralelas de 600 mm de diâmetro, uma em cada lado da avenida. Durante toda a extensão foram observados poucos dispositivos para captação da água das chuvas. Em toda a extensão da Rua Arquiteto Augusto Reinaldo não foram verificados pontos de captação (Figura 34), na rua seguinte que é Rua Nogueira de Souza só há um ponto de captação, sendo os próximos localizado na Rua Manoel de Brito a uma distância de 66 m (Figura 35).

Figura 34 – Rua Arquiteto Augusto de Souza sem ponto de captação



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 - Rua Manoel Brito com suas duas captações



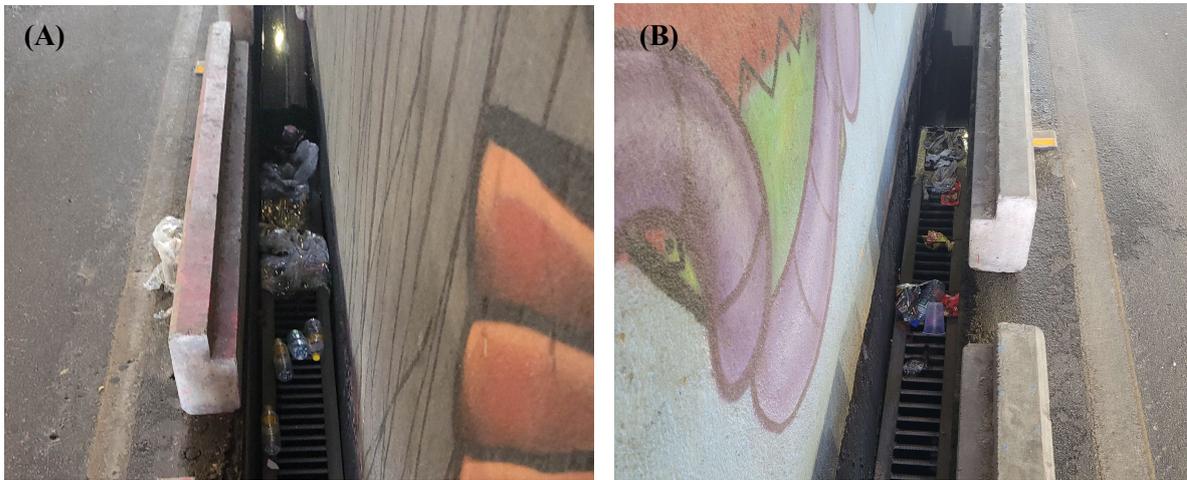
Fonte: Elaborado pela autora.

Também foram verificados trechos onde a linha d'água não desenvolve o seu papel, há trechos onde a declividade está invertida mostrando a necessidade da requalificação de toda linha d'água tanto na faixa sul, quanto na faixa norte da Av. Antônio de Góes com ajuste de sua declividade transversal e criação de uma área de depressão na entrada das caixas gavetas e sarjetas para melhorar a entrada do fluxo d'água.

No trecho do coletor tronco da Rua Manoel de Brito, onde está localizado o Túnel Josué de Castro, há uma rede de drenagem de 600 mm de diâmetro e que possui baixas declividades, o que agrava ainda mais o cenário, provocando retenção de sedimentos em seu interior e que juntamente com o lixo e entulhos lançados pela população reduzem o diâmetro útil das galerias e dificultam ou impossibilitam o escoamento.

Dos pontos de captação no interior do túnel que possui 260,00 m de extensão, existem 2 pontos, um em cada lado medindo 1,5m, localizados nos pontos mais baixo do túnel que sempre estão com garrafas plásticas e outros resíduos que obstruem as grelhas Figuras 36 (A) e 36 (B).

Figura 36 - Fotos da grelha de captação de água Túnel Josué de Castro lado esquerdo (A) e direito (B)



Fonte: Elaborado pela autora.

No momento do alagamento do túnel, o sistema de bombeamento instalado não foi projetado para atender toda a área alagada, mesmo com a maré em preamar quase toda água caída na Av. Antônio de Góes convergiu para o túnel. As Figura 37 e 38 mostram os efeitos deste evento no ponto crítico de alagamento estudado. No horário das 17 h, na Figura 37, já havia precipitado 115,40 mm (77% do total precipitado neste evento) e a maré estava baixando. Na Figura 38 era a manhã do dia 14 de junho de 2019 e o túnel continuava alagado e onde podemos observar um carro submerso.

Figura 37 – Imagem do Túnel alagado às 17 horas do dia 13/06/2019



Fonte: Diário de Pernambuco (2019)

Figura 38 – Imagem do Túnel ainda alagado na manhã do dia 14/06/2019



Fonte: Diário de Pernambuco (2019)

Essa precipitação provocou uma altura aproximada de alagamento de 1,60 m acima no ponto de controle que é o “Nó 23”, alagando completamente o Túnel Josué de Castro. Registros aéreos (Figura 39) mostram a área de alagamento do Túnel Josué de Castro e suas áreas adjacentes. A partir dos dados de topografia do perfil do túnel e da lâmina de alagamento definida pela altura de 1,60 m observada no nó de controle, utilizando o AutoCAD 2022 como ferramenta de apoio, foi obtido a área do perfil do alagamento e multiplicado pela largura média do túnel, foi calculado o volume d’água do alagamento provocado pelo evento de precipitação que foi na ordem de 3000 m³.

Figura 39 – Registros aéreos das áreas de alagamento resultante do evento extremo de precipitação do dia 13/06/2019



Fonte: Diário de Pernambuco (2019)

A Emlurb informou que o túnel ficou interditado por 72 horas e houve uma operação para rebaixamento do nível da água no interior do túnel para que o alagamento fosse solucionado, foram necessárias a instalação de 04 bombas extras para drenar a água acumulada, até que as bombas existentes voltassem a funcionar (Figura 40).

Figura 40 - Operação para rebaixamento do nível d'água dentro do túnel após precipitação do dia 13/06/2019



Fonte: Diário de Pernambuco (2019)

4.1.2 Resultados das Simulações no SWMM

As simulações no software SWMM foram realizadas para verificar a rede de drenagem existente, quais trechos estavam estrangulando o fluxo das águas pluviais e causando problemas de alagamentos na área estudada. Além disso foram utilizadas para verificar a eficácia do emprego de alguma técnica compensatória durante essa situação de precipitação.

Inicialmente foram inseridos no software os parâmetros e variáveis de entrada apresentados na Tabela 18. Após criado o modelo foi realizado uma calibração simplificada com base no evento de precipitação do dia 13 de junho de 2019 no qual o volume de alagamento simulado foi comparado com o ocorrido no dia da precipitação, levando em consideração o ponto de controle.

Após o levantamento de informações, como dados dos projetos, perfil do túnel, drenagem existente, fotos e vídeos do alagamento ocorrido no dia 13 de junho de 2019 e de observações in loco, obteve-se uma área aproximada de alagamento de 2208 m² e uma altura máxima de lâmina d'água de 1,60 m, gerando um volume de 3003 m³. Durante a calibração conseguiu-se alcançar uma altura de alagamento simulada de 1,55 m no ponto de controle (Nó 23) e um volume máximo gerado de 3015 m³.

Na tabela 21 pode-se observar os resultados da calibração. Após a etapa de calibração obteve-se um erro médio de continuidade para escoamento superficial de -0,06%, e 1,23% para propagação de vazão.

