

UFPA

PPGEC

**Universidade Federal
do Pará**



MARCOS VINICIUS DA SILVA REBÊLO

**IMPACTO DO VOLUME DE SÓLIDOS
SEDIMENTÁVEIS NO ESCOAMENTO
HIDRÁULICO E NO CUSTO DE
MANUTENÇÃO DE CANAL DE DRENAGEM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. José Almir Rodrigues Pereira

MARCOS VINICIUS DA SILVA REBÊLO

**IMPACTO DO VOLUME DE SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS NO ESCOAMENTO
HIDRÁULICO E NO CUSTO DE MANUTENÇÃO DE CANAL DE DRENAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Hídrica

Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira.

BELÉM
2021



IMPACTO DO VOLUME DE SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS NO ESCOAMENTO HIDRÁULICO E NO CUSTO DE MANUTENÇÃO DE CANAL DE DRENAGEM

AUTOR:

MARCOS VINICIUS DA SILVA REBÊLO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL.

APROVADO EM: 13 / 12 / 2021.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE ALMIR RODRIGUES PEREIRA
Data: 14/12/2021 08:08:52-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira



Documento assinado digitalmente
Orientador (UFPA)

João Henrique Macedo Sá
Data: 23/02/2022 13:09:05-0300
CPF: 002.596.412-78

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. João Henrique Macedo Sá
Membro Externo (UFSC)

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R289i Rebelo, Marcos Vinicius da Silva.
 IMPACTO DO VOLUME DE SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS
 NO ESCOAMENTO HIDRÁULICO E NO CUSTO DE
 MANUTENÇÃO DE CANAL DE DRENAGEM : ESTUDO DE
 SEDIMENTOS EM DRENAGEM / Marcos Vinicius da Silva
 Rebelo. — 2021.
 112 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Civil, Belém, 2021.

 1. Sedimentos. 2. Canal da Tamandaré. 3. Simulação
 Hidrodinâmica. 4. Intervalo de limpeza. I. Título.

CDD 620

RESUMO

O impacto do Volume de Sólidos Sedimentáveis no escoamento Hidráulico e no Custo de Manutenção de Canal de Drenagem. A área de estudo foi a bacia de drenagem da Tamandaré, localizada na região central do município de Belém/PA. A pesquisa foi desenvolvida em três etapas. Inicialmente, foi analisada a situação do Canal da Tamandaré sendo investigadas as principais informações relacionadas ao manejo de águas pluviais na bacia estudada, sendo obtidos dados de topografia, hidrológicos e do sistema de drenagem. Em seguida, foram levantados os principais fatores e contribuintes para acúmulo de sedimentos no Canal. Por fim, no software *Storm Water Management Model* 5.0 foi realizada uma simulação com o funcionamento ideal do Canal de drenagem sem a ocorrência de sólidos e precipitações para servir de parâmetro para posterior simulação com a ocorrência de sólidos. A etapa posterior simulou cenários com sedimentação de sólidos na estrutura de macrodrenagem, considerando: a) precipitação pluviométrica, com duração de 1,5 h, 3 h, 6 h e 12 h e b) 10%, 20% e 30% do Canal obstruídos por sedimentos, resultando em 15 simulações hidrodinâmicas. A última etapa da pesquisa apresentou os impactos Hidrodinâmicos, demonstrando que a capacidade do canal da Tamandaré é suficiente para escoar os volumes precipitados com 10% de seu volume comprometido com sólidos. Contudo, com 20% dos sólidos ocupando o leito do Canal ocorre inundação nos cenários de 1,5h, 3 h, e 6 h de precipitação pluviométrica, somente na simulação de 12 h não ocorreu inundações pois, com esse cenário de temporal a precipitação foi mais distribuída, favorecendo o escoamento do Canal. O cenário de 30% do canal ocupado com sólidos resultou em inundação em todos os cenários de precipitação, a maior magnitude de inundação ocorreu durante precipitação pluviométrica de 1,5 h atingindo 3,44 m, gerando nível de água de até 1,07 m acima do solo nas vias próximas ao canal da Tamandaré. A análise de custos apontou que com o cenário atual de gastos seria possível manter o Canal sem sólidos, desde que essa limpeza se desse de forma diária nos volumes apontados equivalentes a 2 caçambas basculantes 2 vezes ao dia, entretanto, a não limpeza em alguns dias tais como domingos e feriados tornou o acúmulo de resíduos uma realidade no Canal. Assim, se faz necessária a complementação de limpeza do canal para retirada total dos sedimentos nesse canal de drenagem da área urbana densamente ocupada do município de Belém.

Palavras-chave: Sedimentos; Canal da Tamandaré; Simulação Hidrodinâmica; Intervalo de limpeza.

ABSTRACT

The Impact of Sedimentable Solids Volume on Hydraulic Flow and Drainage Channel Maintenance Cost. The study area was the Tamandaré drainage basin, located in the central region of the city of Belém/PA. The research was developed in three stages. Initially, the situation of the Tamandaré Channel was analyzed, investigating the main information related to the management of rainwater in the studied basin, obtaining topographic, hydrological and drainage system data. Then, the main factors and contributors to sediment accumulation in the Channel were surveyed. Finally, in the Storm Water Management Model 5.0 software, a simulation was performed with the ideal operation of the drainage channel without the occurrence of solids and precipitation to serve as a parameter for further simulation with the occurrence of solids. The subsequent step simulated scenarios with sedimentation of solids in the macrodrainage structure, considering: a) rainfall, lasting 1.5 h, 3 h, 6 h and 12 h and b) 10%, 20% and 30% of the Channel obstructed by sediments, resulting in 15 hydrodynamic simulations. The last stage of the research presented the Hydrodynamic impacts, demonstrating that the capacity of the Tamandaré channel is sufficient to drain the precipitated volumes with 10% of its volume committed to solids. However, with 20% of the solids occupying the channel bed, flooding occurs in the scenarios of 1.5 h, 3 h, and 6 h of rainfall, only in the 12 h simulation there was no flooding because, with this storm scenario, the precipitation was more distributed, favoring channel flow. The scenario of 30% of the channel occupied with solids resulted in flooding in all precipitation scenarios, the highest flood magnitude occurred during rainfall of 1.5 h reaching 3.44 m, generating a water level of up to 1.07 m above ground on the roads close to the Tamandaré channel. The cost analysis showed that with the current spending scenario it would be possible to keep the Channel free of solids, as long as this cleaning took place on a daily basis in the indicated volumes equivalent to 2 tipper buckets 2 times a day, however, no cleaning in some days such as Sundays and holidays made the accumulation of waste a reality in the Canal. Thus, it is necessary to complement the cleaning of the channel for the total removal of the sediments in this drainage channel in the densely occupied urban area of the municipality of Belém.

Keywords: Sediments; Tamandaré Channel; Hydrodynamic Simulation; Cleaning interval.

LISTA DE ESQUEMAS

Esquema 1 - Concepção estratégica da gestão integrada das águas urbanas.....	30
Esquema 2 – Fluxograma de Resumo das etapas de pesquisa.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Dispositivos de Microdrenagem.....	16
Figura 2 – Exemplo de Instalação de Microdrenagem e Macro drenagem.	17
Figura 3 – Instalação do Sistema de Macro drenagem urbana em Obra.	18
Figura 4 – Ilustração representando a integração sistemas de Macro drenagem e Micro drenagem.....	19
Figura 5 – Medida Estrutural de Drenagem Urbana.....	21
Figura 6 – Armadilha para Retenção de Sólidos.	22
Figura 7 – Leitos de Escoamento e problemas de drenagem.	25
Figura 8 – Mapa da divisão das Bacias Hidrográficas do município de Belém.....	39
Figura 9 – Mapa da Bacia da Tamandaré.	40
Figura 10 – Etapas da Pesquisa.....	42
Figura 11 – Canal de drenagem com sólidos.....	55
Figura 12 – Hipsometria da Bacia da Tamandaré e de Áreas Próximas.....	56
Figura 13 - Mapa da Área de Contribuição da Microbacia da Tamandaré.	57
Figura 14 – Gráfico da Intensidade de precipitação pluviométrica de Belém para diferentes tempos de retorno.....	62
Figura 15 – Hietogramas de precipitação pluviométrica de 1,5h (a), 3h (b), 6h (c) e 12h (d) no município de Belém (TR-25).....	64
Figura 16 – Gráfico das Alturas máximas e médias anuais das marés registradas no Porto de Belém (1961-1987).....	65
Figura 17 - Gráfico das médias máximas mensais de Maré e de Precipitação Pluviométrica do município de Belém.....	67
Figura 18 – Gráfico do comportamento horário do maior e do menor nível de maré registrado no Porto de Belém.....	68
Figura 19 – Identificação das Sub-bacias da microbacia da Tamandaré.....	69
Figura 20 – Problemas identificados no canal de Drenagem da Tamandaré.....	73
Figura 21 – Problemas Identificados no Canal.....	74
Figura 22 – Estruturas de microdrenagem de áreas próximas ao canal da Tamandaré.....	76
Figura 23 – Estruturas de microdrenagem de áreas próximas ao canal da Tamandaré.....	76
Figura 24 – Galerias que chegam ao canal da Tamandaré.	76
Figura 25 – Dimensões da Seção Transversal do Trecho de montante (Seção 1) do Canal da Tamandaré.....	78
Figura 26 – Seccionamento dos Trechos do Canal da Tamandaré.....	79
Figura 27 – Seção Transversal de montante (Seção 1) do Canal da Tamandaré no SWMM ..	81
Figura 28 – Seção Transversal de Jusante (Seção 10) do Canal no SWMM ..	82
Figura 29 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré no instante de operação ótimo.....	83
Figura 30 – Nível de água mínimo alcançado no canal da Tamandaré sem precipitação pluviométrica com 10% do volume sedimentado (Simulação 1).....	86
Figura 31 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré com 10 % do leito com sólidos e chuva de 1,5 h.....	86
Figura 32 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré com 10 % do leito com sólidos e chuva de 3 h.....	87