Tabela 21 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 13/06/2019 no Túnel Josué de Castro

Aspectos	Observado	Simulado	Erro Relativo (%)
Lâmina máxima de alagamento (m)	1,60	1,55	3,23%
Volume máximo de alagamento (m ³)	3003	3015	-0,40%
Erros de Escoamento Superficial		-0,06%	
Continuidade Propagação de Vazão		1,23%	

Fonte: Elaborado pela autora.

Outros trabalhos que utilizaram o software SWMM para estudos realizados na cidade do Recife foram o de Silva Júnior (2015) que tiveram como resultados o percentual de -0,04% para o erro de escoamento superficial e o percentual de 2,18% para propagação de vazão e o estudo de Silva Alisson (2018) cujo erro de escoamento superficial foi de 0% e a propagação de vazão foi de 0,69%.

Diante disso pode-se constatar que os resultados da calibração foram satisfatórios e que os dados de entrada foram informados corretamente, visto que os erros foram menores que 10%, limite de erro de continuidade utilizados nos trabalhos realizados por Silva Júnior (2015) e Silva Alisson (2018).

Após a calibração partiu-se para a validação com a chuva do dia 14 de janeiro de 2022, onde foram utilizados a mesma modelagem definida na calibração, ou seja, sem alterar os parâmetros físicos do modelo, e modificando apenas a série de precipitação e a curva de maré para os dados aferidos para este dia.

A Tabela 22 mostra os resultados da simulação que apresentou erro médio de continuidade para escoamento superficial de -0,10% e 0,04% para propagação de vazão.

Tabela 22 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 14/01/2022 no Túnel Josué de Castro

Aspectos	Observado	Simulado	Erro Relativo (%)
Lâmina máxima de inundação (m)	1,00	1,00	0,00%
Volume máximo de inundação (m ³)	2196	2371	-7,38%
Erros de Escoamento Superficial		-0,01%	
Continuidade Propagação de Vazão		0,04%	

Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que a lâmina máxima de alagamento e volume máximo de alagamento estão com erros relativos abaixo dos 10%, que foram os limites utilizados pelos autores citados anteriormente e que os erros médios de continuidade para escoamento superficial e para propagação de vazão também se encontram dentro do admissível, garantindo assim que os dados de entrada foram inseridos corretamente.

4.1.3 Avaliação da utilização de medida compensatória

Para o Túnel Josué de Castro foi simulado a implantação de um reservatório cuja função é de armazenamento e de condução das águas captadas para um poço de bombeamento no qual a água é direcionada para seu exutório, essa técnica já foi empregada no Túnel da Abolição, o outro túnel do estudo. Assim foi simulada a inserção de condutos de concreto com 1,5 m de diâmetro por quase toda a extensão do túnel em seu sentido longitudinal e transversal, conforme representado na Figura 41, cuja capacidade de volume é de aproximadamente de 300 m³.

Figura 41 - Representação dos condutos de armazenamento do Túnel Josué de Castro



Fonte: Elaborado pela autora a partir do software Google Earth (2022).

Após a definição dos condutos reservatórios e com a utilização do SWMM, visando simular a eficiência da solução proposta, segue na Tabela 23 o comparativo entre os resultados das lâminas de alagamento e do volume de alagamento para a precipitação do dia 13 de junho de 2019 com e sem a aplicação dos condutos de armazenamento extraídos do software.

Tabela 23 - Comparativo entre os resultados obtidos para os eventos de precipitação do dia 13/06/2019 sem e com os Condutos de Armazenamento

Aspectos	Evento 13/06/2019		
	Sem Condutos de Armazenamento	Com Condutos de Armazenamento	Diferença Relativa
Lâmina máxima de alagamento (m)	1,55	1,11	-28,39%
Volume máximo de alagamento (m ³)	3015	2121	-29,65%
Escoamento Superficial	-0,06%	-0,06%	
Erros de Continuidade Propagação de Vazão	1,23%	0,11%	

Fonte: Elaborado pela autora.

Como resultados apresentados na Tabela 2 observou-se que a lâmina máxima de alagamento e o volume máximo de alagamento diminuíram respectivamente 28,39% e 29,65% para o evento de precipitação do dia 13 de junho de 2019. Porém mesmo com a adoção dos condutos de armazenamento, o software apresentou que a mesma 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 1,10 m. Ou seja, o emprego dessa medida não é adequado para resolução do problema.

4.2 Estudo do Túnel da Abolição:

O túnel da Abolição foi inaugurado dia 12 de abril de 2015. O túnel liga a Rua Real da Torre à Rua João Ivo da Silva, sob a Avenida Caxangá. A obra, que faz parte do Corredor Leste-Oeste e eliminou um dos cruzamentos mais congestionados e à época a obra custou R\$ 16 milhões. A obra deveria ter sido finalizada em janeiro de 2014, antes da Copa do Mundo, mas houve problemas com a construtora responsável pela execução e vários problemas com o lençol freático da área, que ocasionava os constantes alagamentos.

Na Figura 42 encontra-se a delimitação do local do túnel, que fica situado na área de contribuição Ac1 e as áreas permeáveis das 2 áreas de contribuição que estão com a delimitação em verde.

Figura 42 – Localização do Túnel da Abolição e a delimitação das bacias inseridas na área de abrangência do estudo



 Solo Permeável

Fonte: Elaborado pela autora.

Abaixo a Tabela 24 apresenta a síntese dos dados de entrada das áreas de contribuição, percebe-se que a área de estudo apresenta um percentual de área permeável maior na Ac1, que equivale a 17% da área total dessa área de contribuição e onde está situado o Museu da Abolição. Para a área total de estudo tem-se um percentual de 88% de área impermeável

Tabela 24 – Síntese dos dados de entrada das áreas de contribuição do Túnel da Abolição

AC - Área de Contribuição	Ac1	Ac2	AC - Área de Contribuição Área (ha)	Le - Largura Equivalente	Comp. Do Talvegue Principal (m)	Cotas de Superfície		Is - Declividade Superficial (%)	Área Impermeável (%)	Armazenamento em depressões (mm)			
						Cota montante (m)	Cota Jusante (m)			N impermeável	N permeável	Impermeável	Permeável
	Ac1		0,86	31,73	97,00	4,50	4,08	1,23%	83%	0,02	0,15	2,54	5,00
	Ac2		0,59	49,71	68,00	3,46	3,60	0,21%	95%	0,02	0,15	2,54	5,00

Fonte: Autora (2022)

4.2.1 Diagnóstico da Rede de drenagem existente

O sistema de drenagem do local de estudo está representado na Figura 43. O coletor tronco principal que possui 600 mm de diâmetro inicia na Rua Real da Torre e segue até o ponto de jusante no canal existente na Rua João Ivo da Silva, recebendo a contribuição da rede da Rua Hercílio Cunha.