Figura 33 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré com 10 % do leito com sólidos e chuva de 6 h.....	87
Figura 34 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré com 10 % do leito com sólidos e chuva de 12h.....	88
Figura 35 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante eventos de precipitação pluviométrica e maré alta.....	89
Figura 36 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré com 20 % do leito com sólidos sem precipitação.....	91
Figura 37 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré com 30 % do leito com sólidos sem precipitação.....	92
Figura 38 – Nível de água alcançado no canal da Tamandaré atingindo a cota de inundação (Simulações 7 a 9 e 12 a 15).....	92
Figura 39 – Impacto da Inundação na área de estudo.....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores do coeficiente de Manning para canais em diferentes condições de escoamento.....	53
Quadro 2 – Cenários de sedimentação de sólidos e custos para sua remoção.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização Morfométrica da Microbacia da Tamandaré.....	61
Tabela 2 – Média Mensal da precipitação Pluviométrica de Belém (1996/2015).....	64
Tabela 3 – Volume Precipitado com TR de 25 anos no município de Belém.....	65
Tabela 4 – Comparação do Volume Precipitado no Município de Belém (Monitorado e Calculado).....	66
Tabela 5 – Características das sub-bacias que contribuem para o escoamento do canal da Tamandaré.	74
Tabela 6 – Dimensões do Canal da Tamandaré.	83
Tabela 7 – Resumo das Simulações de escoamento com taxas de sedimentação	96

LISTA DE SIGLAS

A	Área
Av.	Avenida
cm	Centímetro
CN	<i>Curve Number</i>
CODEM	Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém
CRN	Comprimento das curvas de nível
Dv	Extensão
F	Fator de Forma
G	Índice de Gradiente do Canal
h	Hora
I	Declividade
i	Intensidade Pluviométrica
IC	Índice de Circularidade
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
Is	Índice de Sinuosidade
KC	Coeficiente de compacidade
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
L	Comprimento do canal
Lc	Comprimento do canal principal
Lt	Comprimento total dos rios ou canais
m	Metro
m ²	Metro quadrado
min	Minuto
mm	Milímetro
n	Coeficiente de Manning
NA	Nível de água
P	Perímetro
RN	Referência de Nível
SESAN	Secretaria Municipal De Saneamento
Sim	Simulação
SWMM	<i>Stormwater Management Model</i>
t	Tempo
TR	Tempo de Retono
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Sistemas de drenagem urbana.....	14
3.1.1	Estruturas de Microdrenagem e Macrodrenagem	15
3.1.2	Medidas Não estruturais	19
3.1.3	Medidas Estruturais	20
3.2	Drenagem e meio urbano	23
3.2.1	Inundações, Enchentes e Alagamentos	24
3.3	Canal de drenagem urbana	28
3.4	Gerenciamento integrado dos sistemas de drenagem urbana e de resíduos sólidos	30
3.4.1	Sólidos Totais: Sedimentos e Resíduos Sólidos	31
3.5	Impactos de sólidos sedimentáveis nos canais de drenagem urbana	33
3.5.1	Simulação Computacional Para Avaliação da Deposição de Sedimentos em Canais de Drenagem	35
4	METODOLOGIA.....	38
4.1	Área de estudo.....	38
4.2	Procedimentos metodológicos.....	43
5	RESULTADOS	556
5.1	Análise da situação do canal da Tamandaré.....	56
5.1.1	Busca de dados para posterior aplicação no modelo SWMM	58

5.1.1.1 Precipitação Pluviométrica	58
5.1.1.2 Maré	68
5.1.1.3 Divisão de Sub-bacias e Dados de Entrada	72
5.1.2 Verificação das contribuições de sedimentos ao canal drenagem	75
5.1.2.1 Condições Estruturais do Sistema de Drenagem Urbana.....	78
5.1.3 Simulação Hidrodinâmica e Avaliação do Atual Desempenho Hidráulico do Canal	84
5.2 Cenários de sedimentação de sólidos	87
5.3 Avaliação do comportamento hidrodinâmico com o acúmulo de sedimentos	96
5.3.1 Impactos hidrodinâmicos do acúmulo de sólidos sedimentáveis	96
5.3.2 Quantificação das despesas operacionais de remoção dos sólidos sedimentáveis ...	98
5.3.3 Proposição de alternativas para melhor gestão de remoção de sólidos na Microbacia da Tamandaré	98
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população tem aumentado a quantidade de sólidos nos canais destinados à acumulação e ao escoamento das águas pluviais nas cidades brasileiras. Isso ocorre pelas práticas incorretas de lançamento de resíduos sólidos em dispositivos do sistema de drenagem urbana e diretamente nos canais de drenagem.

Essa situação acelera os processos erosivos, aumenta o volume de sólidos sedimentados de sólidos e contribui para o transbordamento da massa líquida nos canais naturais ou artificiais, portanto, é preciso conhecer e entender essa dinâmica de lançamento e sedimentação de resíduos sólidos nos canais de drenagem urbana.

Essa sedimentação indevida dos resíduos sólidos altera o escoamento da massa líquida nos dispositivos hidráulicos e nos canais de drenagem. TUCCI (2010) comenta que os principais problemas hidrodinâmicos causados pelos sedimentos são o assoreamento das seções de canalizações da drenagem, com redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos e o transporte de poluente agregado ao sedimento, que contamina as águas pluviais. Quando houver transporte de material sólido em suspensão nas épocas de vazões baixas, a seção do canal garantir velocidades mínimas adequadas e que evitem o seu assoreamento.

Assim, compreender a relação entre o funcionamento eficiente do sistema de drenagem pluvial e a limpeza urbana contribui ao reconhecimento da necessidade de contemplar o planejamento dessas atividades de forma conjunta. Nesse sentido, o entendimento da dinâmica da produção, da disposição e do transporte de resíduos sólidos em uma bacia hidrográfica urbana é fator importante na tomada de decisão, especialmente no que diz respeito à gestão dos recursos aplicados diretamente nos serviços de limpeza urbana e de drenagem pluvial.

Contudo, a maioria dos órgãos gestores ainda não dispõe de estrutura gerencial adequada para o monitoramento, registro e manutenção dos canais de drenagem pluvial, tendo, ainda, problemas nas etapas anteriores de planejamento, projeto de engenharia, obras e de obtenção de recursos para as atividades do dia-a-dia.

Atualmente a Região Metropolitana de Belém (RMB) sofre atualmente uma série de problemas urbanos generalizados, oriundos do processo de crescimento populacional desordenado,

processo esse marcante em cidades brasileiras. Esse é o caso dos municípios que formam a região metropolitana de Belém, que apresentam grande concentração populacional em áreas alagadas, carentes de redes de esgoto, com coleta deficiente e tratamento inadequado dos resíduos sólidos, com sistema de drenagem de águas insipiente ou com o abastecimento de água potável comprometido, com ausência de tratamento de efluentes domésticos e industriais e operação de Estações de tratamento de esgotos precárias, entre outros. (Lima *et al.*, 2015).

Em países subdesenvolvidos, como o Brasil, a situação é mais preocupante, pois, embora existam sistemas de limpeza urbana, esses não são capazes de coletar todo o material gerado (NEVES, 2006). O resultado disso é o descarte de resíduos sólidos nas calçadas e em terrenos baldios, bem como nas sarjetas, bocas-de-lobo e poços de visita do sistema de drenagem urbana, que, além de terem a capacidade útil comprometida tornam-se pontos de acumulação de resíduos sólidos que são transportados até os canais de drenagem urbana.

Além do lançamento indevido de resíduos sólidos urbanos, os sistemas de drenagem das cidades brasileiras também recebem a contribuição indevida de esgoto sanitário. Como essa massa líquida apresenta grande teor de sólidos, é outra que contribui para aumentar a quantidade de sólidos nos canais de drenagem, logicamente, impactando a qualidade da água e trazendo riscos diretos para o meio ambiente e à saúde pública.

Nesse contexto, o objetivo da pesquisa é analisar a relação do volume de resíduos sólidos sedimentados e seu impacto no comportamento hidrodinâmico e na despesa de manutenção de canal de drenagem de área urbana do município de Belém/PA.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Analisar o impacto da sedimentação de sólidos no escoamento hidrodinâmico e nas despesas de manutenção do canal de drenagem da Tamandaré, localizado na área central do município de Belém.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar simulação computacional do escoamento da massa líquida sem a ocorrência de sedimentação de sólidos no canal de drenagem da Bacia da Tamandaré;
- Simular computacionalmente o comportamento hidrodinâmico da massa líquida em três cenários de sedimentação de sólidos no canal de drenagem da Bacia da Tamandaré;
- Estabelecer condições limites para a remoção de sólidos, em função das condições hidrodinâmicas e da despesa de manutenção do canal de drenagem da Tamandaré.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas de drenagem urbana

Segundo a lei nº 11.445/07, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, define o sistema de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas como: medidas tomadas através do conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais urbanas.