Figura 43 - Sentido da drenagem implantada no Túnel da Abolição até o seu exutório

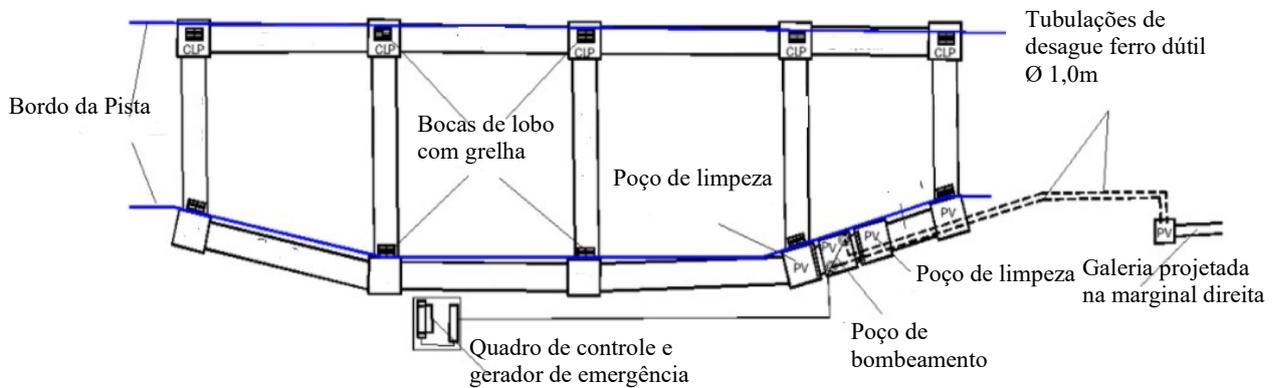


Fonte: Elaborado pela autora.

O túnel se apresenta em um ponto baixo com cota muito inferior ao nível das ruas adjacentes, por isso foi necessário adotar um sistema de bombeamento para evacuar as águas acumuladas. Foi construído no ponto mais baixo da pista um sistema de armazenamento com tubulações de concreto.

Dados do Governo do Estado de Pernambuco (2012) informam que as tubulações são de concreto e possuem diâmetro constante igual a 1,5 m e foram concebidas com a função dupla de conduzir e armazenar as águas acumuladas em caso de necessidade, ou seja, quando houvesse uma eventualidade de uma falha total do sistema de bombeamento, poderia acumular a água no interior das tubulações. Ainda segundo o Governo do Estado de Pernambuco (2012), foram adotados um tempo de recorrência de 25 anos e a chuva de maior intensidade provável, correspondente a uma duração de 5 minutos, resultando em uma intensidade média de 176 mm/h, conforme as curvas IDF da região de Recife definidas no Estudo Hidrológico. Na figura 44 encontra-se o esquema da drenagem do reservatório do túnel. A extensão conjunta das tubulações (150 m) resulta em uma capacidade de armazenamento de 265 m³.

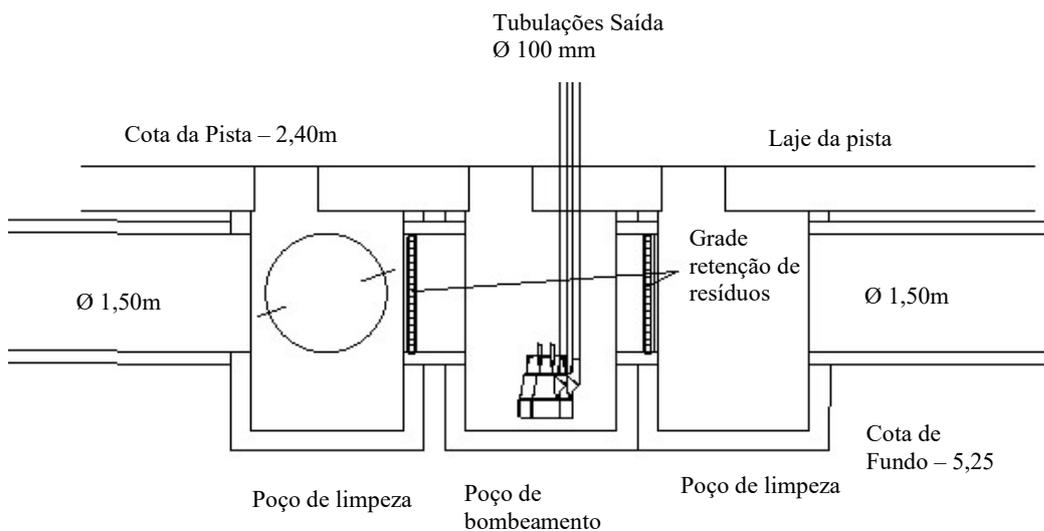
Figura 44 – Esquema de Drenagem do Reservatório do Túnel da Abolição



Fonte: Governo do Estado de Pernambuco (2012)

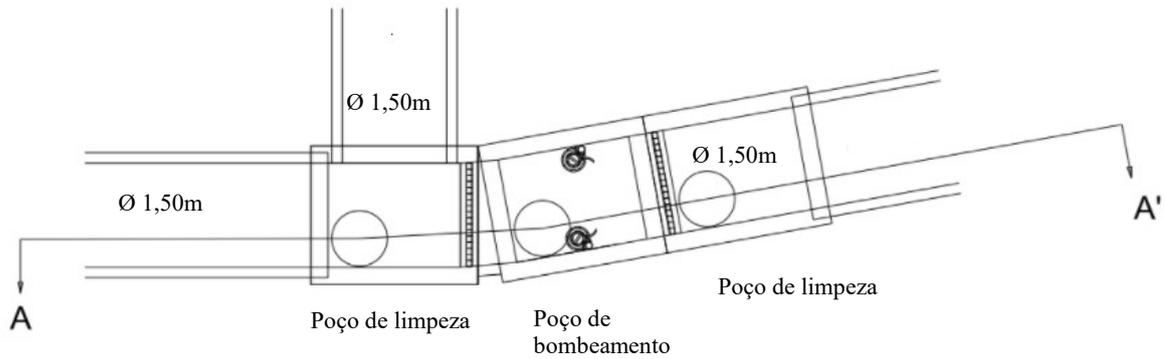
As figuras 45 e 46 mostram o detalhe da Estação de Bombeamento. Para o interior do poço de bombeamento, de dimensões 1,50 x 1,50 x 2,80 foram instaladas duas bombas submersíveis de 6 cv e mais uma reserva de 4 cv. A cota de soleira do poço fica 1m abaixo da geratriz inferior dos tubos de chegada, para manter as bombas permanentemente submersas. Cada uma das bombas evacua a sua vazão de recalque mediante duas tubulações de ferro dúctil de diâmetro 100 mm até o ponto de deságue na nova galeria projetada na marginal direita e que segue pela Rua João Ivo da Silva até o seu exutório com uma rede de drenagem de 600 mm.

Figura 45 – Detalhe da Estação de Bombeamento - Perfil



Fonte: Governo do Estado de Pernambuco (2012)

Figura 46 – Detalhe da Estação de Bombeamento - Corte



Fonte: Governo do Estado de Pernambuco (2012)

Dos pontos de captação no interior do túnel que possui 260,00 m de extensão, existem 5 bocas de lobo em cada lado do túnel localizadas na parte mais baixa, cuja extensão é de 50 metros e que periodicamente estão obstruídos por garrafas plásticas e outros resíduos que dificultam a passagem das águas. As Figura 47 ilustram alguns desses pontos de captação na margem esquerda (A) e na margem direita (B).

Figuras 47 - Pontos de captação de água no interior do Túnel da Abolição lado esquerdo (A) e direito (B)



Fonte: Elaborado pela autora.

Nas calçadas da praça estão dispostos 7 ralos para o escoamento das águas pluviais, na área central da praça não há sistema de drenagem fazendo com que a água seja direcionada para uma calha improvisada que deságua como em forma de cascata no interior do túnel, dificultando em momentos de maior vazão a mobilidade dos motoristas (Figura 48).