Segundo o IBGE (2008), o termo manejo de águas pluviais, no âmbito da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB, refere-se ao sistema de drenagem e tem importância fundamental no planejamento das cidades, pois consiste no controle do escoamento das águas de chuva para evitar os efeitos adversos que podem representar sérios prejuízos à saúde, à segurança, ao bem-estar da sociedade e ao meio ambiente.

Todos os municípios devem possuir sistema de drenagem urbana operante, com legislações específicas acerca do tema. Mesmo que este sistema não seja eficaz, o escoamento das águas ocorrerá de maneira contínua, e tal fato demonstra a importância de haver um planejamento da drenagem, visando a manutenção do ciclo da água, prevenção de danos à edificações, e o controle de problemas sanitários, tendo em vista que as inundações disseminam um grande número de doenças (SOUSA; ALVES, 2016).

É importante ressaltar também que a necessidade de estudos integrados da quantidade e da qualidade das águas pluviais, dos resíduos sólidos e da drenagem urbana, os quais devem ser incentivados porque são imprescindíveis para o desenvolvimento urbano. Heller e Castro (2007) comentam que a drenagem urbana não acarreta problemas afetos apenas ao controle dos deflúvios, às cheias e aos transtornos de tráfego, mas é sim um problema ambiental mais amplo, com consequências importantes sobre a saúde pública.

Portanto, é fundamental que todas as estruturas de drenagem sejam bem planejadas, projetadas, construídas e operadas na área urbana, para isso, é importante a implantação de mecanismos de integração da política e das ações de saneamento, saúde, meio ambiente e recursos hídricos, desenvolvimento urbano e de habitação, buscando melhores práticas, investindo em pesquisa, ampliando os recursos para obras de prevenção às enchentes e inundações bem

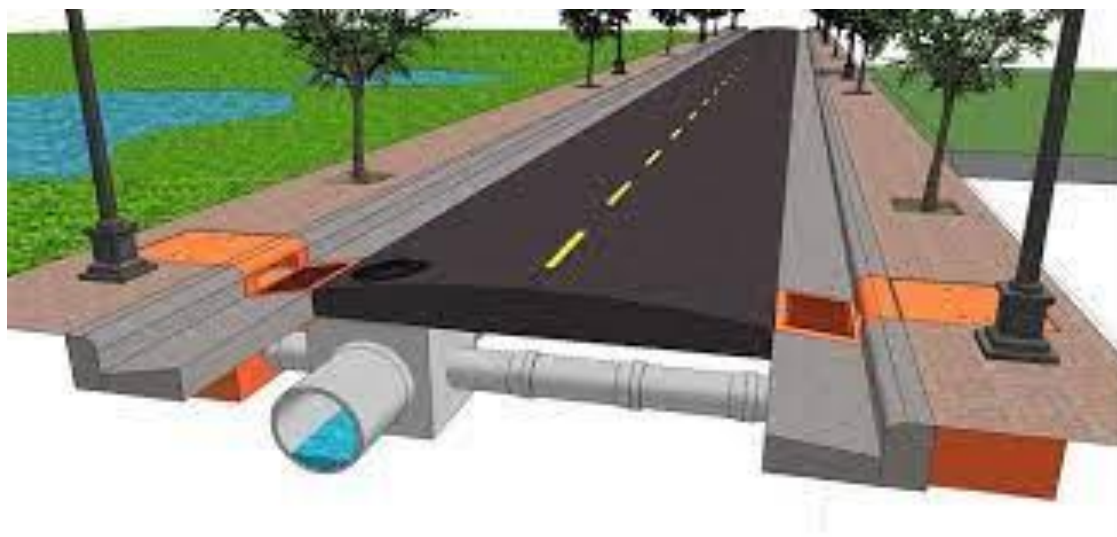
planejadas, com base em estudos adequadamente definidos e que podem contar com o apoio de métodos matemáticos.

3.1.1 Estruturas de Microdrenagem e Macrodrenagem

Os dispositivos ou estruturas do sistema de drenagem urbana podem ser classificados quanto ao porte em microdrenagem ou de macrodrenagem. Bertoni & Tucci (2003) citam que a microdrenagem urbana é definida como o sistema de condutos pluviais no loteamento ou na rede primária urbana, sendo projetado para atender as drenagens de risco moderado.

De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), a microdrenagem é composta por diversas estruturas e dispositivos hidráulicos para captação e escoamento das águas pluviais, entre as quais estão as sarjetas e sarjetões: são calhas destinadas a coletar e direcionar o escoamento superficial até os pontos de captação, atuando como canais de seção triangular. São construídas nas margens das vias, entre o meio-fio e a pista de rolamento (sarjetas); ou para o cruzamento transversal das ruas, conectando as sarjetas (sarjetões); as bocas de lobo: são dispositivos localizados junto às sarjetas, quando essas não apresentam capacidade hidráulica de comportar o volume precipitado sem extravasamento para a calha viária, em áreas acidentadas ou pontos mais baixos, que não podem escoar as águas pluviais pela topografia do terreno. Vale destacar que a capacidade de engolimento dessas estruturas funciona como vertedores de parede espessa; Tubos de ligação: são os condutos que ligam as bocas de lobo aos poços de visita ou caixas de ligação; sendo as caixas de ligação: estruturas destinadas a receber o volume de águas pluviais captado pelas bocas de lobo em pontos intermediários da rede ou para evitar o excesso de ligações nos poços de visita. As caixas de ligação não são visitáveis, estando fechadas por alvenaria e cobertas pela pavimentação. Por sua vez, os poços de visita: são câmaras visitáveis que apresentam a mesma funcionalidade das caixas de ligação (receber o volume de precipitação das bocas de lobo). Essa característica é fundamental para a inspeção e limpeza de galerias; Galeria: são condutos que coletam as águas pluviais dos poços de visita e escoam o volume precipitado até o sistema de macrodrenagem (SILVA, 2017) como indicado na figura 1.

Figura 1 – Exemplo de Dispositivos de Microdrenagem.



Fonte: Aquafluxus (2019).

O controle distribuído ou na fonte é o tipo de sistema que atua ao lote, nas praças e passeios, podendo ser considerado como parte do sistema de microdrenagem, pois possui ação local, no entanto a grande diferença está na ação das estruturas que possuem o conceito de retardamento e redução do escoamento o que se opõe a concepção do sistema de microdrenagem tradicional.

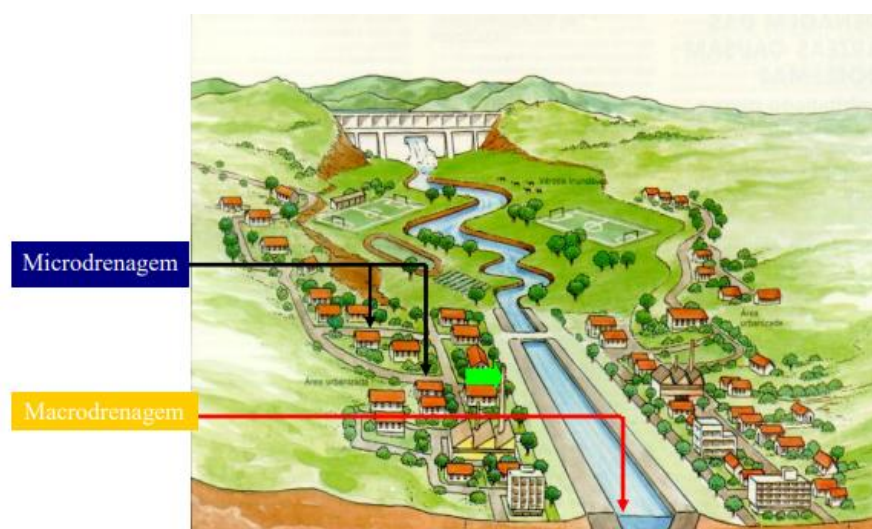
Como o conceito ambiental de drenagem, em substituição ao higienista, aparecem soluções alternativas, compensatórias ou ambientais, agindo em conjunto com as estruturas convencionais, que procuram compensar sistematicamente os efeitos da urbanização em termos qualitativos e quantitativos (SILVA, 2007), os dispositivos mais comuns são: trincheiras de infiltração, vala e valeta de infiltração, poço de infiltração, pavimentos porosos (permeável e semipermeável), o armazenamento de água em telhados (telhados verdes), as faixas gramadas, e a construção de pequenos tanques residenciais e poços subterrâneos (reservatórios de retenção e retenção) que produzem a redução distribuída do efeito da urbanização.

Esses sistemas encaixam-se no contexto do controle do escoamento superficial direto, tendo tradicionalmente como base o enfoque orientado para o aumento da condutividade hidráulica do sistema de drenagem, ou seja, para a coleta das águas do escoamento superficial direto, seguida de

rápido transporte dessas águas até o ponto de despejo, a fim de minimizar os danos e interrupções das atividades dentro da área de coleta.

Por conseguinte, a macrodrenagem é a parte do sistema que recebe o volume precipitado coletado pela rede de microdrenagem, tendendo a apresentar estruturas com dimensões maiores e, normalmente, situadas no fundo dos vales.). Na figura 2 é apresentada uma visão geral dos sistemas de microdrenagem e macrodrenagem.

Figura 2 – Exemplo de instalações de microdrenagem e macrodrenagem.



Fonte: Garcia (2003).

Por estar localizada nos pontos mais baixos, a área total da bacia, a sua ocupação e o tempo de escoamento apresenta grande impacto no dimensionamento dessas estruturas (PONCIANO, 2016). Na figura 3 é possível verificar galeria retangular do sistema de macrodrenagem de águas pluviais urbanas.

Figura 3 – instalações do sistema de macrodrenagem urbana em obra.