Figura 48 - Imagem do interior do Túnel com a queda de água que escorre da calha



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo reportagens há um histórico dos alagamentos do Túnel da Abolição, que ocorrem desde a sua construção sendo eles ocasionados por precipitações ou por falhas ou interrupções do sistema de drenagem das bombas. A Figura 49 ilustra um dos alagamentos ocorridos durante a construção do Túnel da Abolição em abril de 2014 e em 28 de maio de 2015 (Figura 50) o alagamento ocorreu após uma noite de chuva. O que ocasionou o alagamento foi um ato de vandalismo, quando ocorreu a quebra da chave geral do sistema elétrico, impossibilitando o funcionamento das bombas.

Figura 49 - Alagamento durante a Construção do Túnel da Abolição



Fonte: G1.Globo (2020)

Figura 50 - Alagamento do dia 28 de maio de 2015 devido à falha no sistema elétrico



Fonte: G1.Globo (2020)

Em 24 julho de 2015 o equipamento também chegou a ser bloqueado devido ao alagamento, desta vez o problema se deu devido à sobrecarga no sistema elétrico, que provocou o desligamento da bomba de drenagem, conforme Figura 51. Em janeiro de 2016, mesmo não

tendo chovido, o túnel alagou e a água alcançou quase 20 centímetros, pode-se observar o alagamento na Figura 52. À época, os cabos de energia das duas bombas de sucção de água haviam sido roubados.

Figura 51 - Alagamento do dia 24 de julho de 2015 no Túnel da Abolição



Fonte: G1.Globo (2020)

Figura 52 - Alagamento do dia 02 de janeiro de 2016 no Túnel da Abolição



Fonte: G1.Globo (20

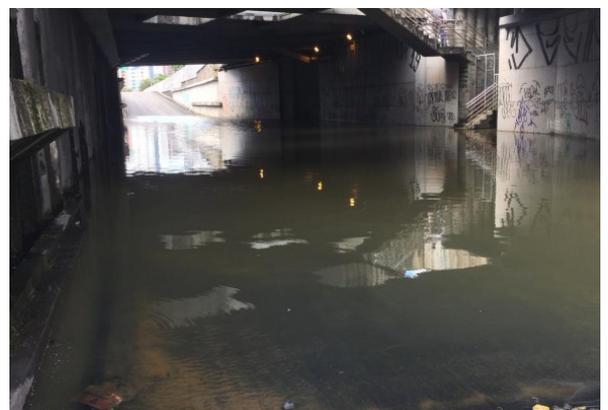
Em julho de 2018 (Figura 53) iniciaram uma obra de revestimento das paredes do túnel para ajustar os problemas de infiltrações, que até hoje ainda existem. E mais uma vez após chuvas fortes que alagaram diversas áreas na cidade do Recife, o túnel da Abolição veio a alagar novamente chegando a uma altura de alagamento de 50 cm (Figura 54) no seu ponto mais baixo no dia 13 de junho de 2019.

Figura 53 - Obras de recuperação para controle das infiltrações



Fonte: G1.Globo (2020)

Figura 54 - Alagamento do dia 13 de junho de 2019 no Túnel da Abolição



Fonte: G1.Globo (2020)

No ano de 2020 houve nova obra de requalificação das paredes internas para diminuir o problema crônico das infiltrações, que ocasionaram a interdição das faixas por alguns dias, essa operação pode ser observada na Figura 55. E os alagamentos continuaram pelos anos de 2020, 2021 e 2022. Recentemente em 14 de janeiro de 2022 (Figura 56), depois das chuvas que caíram na madrugada e devido a uma queda de energia que interrompeu o funcionamento das bombas de drenagem, o túnel foi mais uma vez interditado e a água precisou ser retirada por caminhão pipa.

Figura 55 – Faixa interditada para requalificação das paredes do Túnel da Abolição



Fonte: G1.Globo (2020)

Figura 56 - Alagamento do dia 14 de janeiro de 2022 no Túnel da Abolição



Fonte: G1.Globo (2022)

Todo o histórico vem corroborar que a drenagem existente, não ocorre sem o funcionamento das bombas, e que o reservatório criado não performa de maneira adequada, visto que mesmo em épocas sem chuva, só com a influência da maré o túnel alaga.

Assim, para o evento do dia 13 de junho de 2019, utilizado como referência para o estudo, podemos observar respectivamente nas Figura 57 e 58 os efeitos deste evento pluviométrico com a imagem de como o Túnel ficou e a área de alagamento do Túnel.

Figura 57 - Alagamento no Túnel da Abolição ocorrido no dia 13/06/2019



Fonte: G1 Globo (2020)

Figura 58 - Imagem aérea da área de Alagamento no Túnel da Abolição



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os registros fotográficos que mostraram a situação do túnel, foi possível delimitar a área de alagamento do local, que apresentou uma área média de 917,05 m², e de acordo com a lamina da água de 50 cm aferida no ponto de controle e com os dados topografia do túnel obtidos no Projeto Executivo do Túnel da Abolição (2012), foi traçado um perfil no Autocad 2022 para verificação do volume d'água do alagamento provocado pelo evento de precipitação que foi na ordem de 356 m³ e que somado ao volume do reservatório de 265 m³ resulta num volume total de 621 m³.

4.2.2 Resultados das Simulações no SWMM

As simulações no software SWMM foram realizadas para verificar a rede de drenagem existente, quais trechos estavam estrangulando o fluxo das águas pluviais e causando problemas de alagamentos na área estudada. Além disso serão utilizadas para verificar a eficácia do emprego de alguma técnica compensatória durante essa situação de precipitação.

Assim como no estudo do primeiro túnel, inicialmente foram inseridos os parâmetros e variáveis de entrada no modelo e realizada uma calibração simplificada do modelo com base no evento de precipitação do dia 13 de junho de 2019 e que se baseou no comparativo do volume de alagamento simulado em comparação ao ocorrido no dia da precipitação, apenas no ponto de controle.

Após o levantamento de informações, como dados dos projetos, perfil do túnel, drenagem existente, fotos e vídeos do alagamento ocorrido no dia 13 de junho de 2019 e de observações

in loco, obteve-se uma área aproximada de alagamento de 917,05 m² e uma altura máxima de lâmina d'água de 0,50 m, gerando um volume de 621 m³. Para esta relação, considerou-se a equivalência entre a área de alagamento delimitada (917 m²) e a máxima altura da lâmina d'água observada (0,50 m), interpolando as áreas de alagamento para outras alturas de lâminas d'água, cujo produto entre estes fatores resulta, em termos estimativos, nos volumes alagados. Assim foi definido o volume de alagamento da precipitação do dia 13 de junho de 2019.

Durante a calibração conseguiu-se alcançar uma altura de alagamento simulada de 0,50 cm no ponto de controle (Nó 13) e um volume máximo gerado de 614 m³. Na tabela 25 pode-se observar os resultados da simulação. 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.

Tabela 25 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 13/06/2019 no Túnel da Abolição

Aspectos		Observado	Simulado	Erro Relativo (%)
Lâmina máxima de alagamento (m)		0,45	0,45	0,00%
Volume máximo de alagamento (m ³)		621	614	1,14%
Erros de Continuidade	Escoamento Superficial		0,00%	
	Propagação de Vazão		1,01%	

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como no estudo do primeiro túnel, os resultados mostraram-se satisfatórios. Diante disso, pode-se constatar que a qualidade da simulação foi boa, com erros pequenos na equação do balanço de massa (continuidade) para o escoamento superficial e para a propagação de vazão, considerando que os dados de entrada foram informados corretamente.

Após a calibração partiu-se para a validação com a chuva do dia 14 de janeiro de 2022, onde foram utilizados a mesma modelagem definida na calibração, ou seja, sem alterar os parâmetros físicos do modelo, e modificando apenas a série de precipitação e a curva de maré para os dados aferidos para este dia.

A Tabela 26 mostra os resultados da simulação, também apresentando erro médio de continuidade para escoamento superficial de 0,00%, e de 1,17% para propagação de vazão. Observa-se que a lâmina máxima de alagamento e o volume máximo de alagamento estão

dentro do limite dos 10% que foi o limite usado pelos autores citados anteriormente, garantindo assim que os dados foram inseridos corretamente.

Tabela 26 – Principais resultados obtidos para o evento do dia 14/01/2022 no Túnel da Abolição

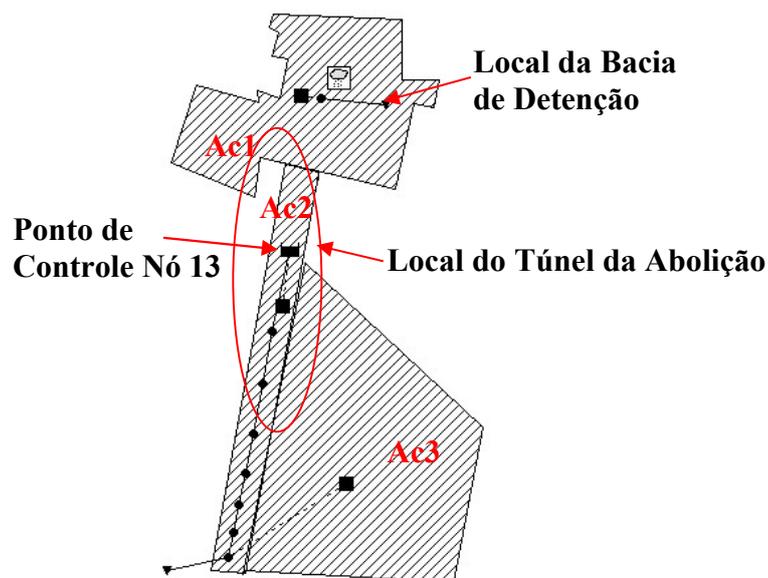
Aspectos		Observado	Simulado	Erro Relativo (%)
Lâmina máxima de inundação (m)		0,45	0,49	8,89%
Volume máximo de inundação (m ³)		585	540	-7,72%
Erros de Continuidade	Escoamento Superficial		0,00%	
	Propagação de Vazão		1,17%	

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Avaliação da utilização de medida 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 armazenamento e de condução das águas captadas para um poço de bombeamento no qual a água é direcionada para seu exutório. Assim foi simulada a inserção de uma bacia de detenção ao lado do túnel, no terreno do museu, conforme representado na figura 59.

Figura 59 - Representação das áreas de contribuição, do Nó 13 e da Bacia de detenção



Fonte: Elaborado pela autora a partir do software SWMM (2022).

Como a área de estudo está situada ao lado de um museu que possui uma extensa área externa semipermeável, foi utilizado o local do anfiteatro que possui uma área aproximada de 1200 m² para funcionar como uma bacia de detenção e parte da água captada (Ac1), e que antecede o Túnel seria conduzida para essa bacia de detenção.

É importante ressaltar que para a implantação do reservatório de detenção proposto, deve-se analisar e verificar a compatibilidade de sua locação e dimensões com outros elementos da infraestrutura urbana local, como: rede de água e esgoto; cabeamento subterrâneo de eletricidade, telefonia e internet; raízes de árvores; entre outros aspectos. Para o caso em estudo, foi aproveitada toda a estrutura do anfiteatro existente no túnel da abolição para que o mesmo funcionasse como um reservatório.

A seguir na tabela 27 estão expostos os resultados comparativos entre os resultados para a precipitação do dia 13 de junho de 2019 com e sem a bacia de detenção.

Tabela 27 - Comparativo entre os resultados obtidos para os eventos de precipitação do dia 13/06/2019 sem e com a Bacia de detenção

Evento 13/06/2019			
Aspectos	Sem Bacia de Detenção	Com 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%
Tempo de alagamento (h)	10,79	9,90	-8,25%
Erros de Continuidade	Escoamento Superficial Propagação de Vazão	0,00% 0,38%	0,00%

Fonte: Elaborado pela autora.

Como resultados apresentados na Tabela 26 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 de junho de 2019. Além disso, houve um decréscimo no tempo de alagamento de 1 hora em relação aos cenários sem e com a bacia de detenção. Porém mesmo com a adoção da bacia de detenção, o software apresentou que a mesma 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 padrão. Ou seja, o emprego dessa medida não é adequado para resolução do problema.

Assim, como o perfil do túnel apresenta cota muito inferior ao nível das ruas adjacentes, ele próprio funciona como um reservatório, e mesmo com um desvio de parte das águas captadas na área de contribuição Ac1 que antecede o Túnel, o volume que acomete o mesmo, apesar de ser menor, ainda resulta numa lâmina d'água alta suficiente para prejudicar o uso do túnel.

Devido à concepção do projeto é necessário um sistema de bombeamento que não falhe, ou seja, é preciso monitoramento do nível dos reservatórios para onde a água é escoada, com o controle remoto das bombas de desafogamento dos túneis para que elas sejam acionadas quando atingirem níveis elevados e além disso, avisos em caso de falhas nas bombas, para que problemas de não funcionamento sejam percebidos com antecedência e possam ser resolvidos antes de situações de alagamentos.

4.3 Sistema de monitoramento

Devido a geometria dos túneis e da concepção de seus projetos, eles acabam funcionando como reservatórios da água precipitada, onde a drenagem direciona as águas captadas à jusante dos túneis para o interior deles. Sugere-se a implementação de um sistema de monitoramento em tempo real para controle do sistema de bombeamento do túnel onde os mesmos possam ter acompanhamento quanto ao nível de água dos poços de captação e sobre o funcionamento das bombas, para que haja acionamento de alerta no momento em que houver alguma falha.

Durante a sequência desse estudo, no segundo semestre de 2021 a cidade do Recife adquiriu sistemas de monitoramento para três dos 5 túneis da cidade do Recife: o Túnel Josué de Castro, o Túnel Augusto Lucena e o Túnel Chico Science. Com esse sistema os operadores da companhia responsável pela manutenção desses túneis (EMLURB) conseguem controlar o sistema de drenagem da água das chuvas dos túneis, a fim de não atrapalhar o trânsito de veículos. Para isso, o software permite monitorar o nível dos reservatórios, para onde a água é escoada através de bueiros localizados nas laterais dos túneis. Além disso, controla todas as bombas de desafogamento dos túneis, que bombeiam a água dos reservatórios à rede fluvial.

O controle automático da partida das bombas acontece pelo nível dos reservatórios, onde um controlador lógico programável que envia as informações relativas ao nível dos reservatórios

e do status de funcionamento das bombas para um servidor incorporado na sala de controle da equipe técnica da EMLURB.