Fonte: CNM (2018).

Entre os dispositivos de macrodrenagem estão os canais de drenagem, os reservatórios de acumulação (piscinões), os sistemas de retenção (comportas), as eclusas e as estações de bombeamento. Segundo Bertoni e Tucci (2003), as estruturas de macrodrenagem envolvem as estruturas coletoras de diversos sistemas de microdrenagem e destinam-se à condução final das águas captadas pela drenagem primária, dando prosseguimento ao escoamento dos deflúvios oriundos das ruas sarjetas, valas e galerias, que são elementos englobados como estruturas de drenagem primária, sendo este último o sistema projetado para acomodar precipitações superiores ao da microdrenagem.

Os sistemas de macrodrenagem e microdrenagem necessitam, para pleno funcionamento, operar de forma integrada, pois, o mau desempenho de um elemento reflete na eficiência de todo sistema. A prática de manejo das águas pluviais urbanas deve ser integrada também com os serviços de limpeza pública e do sistema de drenagem (PROSAB, 2009), na figura 4 é ilustrado um sistema de drenagem adequado.

Figura 4 – Ilustração representando a integração dos sistemas de micro e macrodrenagem.



Fonte: Aquafluxus (2019).

São necessárias também medidas de controle no sistema de drenagem urbana, essas medidas podem ser classificadas em medidas estruturais e não-estruturais fundamentais para o planejamento do controle da drenagem urbana especialmente no que se refere ao armazenamento e infiltração do escoamento na tentativa de compensar os efeitos da urbanização.

3.1.2 Medidas Não estruturais

As medidas não estruturais são definidas como ações de tomada de decisão que buscam reduzir os impactos das inundações por meio de normas e programas no planejamento urbano, isto é, sem obras físicas alterando o sistema de drenagem (SILVA *et al.*, 2017). As medidas não estruturais para o controle de inundação são relacionadas ao aproveitamento de estruturas organizacionais existentes nas áreas de bacias hidrográficas delimitadas. Geralmente, as ações não estruturais atuam em longo prazo e trazem benefícios econômicos por serem menos custosas se comparado às ações estruturais.

RIGHETTO (2009) afirma que as medidas não estruturais podem ser empregadas estimuladas e institucionalizadas pelos gestores municipais, sem a necessidade de grandes

investimentos. Por conseguinte, o autor afirma que a maioria das medidas não estruturais requer mais comprometimento dos setores governamentais, para viabilizar o início e, em alguns casos, seu desenvolvimento e aplicação dinâmica ao longo dos anos, tal compromisso temporal atravança o crescimento e desenvolvimento de tais medidas.

Canholi (2015) comenta que as medidas não estruturais buscam disciplinar a ocupação territorial e cria mecanismos para atenuar os efeitos causados pelas inundações. As medidas não estruturais mais adotadas são ações envolvendo a educação ambiental e a regulação do uso e ocupação do solo. Dentre as medidas de controle não estruturais, a que merece grande destaque são as ações de regulamentação do uso e ocupação do solo que, associadas ao planejamento urbano, têm a finalidade evitar a ocupação de áreas de risco e controlar as áreas que já foram loteadas. Essas medidas permitem que as cidades tenham espaço para enchentes de seus leitos maiores ao utilizar essas medidas utilizam o zoneamento do espaço urbano para prevenir o contato do homem com áreas passíveis de inundações.

Os sistemas de alerta e monitoramento são fundamentais na redução de riscos e danos das inundações, sendo que sua utilização deve integrar os diversos atores da sociedade, acerca do tema (REIS, 2014). Segundo Priest, Parker e Tapsell (2011), o uso de alertas de inundação acoplado a uma combinação de medidas estruturais e não estruturais para gestão de risco traz grandes benefícios econômicos. Os autores explicam que na Europa foi implantado o sistema de monitoramento *Flood Warning Response and Benefits Pathways* (FWRBP), com o intuito de registrar as vazões da rede hidrográfica e fazer previsão de inundações, garantindo a proteção dos indivíduos e reduzindo os danos às propriedades durante os eventos de inundação.

3.1.3 Medidas Estruturais

As medidas estruturais podem ser entendidas como obras físicas implantadas em área urbana para impedir a ocorrência de alagamentos e inundações. Um dos objetivos dessas medidas estruturais é atingir a configuração autolimpantes dos canais de drenagem.

Para isso, as estruturas têm que ser concebidas de uma maneira que, para serem efetivas, deveriam declinar um segregador em direção ao fluxo e estarem continuamente sujeitas a uma

lâmina d'água de alta velocidade para maximizar a gradiente de velocidade e dessa forma promover um cisalhamento na superfície do segregador. Isto vem do fato que há as forças agindo. Estas forças produzem arraste, sustentação e rotação (TUCCI, 2003). Em outras palavras, as estruturas autolimpantes são pensadas com a função de utilizar a força da água para empurrar o resíduo, limpando o segregador, geralmente tela ou grade, desviando-o ou não para um local de acumulação, onde a frequência de limpeza possa ser menor, agindo com mínima perda de carga. Os defletores variam podendo ser dispostos com um determinado ângulo em relação ao escoamento, suspensos ou não, em geral compostos de um gradeamento, a figura 5 a seguir representa uma medida estrutural ao saneamento.

Figura 5 – Medida estrutural de drenagem urbana.



Fonte: Belém (2014).

Algumas estruturas foram testadas em escala real e em locais com problemas de acumulação de sólidos nos cursos d'água urbanos. A exemplo de estrutura autolimpantes, simples e razoavelmente eficiente é a SCS (Stormwater Cleaning Systems), que é utilizada em Springs, África do Sul. Neste estudo, a função da estrutura era forçar o escoamento sobre o vertedor e através de um gradeamento inclinado em aproximadamente 45°, interceptando o resíduo pelo gradeamento e forçando o seu encaminhamento para um compartimento em que seria removido. Foram consideradas duas alternativas de disposição da estrutura: com o vertedor diretamente colocado na

trajetória de fluxos pequenos vindos, por exemplo, de um conduto; com o vertedor colocado na lateral, para altos fluxos em canais. Como vantagens, pode suportar relativamente altos fluxos com facilidade; Manutenção diminuta; fácil de limpar; baixo risco de fermentação tóxica e relativamente segura para o público e trabalhadores. Como desvantagens, requer alta carga.

Outra estrutura, que não é do tipo autolimpantes, mas que pode ser útil no processo de monitoramento e gerenciamento integrado resíduos sólidos-drenagem urbana é a chamada SEPT (Side-Entry Pit Trap), utilizada em Melbourne, Austrália, essa estrutura é constituída de cestas acopladas à entrada de bocas-de-lobo. Com isso, a água pluvial passa através da cesta e o material maior que o tamanho da malha (5-20 mm) é retido. O material retido na cesta é removido manualmente por equipe de manutenção ou por sugador de grande diâmetro. Planeja-se a limpeza das cestas a cada 4 ou 6 semanas. Na figura 6 a seguir pode ser observada uma dessas estruturas de armadilha para retenção de sólidos.

Figura 6 – Armadilha para retenção de sólidos.



Fonte: Silva (2017).

As armadilhas são colocadas na parte de trás do poço para proporcionar a trajetória para altos fluxos. Nesses casos, os poros são bloqueados; a água é descarregada sobre a parte traseira da cesta e os materiais mais finos que o tamanho dos poros podem ser retidos também. Uma vez

bloqueados os poros, a água na cesta verte sobre a parte posterior da cesta. Neste caso, a eficiência diminui significativamente. Como vantagens, poderiam ser citados (PROSAB 2009): rápido e fácil de limpar; a coleta é facilmente integrada no programa de manutenção das captações de água pluvial; evita a transferência de resíduos no meio-fio para os condutos; pode-se remover facilmente a cesta para manutenção; pode ser útil na identificação das principais fontes como parte de um programa de gerenciamento da bacia. As desvantagens são (PROSAB 2009): aquisição de um aspirador especial de alto custo; as tampas das captações são pesadas e precisam ser removidas com uma sustentação segura; muitas unidades são requeridas nas áreas propensas. O uso é atrativo do ponto de vista de custo-efetividade em locais com alta produção de resíduos, sendo necessário o uso de dispositivos adicionais à jusante para capturar o material que passa. É mais efetiva quando utilizada em conjunção com um programa de gerenciamento da bacia (PROSAB 2009).

Apesar disso, as medidas estruturais são importantes para a adequação do espaço urbano de bacias hidrográficas, já que a solução de remanejamento da população das áreas de risco é frequentemente mais complexa e custosa para as autoridades responsáveis. De acordo com Silva *et al.* (2017), as medidas estruturais, por terem maior destaque no controle de enchentes, podem criar a falsa sensação de segurança, impelindo a ocupação de áreas mais próximas aos cursos d'água. Essa situação faz com que a população passe a estar sujeita a inundações de intensidades não previstas por estarem habitando em área de risco, o que manifesta a necessidade de combinar ações não estruturais e estruturais para o melhor controle de eventos de inundação.

3.2 Drenagem e meio urbano

A partir do meio do século XX foi verificado que alguns países iniciaram questionamentos de drenagem urbana realizada de forma tradicional, que, por intermédio de obras destinadas a retirar rapidamente as águas acumuladas em áreas importantes, transfere o problema para o futuro ou para outras áreas. Ante este ponto de vista abrigou-se as ações destinadas à melhoria do fluxo em rios e canais demandam projetos de grandes sistemas de galerias pluviais, com retificações, cortes de meandros e mudanças de declividade.

Como a água exerce papel importante no meio urbano, é necessário atendimento de demandas diferenciadas, em questões relativas à sua qualidade, disponibilidade e escoamento de

águas de chuva. A gestão dessas águas constitui grande parte do saneamento urbano. Mota (2008) comenta que, para cada tipo de ação antrópica, a natureza responde a esta de forma isolada e diferente sobre o ciclo hidrológico, gerando assim respostas diferenciadas para cada tipo de ação.

A urbanização é um processo que acarreta diversas complicações para as cidades, como as inundações, que são recorrentes nas zonas urbanas e causam danos e prejuízos à população. Como descrito por Tucci (2010, p. 114), “a urbanização é um processo de desenvolvimento econômico e social resultado da transformação de uma economia rural para uma economia de serviços concentrada em áreas urbanas”. Por conseguinte, é fundamental conhecer a evolução da urbanização e os seus potenciais prejuízos, impactos e transformações no meio ambiente, especialmente sobre os recursos hídricos e como acontecem as inundações, apontando os principais fatores que são responsáveis pelos processos de produção das inundações urbanas, sendo importante também a conceituação de inundações, enchentes e alagamentos.

3.2.1 Inundações, Enchentes e Alagamentos

O conceito de inundação é abordado por um número maior de autores se comparada a outros termos e é a nomenclatura mais utilizada para classificar eventos em áreas urbanas. Autores como Tucci (2007) ressaltam que a ocorrência de inundações em centros urbanos é tão antiga quanto às cidades ou qualquer aglomerado urbano. A inundação ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte da massa líquida em um desses sistemas e ocupam áreas que a população utiliza para moradia, transporte, recreação, comércio, indústria, entre outros. O autor ainda observa que tais eventos podem ser ocasionados devido ao comportamento natural dos rios e também ampliados pelo efeito de alteração produzida pelo homem na urbanização, como a impermeabilização das superfícies e canalização de córregos (TUCCI, 2007).

As enchentes, por sua vez, são divididas em dois tipos por Tucci (2007), enchentes devido à urbanização e enchentes em áreas ribeirinhas: [...] a primeira é caracterizada pelo aumento de sua frequência e magnitude devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. Adicionalmente o desenvolvimento urbano pode produzir obstruções ao escoamento como pontes e aterros, obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento e

drenagens inadequadas. Por sua vez as enchentes em áreas ribeirinhas são naturais, atingindo a população que ocupa o leito maior dos rios e ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos extremos, em média com tempo de retorno da ordem de 2 anos.

Os alagamentos ocorrem, geralmente, com depressões e fundo de vales ou até em áreas planas, com o escoamento superficial comprometido pela falta ou insuficiência de um sistema de drenagem pluvial no ambiente urbano e pela topografia. Ainda, quanto menor a extensão de áreas verdes, menor a infiltração de água no solo que alimenta os aquíferos suspensos, causando menor auxílio para o escoamento superficial, as quais poderiam atenuar as causas dos mesmos. (TEODORO; NUNES, 2007). Por sua vez os alagamentos também são classificados por alguns autores como a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana com o consequente acúmulo de água em calçadas, ruas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas. Os termos anotados para classificar os eventos deste trabalho serão os de alagamento e inundação, em razão das conceituações serem consideradas as mais adequadas ao tipo de evento, em meios urbanos e causados por chuvas extremas. Na figura 7 são representados os alagamentos e inundações.

Figura 7 – Leitos de escoamento e problemas de drenagem.



Fonte: UFSC (2014).

Um grande problema é o despejo inadequado dos resíduos sólidos na superfície, atingindo as redes de drenagem urbana, e os corpos d'água, o que contribui para enchentes. De acordo com FINKLER (2012), o controle de enchentes é um processo permanente; não basta que sejam estabelecidos regulamentos e construídas obras de proteção; é necessário estar atento às potenciais violações da legislação e na expansão da ocupação do solo de áreas de risco. O controle não deve ser visto como ação isolada no tempo ou no espaço, mas como uma atividade em que a sociedade, como um todo, deve participar de forma contínua.

Os resíduos se acumulam nas imediações de centros comerciais, pátios de estacionamento público, estações de trem e ônibus, estradas, escolas, parques públicos, lixeiras públicas, lixões, depósitos de coleta de recicláveis e ecopontos. Até que “alguém” vá removê-lo, permanecem nesses locais; mas existe também a possibilidade de serem transportados pela força de ventos e/ou de chuvas, sendo, muitas vezes, conduzidos no sistema de drenagem urbana (ARMITAGE, 2007). Entre esses resíduos estão garrafas, latas, envelopes de papel e plástico, jornais, sacolas de compras, embalagens de cigarro, mas também partes de carros, restos de construção e colchões velhos (TUCCI, 2003). Logo acomodados, os resíduos sólidos podem ser transportados do sistema de drenagem até estuários, arroios, rios, lagos e condutos, e mesmo eventualmente, alcançarem o mar em cidades litorâneas. Ao longo do caminho, entretanto, frequentemente são emaranhados na vegetação ao longo das margens dos arroios, rios ou lagos, ou espalhados ao longo das praias. A maioria provavelmente é enterrada pelos sedimentos dos rios, lagos ou praias (TUCCI, 2003).

Principalmente nas maiores cidades brasileiras, o problema dos resíduos sólidos nas redes de drenagem urbana pode ser observado. E em depósitos nos cursos d'água urbanos através das entradas das redes enterradas ou diretamente, atingindo os cursos d'água maiores como mares, praias e lagos, além de prejudicarem a eficiência hidráulica de estruturas como poços de bombas, bacias de retenção, entre outras. Isso resulta em um aspecto antiestético e em poluição e/ou contaminação. Apesar da constante frequência no Brasil, ainda faltam dados mais precisos. Estima-se, por exemplo, que no rio Capibaribe, em Recife, recebe carga de resíduos de uma população estimada de 430.000 habitantes em seu entorno (FIGUEIREDO, E. C. *et al.*, 2002). No lago Guaíba, principal manancial de Porto Alegre, em maio de 2009, no período “seco” foi exportado 8,6 t/dia ao lago e com a ocorrência das precipitações, os valores alcançaram 1.139 t/dia (BASSO

et al, 2011). Na região metropolitana de Cape Town, cidade localizada na África do Sul, que possui características de produção de resíduos próximas as de muitos municípios brasileiros. Os dispositivos eram monitorados diariamente num período de 5 a 22 dias. Os resultados indicaram que as cargas variam em função do uso e ocupação do solo, e chegou-se a estimativa de que a região metropolitana de Cape Town lança 4,4 milhões de itens para os corpos d'água diariamente, resultando em um total de 2,4 toneladas/dia. Essa carga, estatisticamente, inclui aproximadamente, 2 milhões de pedaços de plásticos, 290.000 pedaços de cigarros e 260.000 pedaços de papel (BRITES, 2010).

No âmbito estratégico nacional em 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010), que dispõe de princípios, objetivos e instrumentos, bem como diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, a serem adotadas pela união isoladamente ou em parceria com os Estados, Municípios e Particulares, visando o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

A PNRS prevê que as ações para manejo dos resíduos sólidos sejam planejadas seguindo a hierarquia: Não Geração, Redução, Reuso, Reciclagem, Tratamento e, por fim, Disposição Final dos rejeitos, seja no Plano nacional de Resíduos Sólidos, nos planos estaduais, municipais, intermunicipais ou regionais. A PNRS ainda prioriza acesso aos recursos, incentivos e financiamentos pela união, aos municípios que implantarem coleta seletiva com participação de catadores e consórcios intermunicipais com plano de gerenciamento intermunicipal ou regional. É disposto também, na PNRS, os produtos obrigados a atender à logística reversa, por responsabilidade compartilhada, sob orientação do Ministério do Meio Ambiente.

No âmbito operacional, normativo, de gestão de resíduos específicos, temos as resoluções do CONAMA. A resolução mais relevante para a drenagem urbana, que trata de resíduos sólidos é a Resolução CONAMA Nº 307/2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Esta resolução considera que os geradores de resíduos da construção civil são os responsáveis pelos mesmos e exige a elaboração de Planos Municipais de gestão de resíduos de construção civil, bem como Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil por parte dos grandes geradores, cujo objetivo prioritário deve ser a não geração de resíduos, e secundariamente a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Os planos de gerenciamento dos grandes geradores devem

contemplar a caracterização, triagem, acondicionamento, transporte e destinação dos resíduos de acordo com sua classe:

- a) I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros;
- b) II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
- c) III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
- d) IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas. Embora a legislação esteja dando grandes passos visando a gestão integrada dos resíduos sólidos, no nível tático/operacional as prefeituras encontram grandes dificuldades e novas soluções técnicas devem ser implementadas buscando a resolução dos problemas oriundos destes tipos de rejeitos.

3.3 Canal de drenagem urbana

Um canal aberto destina-se ao escoamento final das águas pluviais, oriundas, do sistema inicial de drenagem, a microdrenagem, sendo esses canais definidos como a extensão de água entre duas terras, ou seja, um corte de terreno para comunicação de mares, lagos e rios ou escavação que leva águas. Ele pode ser natural ou artificial e pode apresentar revestimento de grama ou de material artificial. Um curso d'água natural é o preferido porque propicia menor pico de descarga para jusante; requer menos manutenção e permite a criação de áreas verdes e recreativas muito necessárias. Entretanto, os canais sofrem profundas alterações, nas suas características morfológicas, como na sua capacidade hidrodinâmica, principalmente nos trechos que estão inseridos na área urbana.