Além disso, apesar do dispositivo não existir, deveria ser criado um alerta, como uma placa sinalizadora antes da entrada do túnel, que pudesse avisar sobre o risco de alagamento para que os carros não entrassem no túnel e assim evitassem maiores prejuízos sociais.

Porém vale salientar que o sistema é sensível a falta de energia e que a cidade é alvo constante de atos de vandalismos e roubos que também podem interromper esse monitoramento e o funcionamento das bombas. O que foi verificado no Túnel Josué de Castro durante a chuva de 14 de janeiro de 2022 onde as bombas não estavam funcionando corretamente e houve falha na drenagem, ocasionando o alagamento do túnel.

4.3.1 Análise financeira do sistema de automação

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 para estimar qual valor seria gasto atualmente para implantação desse mesmo sistema de monitoramento e que totalizam no preço atual em 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 o acionado de acordo com o nível dos reservatórios através de um controlador lógico programável (CLP). O CLP vem com modem GSM (Sistema Global de Comunicações Móveis) incorporado, dessa forma, os dados das bombas e níveis dos reservatórios são transmitidos por protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) a um servidor MQTT Mosquitto, que se encontra no servidor do cliente (laptop com sistema operacional Windows). Com os dados chegando ao servidor do cliente é possível monitorar o status das bombas, níveis dos reservatórios, histórico de alarmes e tendências via telas gráficas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente capítulo expõe as conclusões e recomendações após levantamento e análise da rede de drenagem existente e do histórico de alagamentos ocorridos nos Túnel Josué de Castro localizado no bairro do Pina, e do Túnel da Abolição localizado no bairro da Madalena.

A partir dos dados e do estudo realizado a respeito da drenagem existente no Túnel Josué de Castro, foi verificado que quanto à concepção atual de drenagem do referido túnel, faz-se necessário que a mesma seja requalificada. Foram observadas mudanças bruscas (90°) no sentido do fluxo d'água, problemas de declividade, que desfavorecem o escoamento pelos condutos subterrâneos, quantidades insuficientes de dispositivos de captação durante a área de estudo e a saída do exutório completamente obstruída, o que impedia o desague das águas captadas.

Em relação ao Túnel da Abolição o principal problema é o seu greide longitudinal, o túnel se apresenta em um ponto muito inferior ao nível das ruas e que sofre com a variação da maré. Mesmo com o reservatório existente foram registrados alagamentos até sem a ocorrência de precipitação, o que corrobora sobre a influência do nível da maré neste túnel. O seu sistema de bombeamento é vulnerável e por diversas ocasiões não funcionou, ocasionando alagamentos no túnel e conseqüentemente sua interdição.

Conforme os resultados obtidos durante a calibração e validação no SWMM, tanto para o Túnel Josué de Castro, quanto para o Túnel da Abolição, podemos constatar a qualidade da calibração, que mostrou resultados satisfatórios, com erros pequenos para o escoamento superficial de -0,6% e 0,0% respectivamente para o Túnel Josué de Castro e para o Túnel da Abolição, e erro de propagação da vazão de 1,23% para o Túnel Josué de Castro e 1,01% para o Túnel da Abolição. A lâmina máxima de alagamento e o volume de alagamento para ambos os túneis tiveram seus erros relativos com percentual abaixo de 5%.

Além disso, mesmo com a calibração simplificada, os modelos tiveram erros aceitáveis durante a validação, com erros abaixo dos 10%, que foi o limite usado pelos autores Allison Silva (2018), Oliveira (2017), Silva Júnior et al. (2017), Silva Júnior (2015) e Silva e Cabral

(2014), que realizaram trabalhos semelhantes, garantindo assim que os dados foram inseridos corretamente.

Em relação a proposição da técnica compensatória utilizada para o Túnel Josué de Castro, que foi a simulação do emprego de um reservatório abaixo da pista do túnel, observou-se que a lâmina máxima de alagamento e o volume máximo de alagamento diminuíram respectivamente 29,65 % e 28,39 % para o evento de precipitação da calibração. Porém mesmo com a adoção do reservatório, o software apresentou que ela 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 1,11 m. Para o Túnel da Abolição onde se adotou o emprego de uma bacia de detenção que receberia o volume de água captado da área de contribuição Ac1 foram verificados a redução do volume em 14% e da altura de alagamento no ponto de controle em 17,66%, além da diminuição em 10% do tempo de alagamento, porém insuficientes para resolver o problema do túnel que evitasse a sua interdição.

Para resolução do alagamento, sugere-se a adoção de sistema de monitoramento em tempo real para controle do sistema de bombeamento do túnel. Porém vale salientar que o sistema é sensível a falta de energia e que a cidade é alvo constante de atos de vandalismos e roubos que também podem interromper esse monitoramento e o funcionamento das bombas.

Reforça-se ainda a importância do correto dimensionamento dos projetos, onde haja uma interligação entre as disciplinas de arquitetura, infraestrutura, drenagem e transporte. 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.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de pesquisas futuras propõe-se:

Ainda existem mais três túneis da cidade do Recife que não foram avaliados, dessa forma esse estudo pode ser aplicado nesses outros pontos;

Realizar novas simulações hidráulica e hidrológica com os dados da rede de drenagem medidos em campo para gerar um cenário mais próximo da realidade;

Avaliar a viabilidade de implantação de outras técnicas compensatórias na área estudada e aferir quais seus impactos de atenuação nos alagamentos;

Realizar uma nova concepção de projeto, onde o mesmo não direcione e concentre as águas captadas para o interior dos túneis;

Utilizar o tipo de calibração cruzada, trocando as datas de calibração e validação para avaliação dos resultados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO. Distrito Federal. Disponível em: <https://www.adasa.df.gov.br/>. Acesso em: 02 fev. 2022.

ALBUQUERQUE, Marcelo. **Roma Antiga: Para artistas, arquitetos e viajantes**. 1. ed. Belo Horizonte: Arte e Culturas, 2020. 510 p.

ALISSON SILVA. C. **Modelagem hidrológica-hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco**. Recife: UPE, 2018. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Recife, 2018.

ALMEIDA, L.; SERRA J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129 - 137, jan./jun. 2017. Disponível em: <<https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/viewFile/113/435>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

AMANTHEA, N. R.; NASCIMENTO, N. O. Urbanização de baixo impacto (LID): uso de geotecnologias para estimativa do tempo de concentração de bacia em cenário de pré-desenvolvimento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 249-266, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10844** - Instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15661**: Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos. Rio de Janeiro, 2019.

BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BARROS, Mario Thadeu Leme de. 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. Acesso em: 24 set. 2022.

BENINI, Rubens de Miranda; MENDIONDO, Eduardo Mario. Urbanização e impactos no ciclo hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Revista Floresta e Ambiente**, v.22, n. 2, p. 211-222, 2015. Disponível em: Acesso em: 29 abr. 2020.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Presidência da República: Casa Civil. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 23 set. 2020.

CABRAL, J.J.S.P., ALENCAR, A.V., 2005. **Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Recife e a convivência com as águas**. Cooperação Brasil – Itália em saneamento ambiental, ed. Gráfica Brasil, Brasília, p. 111– 130.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à modelagem dinâmica espacial. Cursos.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, MG. p.55, 2003.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes.** Editora: Oficina de Textos, São Paulo-SP, 2005. 302 p.