Nas cidades modernas, pós industrialização, a ocupação das margens dos rios ocorre principalmente pela parcela da população marginalizada e de menor poder econômico. Essa parcela da população mora costumeiramente em áreas de baixadas e é predominantemente quem ocupa as ribeiras de canais. Quando esses canais estão em áreas de maior poder aquisitivo, é comum a construção de muros de arrimo ou até mesmo de pequenas galerias setorizadas com o canal ficando completamente fechado em alguns trechos.

Mesmo na maioria das vezes pré-existente, para modificá-lo é preciso um estudo complexo e projeto detalhado, além disso, ocorre a descaracterização completa dos canais fluviais em suas características físicas.

Os canais de drenagem podem ser classificados quanto as suas intervenções como: Canais Abertos: que são os canais de drenagem que escoam abertamente pela área urbana, com intervenções nas margens e no leito; os canais fechados são os canais que percorrem a área urbana, e que encontram-se completamente fechados por galerias de concreto, por sua vez os canais mistos: são os canais em que alguns trechos encontram-se abertos, outros com algum tipo de proteção nas margens ou completamente fechados por galerias setorizadas também existe o canal retificado: são os trechos dos canais de drenagem em que a intervenção ocorreu através da diminuição da sinuosidade do canal, finalmente os barramentos, são todas as obras realizadas nos canais de drenagem que impedem a passagem da água quando há aumento da vazão. Geralmente os barramentos estão associados às vias perpendiculares ao canal e suas respectivas tubulações.

3.4 Gerenciamento integrado dos sistemas de drenagem urbana e de resíduos sólidos

Existem diferenças nas políticas públicas de controle da poluição urbano difusa nos países em desenvolvimento e desenvolvidos. Segundo SILVEIRA (2001), a drenagem urbana consome alta proporção dos investimentos em infraestrutura urbana nos países desenvolvidos, densamente povoados. A compreensão para isso se dá pela necessidade do gerenciamento das águas urbanas receber uma abordagem integrada, e pela conscientização pública sobre a poluição causada por efluentes urbanos, os quais afetam as próprias áreas urbanas e os corpos d'água que recebem esses efluentes. A prática da drenagem urbana nos países em desenvolvimento ainda encontra problemas sérios, porque o desenvolvimento urbano ocorre sob condições tecnológicas e socioeconômicas mais difíceis (SILVEIRA, 2001). Na drenagem urbana, enquanto nos países desenvolvidos se pratica a fase ambientalista da drenagem, nos países em desenvolvimento ainda se pratica a fase sanitária. No esquema 1 é apresentado uma concepção para gestão integrada das águas urbanas.

Esquema 1 – Concepção estratégica da gestão integrada das águas urbanas.



Fonte: adaptada de Tucci (2009).

Segundo TUCCI (2003), os sistemas integrados de drenagem urbana têm como papel, além da cobertura urbana de proteção contra inundações, cuidar do melhoramento da qualidade de vida pela produção de feições aquáticas, criando amenidade urbana na cidade. Isto pode ser traduzido também como ação sob a perspectiva de sustentabilidade ambiental, introduzindo uma nova forma de direcionamento das ações, baseada no reconhecimento da complexidade das relações entre os ecossistemas naturais, o sistema urbano artificial e a sociedade.

3.4.1 Sólidos Totais: Sedimentos e Resíduos Sólidos

Os sólidos totais que atingem a bacia de drenagem podem ser divididos em sólidos carreados e sedimentáveis. A estimativa destes sólidos depende das fontes de carga, da capacidade de transporte para o sistema de drenagem e da capacidade de armazenamento (NEVES, 2006).

De acordo com NEVES (2008), dos poluentes que compõem o escoamento superficial, os sólidos totais deixam transparecer dois estágios, um no desenvolvimento urbano e o outro na área urbana já desenvolvida. Na fase de desenvolvimento urbano, sem controle da erosão, enormes quantidades de poluentes são aportadas no curso d'água; na fase de área urbana desenvolvida a

produção na bacia é devida principalmente aos resíduos sólidos. A quantidade nesta etapa é função da frequência de coleta e limpeza nas ruas, disposição pública dos resíduos e frequência da chuva. Também depende da densidade de ocupação da área, do movimento de pedestres e veículos, e principalmente da educação da população. Em relação ao objetivo de reduzi-las.

A redução, por sua vez, pode ser feita através de dois tipos de medidas: medidas estruturais, com a colocação de estruturas na entrada de bocas-de-lobo, sarjetas ou instaladas dentro dos canais de drenagem para separar e conter os poluentes grosseiros; e medidas não estruturais, envolvendo mudanças de atitude e ações da comunidade. As medidas estruturais vêm sendo utilizadas na maior quantidade na África do Sul, e em menor escala na Austrália e Nova Zelândia. Pesquisas foram realizadas com as estruturas autolimpantes (ARMITAGE *et al.*, 1998). Apesar de não atuarem nas causas, ainda sim são importantes, pois fornecem dados para a conscientização ambiental e a busca das fontes de lançamento irregular. Outro exemplo, este da utilização de medidas estruturais ocorre em Auckland, na Nova Zelândia, onde um estudo foi realizado em 1996 (ICNZT, 1996).

Em geral, os trabalhos de quantificação de cargas de resíduos sólidos na drenagem urbana dizem respeito a acompanhamentos contínuos por vários meses. Contudo, estudos foram realizados em Coburg, subúrbio de Melbourne na Austrália, com os chamados poluentes grosseiros, que incluem resíduos sólidos, sedimentos e entulhos (ALLISON *et al.*, 1998). Os objetivos do programa de monitoramento foram os seguintes: estabelecer cargas de poluentes grosseiros que atingem os sistemas de drenagem urbana durante eventos de chuva; identificar fatores que influenciam as cargas de poluentes grosseiros; investigar a variação temporal das cargas de poluentes grosseiros durante eventos de chuva; investigar os tipos de material que se origina de diferentes tipos de uso do solo. A equipe responsável pela limpeza das bocas-de-lobo fazia naquele momento uma rotação de 6 meses para todas as bocas-de-lobo da região.

Decina e Brandão (2016) alegam que no Brasil, estudos parecidos foram realizados na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, em São Carlos (SP), região que tradicionalmente sofre com inundações. Ambos procuraram saber se as informações à população e as melhorias nos serviços diminuiriam as cargas. As estratégias de redução foram consideradas eficazes. A maior redução foi dos grânulos de plástico virgem e fragmentos de plásticos cortados em máquinas. Houve também substancial redução de papel, cigarros e madeiras, e uma razoável redução de bolsas/pedaços de

plásticos, plástico rígido e itens de alumínio. A alta carga dos grânulos ocorreu devido à área industrial que promove uma produção muito grande deste tipo de resíduo.

Outro caso no país se deu no estado de São Paulo, com o auxílio de coletores de superfície constantemente esvaziados e higienizados também por caminhões que destinam o lixo após a coleta impedido que alcancem os córregos e canais do município. Após investimento de R\$12 milhões visou fazer com que São Paulo acompanhe as tendências mundiais de países desenvolvidos de gestão de resíduos sólidos. Além de mecanizar o processo de coleta de lixo, o projeto trouxe benefício como o fato de o lixo poder ser dispensado pelos cidadãos a qualquer hora do dia, sem ficar exposto ao ar livre, o que evita que libere gases mal cheirosos no ambiente e estejam sujeitos a serem carregados durante as chuvas, evitando entupimento dos sistemas de micro drenagem e poluição dos corpos d'água. Outros pontos positivos são a menor circulação de caminhões de coleta, já que a coleta passa a ser feita com menos periodicidade, gerando menor poluição do ar e menor congestionamento. As críticas ao projeto ficaram em torno dos questionamentos em relação ao projeto em si, já que, nesta etapa, não é promovida a separação do lixo, ou seja, a correta destinação daquilo que poderia ser reciclado. A maior parte das críticas vem do fato de que, de acordo com o artigo nº 54 da Política nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a partir de agosto de 2014 foi proibido destinar materiais recicláveis a aterros sanitários, cabendo às prefeituras dos municípios a implantação da coleta seletiva. Na visão dos críticos, o sistema de coleta mecanizada é de alto investimento e deverá ser revisto para sua adaptação às regras (Decina e Brandão, 2016).

3.5 Impactos de sólidos sedimentáveis nos canais de drenagem urbana

A avaliação do impacto dos sólidos sedimentáveis pode ser verificado com monitoramento no próprio canal, o que demanda grande tempo, equipe e recursos financeiros, e, uma outra opção é a utilização de ferramentas computacionais para modelar o escoamento da massa líquida em que ocorre sedimentação de sólidos no fundo do canal de drenagem urbana.

O adequado sistema de drenagem urbana está intimamente ligado ao gerenciamento de resíduos. E é a causa, muitas vezes, de alagamentos em áreas urbanas. Os resíduos sólidos se dispostos de maneira irregular em rios, córregos, terrenos vazios e nas ruas, o lixo produzido e não coletado provoca efeitos indesejáveis como o assoreamento de rios e córregos, a obstrução de bocas

de lobo e galerias de águas pluviais, a destruição de áreas verdes, além de mau cheiro, proliferação de moscas, baratas e ratos, todos com graves consequências, diretas ou indiretas, na drenagem urbana e saúde pública. Até mesmo o resíduo domiciliar que é tradicionalmente disposto nas calçadas, à espera da coleta, muitas vezes é espalhado e carregado por águas de chuva e até em bocas de lobo e galerias de drenagem, reduzindo drasticamente a capacidade de escoamento desses dispositivos hidráulicos.

Soluções que permitam, com segurança, maior armazenamento antes da coleta pode ajudar a reduzir custos logísticos de coleta e evitar que esse tipo de resíduo vá parar no sistema de drenagem. Bem como soluções que visem este tipo de controle em áreas de urbanização irregular, que muitas vezes não dispõe de coleta domiciliar. Além do resíduo domiciliar, o resíduo produzido pela construção civil e a crescente parcela de sedimentos carregados pelas chuvas em ambientes urbanos, decorrente do número de obras, desmatamentos e aumento das velocidades de escoamento superficial, assoreiam córregos diminuindo sua capacidade.

A inadequada disposição final também gera graves problemas, como é o caso de concreto não utilizado e que é descarregado irregularmente em bocas de lobo ou córregos, do entulho descartado em terrenos baldios e rios entre outras inadequações voluntariamente cometidas por este setor, muitas vezes por conta do custo de destinação final destes rejeitos ou ignorância.

Nas cidades de médio e grande porte no Brasil, os resíduos produzidos pela construção civil representam mais de 50% da massa dos resíduos urbanos. Estudos realizados em alguns municípios apontam que os resíduos da construção formal têm uma participação entre 15% e 30% na massa dos resíduos da construção e demolição, e 75% provêm de eventos informais, obras de construção, reformas e demolições realizadas, em geral, pelos próprios usuários dos imóveis. Esse problema somente é minimizado com adequada frequência da coleta e educação da população com multas. O descarte inadequado de esgoto em galerias pluviais também é outro problema considerável, com a contribuição de até 5% em caso de sistema separador absoluto podendo chegar a até 45 % em áreas sem coleta de esgoto. (Volschan 2009).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) apresentou dados que um em cada três municípios brasileiros passou por situações de enchentes, entre 2012 e 2016, e que 30,1% das prefeituras consideram que os resíduos jogados em

ruas, avenidas, lagos, rios e córregos causaram as enchentes nas cidades (ABRELPE, 2017). O mau gerenciamento de resíduos sólidos implica em custos elevados para a drenagem urbana e saúde pública além dos custos sociais e ambientais decorrentes dos eventos de alagamento.

Como citado anteriormente os trabalhos de quantificação de cargas de resíduos sólidos na drenagem urbana requerem acompanhamento contínuo por vários meses, enquanto a simulação computacional permite avaliar e quantificar as cargas e mais ainda os impactos dos resíduos sólidos nos canais de drenagem urbana.

3.5.1 Simulação Computacional Para Avaliação da Deposição de Sedimentos em Canais de drenagem

A modelagem é fundamental para buscar uma aproximação da realidade e obter as repostas do(s) problema(s) em questão de forma empírica. Para AGBASHLO et al (2009) a modelagem pode gerar valores experimentais, resultados experimentais e preditos, avaliações estatísticas diversas e verificação de diferenças significativas em variáveis diversas de estudo.

Segundo Amaral (2014), a maioria dos softwares de modelagem é de base física, representada por equações diferenciais clássicas que não possuem soluções analíticas, incorporando rotinas computacionais para a solução das mesmas por métodos, acabando por incluir maior detalhamento da variabilidade espacial e temporal dos parâmetros, das variáveis de entrada/saída e de estado do modelo e, por consequência, possibilitando melhor caracterização dos problemas analisados.

A utilização de sistemas computacionais permitiu o desenvolvimento de modelos matemáticos complexos para tratar com mais rigor os projetos de drenagem. Podendo ser largamente utilizada na avaliação de eventos de inundação, na qual a situação pode fugir das condições preestabelecidas em projeto, facilitando o mapeamento antecipado de seus efeitos negativos (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2015).

Decina e Brandão (2016) citam que a utilização de softwares para simulações possibilita criar cenários e utilizar eventos hidrológicos registrados para avaliar a eficácia de medidas de

intervenção e ainda pode promover metodologias no sentido de auxiliar o poder público no processo de tomada de decisão.

Segundo Costa (2013), as simulações computacionais podem ser utilizadas para melhorar a compreensão da interação entre as águas pluviais e o sistema de drenagem de bacias hidrográficas, utilizando a modelagem para explicitar os fenômenos existentes. Correia, Ribeiro e Baptista (2015) observam que esses modelos são compostos por conjuntos de equações e mecanismos que representam o encaminhamento do escoamento superficial de precipitações pluviométricas até o seu exutório.

A simulação pode ser compreendida como processo de utilização do modelo que conta com três fases, a saber: i) calibração ou ajuste do modelo, que é a fase na qual os parâmetros são determinados; ii) validação ou verificação, que consiste na simulação do modelo com os parâmetros estimados de modo a se verificar a validade do ajuste realizado,; e, iii) previsão, que é a simulação dos sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para a quantificação de suas respostas a diferentes entradas. As possíveis desvantagens dos modelos computacionais se dão nos ajuste dos parâmetros que dependem da disponibilidade de dados históricos e quando não há dados no local é preciso realizar a correlação regional entre as características físicas do local de modo a serem adotados valores para os parâmetros do modelo (Montenegro, 2011).

Existem vários modelos computacionais desenvolvidos em diversos países, inclusive no Brasil, que utilizam equações e rotinas operacionais semelhantes para avaliação das condições de escoamento de bacias hidrográficas, e agregando dados da macrodrenagem.

Segundo Possanti e Dornelles (2017), o modelo SWMM (Storm Water Management Model) foi desenvolvido em 1971 e é outra ferramenta computacional de grande auxílio ao planejamento e à gestão dos sistemas de drenagem, por possibilitar simulações quantitativas e qualitativas do escoamento superficial de águas pluviais, principalmente em áreas urbanas. O software SWMM foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (USEPA), para possibilitar a representação do processo dinâmico de chuva-vazão em bacias hidrográficas, considerando eventos chuvosos pontuais, intermitentes e contínuos (RONQUIM, 2014).

O SWMM é um dos softwares mais difundidos na representação de manejo de águas pluviais e em sistemas de drenagem, por apresentar grande detalhamento e abrangência de

modelagem dos deflúvios de áreas urbanas e por ter certa simplicidade em sua aplicação e instalação, além de baixa capacidade de interferência nos computadores. Existem vários programas comerciais associando SWMM ao SIG, como InfoSWMM, Mike Urban, SewerGEMS, XP-SWMM, SOBEK e PCSWMM. Esses softwares têm a capacidade de agregar o modelo digital do terreno no formato shapefile com os dados de saída de modelos hidrológicos, permitindo a delimitação de áreas de risco de inundação em bacias hidrográficas, podendo ser de grande relevância para o planejamento municipal (RIBEIRO; CARDOSO, 2015).

Segundo Rossman (2015), o SWMM apresentou diversas atualizações no decorrer dos anos, melhorando a sua capacidade de simulação. Gomes (2014) comenta que esse modelo é caracterizado como software livre por disponibilizar seu código fonte aos usuários, possibilitando o seu acoplamento em outros 56 programas computacionais, como o SIG e o CAD, a criação de novos modelos e de ferramentas para melhorar a apresentação dos resultados.

No SWMM ainda é permitido, de maneira prática, a calibração para buscar a diminuição de erros percentuais de vazão de pico ou de volume simulados, melhorando qualidade dos resultados obtidos (ROSA, 2017). Tsai et al. (2017) aplicaram o modelo SWMM na bacia rural Peishi (Taiwan), confirmando a confiabilidade do modelo para esse tipo de bacia. Entretanto, ressaltaram que o software pode subestimar o fluxo diário e a concentração de poluentes de eventos chuvosos com baixa intensidade em áreas de elevada permeabilidade.

Segundo Gironás et al. (2010), o novo manual SWMM 5 apresenta um passo-a-passo que facilita o aprendizado e, por ser gratuito, os gestores municipais podem ter acesso de forma a melhorar o gerenciamento das águas urbanas.

A simulação computacional no SWMM permite avaliar os impactos da sedimentação de sólidos no escoamento e nas despesas de manutenção dos canais. Diversos são os trabalhos com a utilização do software, alguns trabalhos recentes e diversas metodologias são aplicadas para se realizar diferentes análises provenientes de simulação computacional deste software que tem sua criação datada de décadas atrás, entretanto são escassos os trabalhos para o maior conhecimento das despesas decorrentes de atividades de manutenção nos canais de drenagem urbana.

Como exemplos de trabalhos se utilizando do software SWMM podemos destacar o de Santos, Ruffino e Barros Filho (2017) que simularam a bacia urbana do Riacho do Prado (Campina

Grande/PB) no SWMM, para avaliar o impacto do aumento de áreas urbanizadas nas infraestruturas de drenagem, o resultado da pesquisa desses autores foi que houve crescimento no número de casos de alagamento em diversos pontos da bacia quando a impermeabilização do solo passou de 26,5% para 57%.

Outros exemplos locais e atuais são os de Silva et al. (2017) que utilizaram o SWMM para analisar inundações em canal de drenagem da bacia da Estrada Nova (Belém/PA), comparando a ocorrência desses eventos nas condições atuais e de projeto do canal e com bacia de acumulação. A partir das simulações foi verificado que o extravasamento do canal ocorre mesmo com o reservatório, demonstrando ser uma ferramenta importante no estudo de concepção dos sistemas de drenagem. Enquanto, Vinagre et al. (2017) aplicou a modelagem do SWMM na bacia do Una (Belém/PA), para verificar o comportamento nível de água nos canais de drenagem durante eventos de precipitação de grande intensidade, que ao somarem com a elevação da maré, causam grandes problemas de inundação.