CARMO, W. J. E.; MARCHI, L. F. de. (2013). **Uma visão holística do plano diretor de drenagem urbana.** Disponível em: <http://jus.com.br/artigos/25944/uma-visao-holistica-doplano-diretor-de-drenagem-urbana/2#ixzz32HzDs4Nl>. Acesso em: 24 set. 2020.

CASTRO, ALEXANDRE CLOVES **O processo de urbanização e o surgimento das primeiras universidades** Geografia Ensino e Pesquisa, v. 18, n.1, p. 39-54, jan./abr. 2014.

CEMADEM - **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais-** Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br>>. Acesso em: 04 mar. 2022.

CHRISTOFÍDIS D. **O ciclo da água, os paradigmas da drenagem urbana e a sintonia com a natureza.** Brasília, DF: Universidade de Brasília. No prelo 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sdeb/a/jpNVWVZSdNRRyQS3qtWmz9g/?lang=pt>. Acesso em: 14 maio 2022.

COLLISCHONN WALTER; TASSI RUTINÉIA. **Introduzindo hidrologia**, IPH UFRGS Maio, Porto Alegre, RS. 151 p., 2008.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na Avaliação de Diferentes Níveis de Detalhamento da Bacia Hidrográfica Submetida ao Processo de transformação Chuva-Vazão.** 2009. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Carlos – SP, 2009. 225.p.

CPRM. **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.** Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Ciclo-Hidrologico-1376.html>> Acesso em: 02 fev. 2022.

DECINA, T.G.T. e Brandão, J.L.B. **Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana.** 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/zJ5MvDthtHkxY7hvFvHCGSc/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 24 abr. 2022

DHN-MB. Diretoria de Hidrologia e Navegação. Ministério da Marinha. **Tábuas de Marés para 2019.** Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-publicacoes/tabuas-das-mares> Acesso em: 01 maio 2020.

DHN-MB. Diretoria de Hidrologia e Navegação. Ministério da Marinha. Rio de Janeiro. **Tábuas de Marés para 2020.** Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-publicacoes/tabuas-das-mares> Acesso em: 01 maio 2020.

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

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Recife uma cidade construída sobre aterros**. 2016. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2016/06/recife-uma-cidade-construida-sobre-aterros.html>. Acesso em: 26 mar. 2020.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Mulher é encontrada morta dentro de carro submerso no Túnel Josué de Castro, no Pina**. 2019. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2019/06/mulher-e-encontrada-morta-dentro-de-carro-submerso-no-tunel-josue-de-c.html>. Acesso em: 21 mar. 2022.

EMLURB. **Nota Técnica em Andamento - NOTA TÉCNICA 013/2022 - Alagamento no Túnel Josué de Castro**. (Versão concedida em visita técnica). Recife, mar. 2022.

EMLURB. **Diretrizes Executivas de Serviços para Obras de Drenagem Superficial**. Vol.4/ES-D01. Recife. 2003. 20p. Disponível em http://www.recife.pe.gov.br/pr/servicospublicos/emlurb/cadernoencargos/drenagem_superficial.pdf. Acesso em: 01 jun. 2022.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

FOLHAPE. **Chuvas fecham túnel no Pina, na Zona Sul do Recife**. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/noticias/pernambuco/chuvas-fecham-tunel-no-pina-na-zona-sul-do-recife/107757/>. Acesso em: 30 maio 2020.

FONTE, Felipe José Meira. **Proposta para um sistema de inspeção e manutenção dos túneis da cidade do Recife**. 2011. TCC. (Programa de Pós-graduação em Engenharia) - Universidade de Pernambuco. Recife, 2011.

FONTE, Felipe José Meira; VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Proposta para um Sistema de Inspeção e Manutenção dos Túneis da Cidade do Recife**. In: XIII Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas – CINPAR, 2017. Fortaleza, 7 a 9 de setembro de 2017.

FORBES pontua 14 tecnologias para centros urbanos. **Revista Projeto**. São Paulo, 20 de ago. de 2020. Disponível em: <https://revistaprojeto.com.br/noticias/forbes-pontua-14-tecnologias-para-centros-urbanos/>. Acesso em: 24 ago. 2022.

FRAGA, A. T. F. C. **Interrelação entre o planejamento urbano, ocupação do solo e problemas de drenagem de águas pluviais na Bacia do Rio Arrombados (Cabo-PE)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, p. 177. 2013.

GLOBO. **Túnel da Abolição Interditado**. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/01/17/tunel-da-abolicao-e-interditado->

devido-a-alagamento-e-transito-fica-complicado-na-zona-oeste-do-recife.shtml>. Acesso em 23 mar. 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.

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

_____. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) – 2000**. IBGE: Rio de Janeiro, 2002. 397 p.

_____. **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>>. Acesso em: 26 mar. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Boletim Regional Urbano e Ambiental Rio de Janeiro**, (2022). Disponível em https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_contentview=articleid=38875&Itemid=7. Acesso em: 10 fev. 2022.

IDTP. INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO. Estudo Técnico - **Adaptação às Mudanças Climáticas na Mobilidade Urbana** (2017). Disponível em <https://itdpbrasil.org/>. Acesso em: 07 jan. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). **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.

_____. **Decreto nº 10.588, de 24 de dezembro de 2020**. Dispõe sobre o apoio técnico e financeiro de que trata o art. 13 da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, sobre a alocação de recursos públicos federais e os financiamentos. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.588-de-24-de-dezembro-de-2020-296387871>>. Acesso em: 02 fev. 2022.

_____. **Lei Complementar nº 02, de 23 de Abril de 2021**. Institui o Plano Diretor do Município do Recife, revogando a Lei Municipal nº 17.511, de 29 de dezembro de 2008. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 02 fev. 2022.

_____. **Lei de Saneamento nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**: Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico, altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 02 fev. 2022.

_____. **Lei de Saneamento nº 14.026, de 15 de julho de 2020:** Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>>. Acesso em: 02 fev. 2022.

_____. **Lei de Saneamento nº 18.770, de 30 de dezembro de 2020.** Institui o Plano Diretor do Município do Recife, revogando a lei municipal nº 17.511, de 29 de dezembro de 2008. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=407224>>. Acesso em 02 fev. 2022.

_____. **Plano Diretor em Drenagem Urbana de Irati – 2019.** Paraná, 2019. 101 p.

JC ONLINE. **Recife tem 10º pior trânsito do mundo, segundo pesquisa feita em 403 cidades.** Publicado em 07/06/2019 Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/jc-transito/noticia/2019/06/07/recife-tem-10-pior-transito-do-mundo-segundo-pesquisa-feita-em-403-cidades-380593.php> Acesso em: 26 mar. 2020.

LENHS/UFPB. LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA EM SANEAMENTO. **Manual do Usuário SWMM 5.0.** Universidade Federal da Paraíba, UFPB, BRASIL. 2010, 280 p.

LINS, E.; BURGOS, R.; MONTEIRO, E. Os Novos Túneis Urbanos da Cidade do Recife: Casos de Degradação Prematura de Estruturas de Concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, 28 ago. 2017.

LUCENA, Felipe. - Diário do RIO (2018) - **História do Túnel Rio Comprido-Laranjeiras, o mais antigo da cidade.** Disponível em: <https://diariodorio.com/historia-do-tunel-rio-comprido-laranjeiras-o-mais-antigo-da-cidade/> Acesso em: 20 maio 2020.

MACHADO, F. W. **Modelagem Chuva-Vazão Mensal Utilizando Redes Neurais Artificiais.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p.174. 2005.

MACHADO, E.S., RIGHETTO, A.M. 1981. Modelo hidrológico determinístico para bacias urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 4, 1981, Fortaleza. **Anais.** São Paulo: ABRH. 4v. v.3, p. 561-580.

MDRU. Ministério do Desenvolvimento Regional e Urbano. Brasília. Disponível em: (20<https://www.gov.br/mdr/pt-br/composicao/secretarias-nacionais/secretaria-nacional-de-desenvolvimento-regional-e-urbano>). Acesso em: 10 mar. 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, 155 p. 2019.

MESQUITA, Janine Brandão de Farias; LIMA NETO, Iran Eduardo. 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; SIMPÓSIO DE REVITALIZAÇÃO DE RIOS URBANOS, III., 21 e 22 out. 2020. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. **Anais online**[...] Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2020. Formato online.

MIYAMOTO, J. S. **Grandes Túneis urbanos: uma proposta de gestão ambiental**. UFRJ, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro, 120 p. 2010.

MONTEIRO, V. V.; SILVA, Solange da Silva, SANTOS; Felipe Corrêa Veloso; Anselmo SOUZA, C. (2021). **SWMM – Modelo de aplicação de modelagem hidrológica para as cidades** - Capítulo 6 - Gestão da Produção em Foco – Volume 50 - Belo Horizonte Poisson 2021.

MUMFORD, Lewis. **A cidade na história: suas origens, transformações e perspectivas**. 4 ed. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

NFPA 502 - **National Fire Protection Association (2008)**.– Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, p. 502-9, 2008.

OLIVEIRA, R. L. M. **Alternativas compensatórias para drenagem urbana em ponto crítico da cidade de Recife- PE**. (2017). Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Recife, 101 p. 2017.

PARISI, SUELLEM ATILA. **Análise da capacidade de infiltração para atenuação de alagamento em um ponto crítico na cidade do Recife Recife-PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Recife, 153 p. 2019.

PEREIRA, TATIANE SOUZA RODRIGUES. **Modelagem e monitoramento hidrológico das bacias hidrográficas dos córregos Botafogo e Cascavél**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente. Goiânia– GO. 147 p. 2015.

PORTAL TERRA: **Recife registra 6ª maior chuva em 24h para junho em 58 anos**. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/climatempo/recife-registra-6-maior-chuva-em-24h-para-junho-em-58-anos,8d475fc81c5690af258c2e1faf6512c14798y4d7.html>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

REIG Fabado, Isabel. Obras de infraestructura bajo financiación privada: La experiencia Europea do proyecto Eurotúnel frente al proyecto Argentino-Boliviano del gasoducto. **Revista Boliviana de Derecho**. 2008; (6):133-154. Publicada em 6 de Julho de 2008. pp. 133-154 ISSN: 2070-8157. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427539906008>>. Acesso em: 22 maio 2022.

SADLER, J.M., Haselden, N., Mellon, K., Hackel, A., Son, V., Mayfield, J., Blase, A., Goodall, J. L., 2017. Impact of Sea-Level Rise on Roadway Flooding in the Hampton Roads Region, Virginia. **Journal of Infrastructure Systems** 23, 05017006(1- 7).

SANTOS G. ROSA; MENDES, A. TEIXEIRA. (2022). **Infraestruturas sustentáveis no Brasil: Oportunidades para o saneamento e políticas urbanas**. 25. 27-38. 10.38116/brua25art3. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/358485817_Infraestruturas_Sustentaveis_no_Brasil_oportunidades_para_o_saneamento_e_politicas_urbanas> Acesso em: 01 maio 2022.

SILVA JÚNIOR, M. A. B. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Recife, 138 p. 2015.

SILVA JR. FRANCISCO VITAL; CUNHA, XIMENES CARNEIRO E SOUZA JR. MARCÍLIO FERREIRA. IOTFlood: hardware and software platform using internet of things to monitor floods in real time. **Revista Ambiente & Água**. Vol. 16 Nº 4, 2021.

SILVA, GABRIELA LARISSA; CARVALHO, DANIELA JUNQUEIRA E KOIDE SERGIO. **Análise da distribuição espacial de eventos de precipitação e dos seus hidrograma correspondentes na Bacia do Riacho Fundo DF**. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – DF, 2021. Minas Gerais, 21 a 26 de novembro de 2021.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; LINCOLN E. A. **Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE**. *Revista Brasileira de Geografia Física* 02 (2012) 250-268, 2012

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

SOUZA, GONÇALVES, GOLDENFUM. **Planejamento integrado de sistemas de drenagem urbana IPH/UFRGS**. Porto Alegre: p. 5, 2007.

SOUZA, V. C. B. (2013). Gestão da drenagem urbana no Brasil: Desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, GESTA, v. 1, n. 1, p. 58 – 72, 2013.

SPÓSITO, Maria Encarnação Beltrão. **Capitalismo e urbanização**. São Paulo: Contexto, 1988, 31p.

SURIYA, S.; MUDGAL, B.V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed A case study. **Journal of Hydrology**, v. 412-413, p.210-219, jan. 2012.

SWEET, W.V., Park, J., 2014. From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise. *Earth's Future* 2, 579–600

SILVA JR, M. A. B.; SILVA, S. R. Drenagem Urbana: O dia em que o Recife parou. **Revista Construir Nordeste**, Recife, p. 39 - 39, 01 mar. 2014.

TAVANTI, D. R.; BARBASSA, A. P. Análise dos desenvolvimentos urbanos de baixo impacto e convencional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 17-28, 2012.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007. DOI: 10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236. Disponível em: <https://revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/236>. Acesso em: 24 abr. 2022.

TUCCI, C. E M. **Modelos Hidrológicos**, editora da UFRGS/ABRH, 1ª ed. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998.

TUCCI, C. E. M.; Gestão de Águas Pluviais Urbanas. Saneamento para todos. **Programa de Modernização do Setor Saneamento – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental**. Ministério das Cidades. Brasília, 2005.

TUCCI, C.E.M. e GENZ, F. (1995) Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (Eds.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/ UFRGS, cap. 7, p. 277-347.

ULIANA, Eduardo Morgan; ALMEIDA, Frederico Terra de; Souza, ADILSON Pacheco de; Cruz, IBRAIM Fantin da; LISBOA, Luana ; SOUZA JÚNIOR, Marionei Fomaca de . Aplicação dos modelos hidrológicos SAC-SMA e IPH II na bacia do rio Teles Pires, Brasil <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180082>

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 14-9, 2009.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 1-14, 2009

US-EPA. Preliminary data summary of urban storm water best management practices. US Environmental Protection Agency, EPA-821-R-99-012, 214p. 1999.

VERÇOSA, LÍVIA FRAGOSO DE MELO. **Modelagem Hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade do Recife, PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Recife, 115 p. 2019.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology (hardcover) Prentice Hall**; 5 edition (Oct 19 2002), ISBN-10: 067399337X, ISBN-13: 978-0673993373. 2002.

WALESH, S.G. (1989) **Urban Surface Water Management**. New York: John Wiley e Sons, Inc., 518 p.

WANDERLEY, Lucas Suassuna de Albuquerque; NÓBREGA, Ranyere Silva; MOREIRA, Ayobami Badiru; ANJOS, Rafael Silva; ALMEIDA, Caio Américo Pereira. As chuvas na cidade do Recife: Uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**. Brasil. ISSN: 2237-8642 (Eletrônica), 2018.