Mais recentemente, o trabalho de Nylander (2019) utilizou de simulação hidrodinâmica com o software SWMM para avaliar a utilização de comporta em eventos extremos de precipitação pluviométrica e de maré no canal de drenagem da Tamandaré, obtendo como resultado da pesquisa a verificação de que a capacidade do canal da Tamandaré é suficiente para escoar, isoladamente, os volumes precipitados e os volumes de maré baixa. Contudo, quando a maré alta é acima de 3,39 m ocorre inundação, situação agravada na coincidência de maré alta e precipitação pluviométrica em que foi verificado que a aplicação de comporta deve ser complementada por outros dispositivos técnicos de contenção e/ou de bombeamento do volume excedente de água pluvial, para evitar a ocorrência de inundações na área do canal da Avenida Almirante Tamandaré.

4 METODOLOGIA

A realização desta pesquisa e sua base metodológica foi a identificação de que existem deficiências na determinação e quantificação dos gastos com a remoção dos resíduos sólidos sedimentados nos canais de macrodrenagem urbana do município de Belém-PA.

Para a realização da presente pesquisa foi adotada uma abordagem de natureza qualitativa e quantitativa, visto que a união desses dois métodos se faz necessário para o atendimento do objeto de pesquisa. Quanto aos objetivos ou tipo, a pesquisa é classificada em descritiva. É descritiva, por ter sido realizado um levantamento de dados para descrever a situação atual dos resíduos sólidos e de drenagem urbana no município de Belém. Apresenta finalidade prática, pois objetivou gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 43).

4.1 Área de estudo

No trabalho foi estudado o canal de macrodrenagem urbana da bacia da Tamandaré, localizado no município de Belém-PA. Na bacia foram desenvolvidos estudos de hidráulica, hidrodinâmica e de resíduos sólidos.

A bacia hidrográfica da Tamandaré, situa-se na parte mais antiga do município de Belém. É constituída pelo canal da Tamandaré, afluente da baía do Guajará, possui área total de 1,74 km² e área alagável de 0,63 km², abrangendo partes dos bairros da Cidade Velha, Batista Campos e Reduto, sua área urbana é de 1,64 Km² e possui 5,43% de área natural. Essa bacia juntamente com as bacias do Una, Tucunduba, Estrada Nova, Mata Fome, Paracuri e Cajé, são as mais urbanizadas do município de Belém, apresentando mais de 60% de suas extensões habitadas por construções.

O canal da Tamandaré possui 1.120 metros de comprimento, largura média de 4 metros e profundidade de 2,5 metros. O fundo do canal é predominantemente em terreno natural, exceto no trecho entre a Rua Ângelo Custódio e Rua Monte Alegre que possui o fundo revestido em concreto. Antes do emissário existem 5 comportas com sistema de gradeamento, que acumulam certa quantidade de resíduos sólidos. O único canal de drenagem da bacia da Tamandaré tem forma

Desde a fundação de Belém no século XVII, as áreas próximas de onde seria construído o canal da Tamandaré (Alagado do Piri) sofriam com grande influência da maré, o que limitou a expansão urbana. Essa realidade ribeirinha da área central da cidade de Belém começou a ser modificada apenas no século XIX, quando o governo municipal desenvolveu projetos de terraplanagem e de drenagem, aterrando áreas mais baixas e canalizando parte do curso d'água, o que propiciou a ampliação de áreas disponíveis para habitações na região central da cidade de Belém e próximas ao canal (ARAÚJO JÚNIOR, 2014).

Borges (2012) destaca que o processo de urbanização da bacia da Tamandaré foi intensificado ainda no meio para o fim do século XIX com o aterramento de áreas ribeirinhas, que se deu principalmente, na parte dos bairros da Cidade Velha e da Campina. Esse processo de modificação da estrutura urbanística da bacia da Tamandaré fez com que áreas com cotas abaixo de 4 m fossem ocupadas, desconsiderando eventos de elevação de nível de maré menos recorrentes que acontecem periodicamente, as quais atingem o Ver-o-Peso e a Avenida Almirante Tamandaré (via trafegável que margeia o canal de drenagem). Na figura 9 é apresentada a bacia da Tamandaré no município de Belém.

Figura 9 - Mapa da Bacia da Tamandaré no município de Belém.



Fonte: Nylander (2019).

Como a infraestrutura urbana da bacia da Tamandaré apresenta grande importância histórica para o município de Belém, foi instituída a Lei municipal nº 7.709/94 (Lei do Patrimônio Histórico), para promover a conservação, o tombamento de imóveis, entre outros aspectos.

Anualmente, em momentos de cheia, as águas da baía do Guajará invadem o sistema de drenagem da Tamandaré, dificultando o escoamento no canal de drenagem e favorecendo a ocorrência de inundações e alagamentos, principalmente quando coincidem com precipitações pluviométricas intensas que ocorrem nos períodos mais chuvosos (LEÃO, 2017).

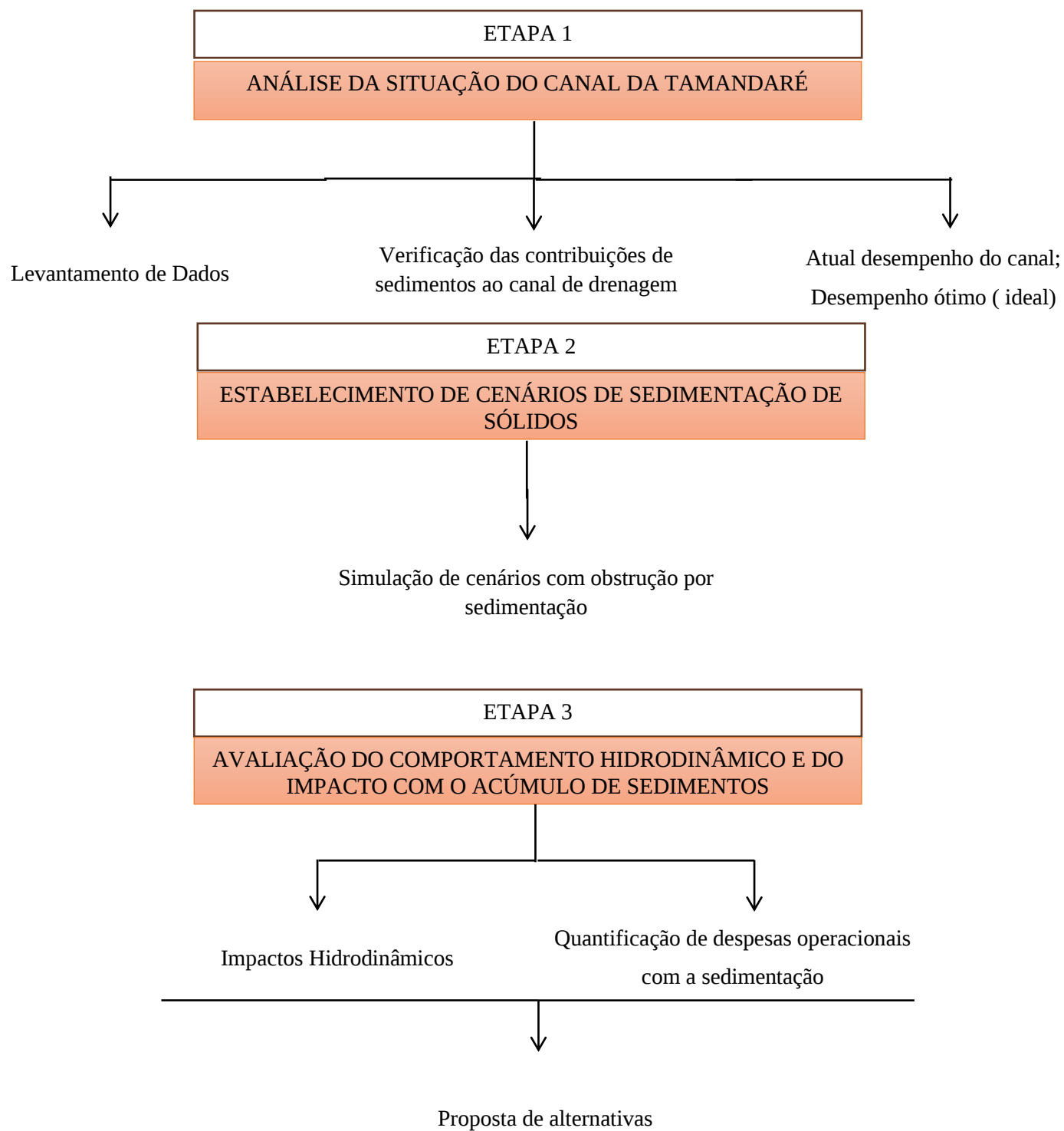
A deposição de resíduos dos mais diversos tipos em especial nas áreas mais baixas da bacia é histórica, e ao longo dos anos vem causando prejuízos ao sistema de drenagem urbana da bacia da Tamandaré e consequentes perdas à população que vive essa realidade.

Com isso na pesquisa foi analisado o comportamento quantitativo e qualitativo dos sólidos sedimentáveis em canais de drenagem e sua influência no escoamento da bacia e custos acarretados na remoção de percentagens de sedimentação da bacia, tendo como base a avaliação da dinâmica da bacia e do sistema de macrodrenagem, por meio de simulação hidrológica e hidráulica aplicada pós-parametrização de dados adquiridos com levantamentos em campo e pesquisa bibliográfica.

4.2 Procedimentos metodológicos

As atividades da pesquisa foram desenvolvidas em quatro etapas no período de outubro de 2019 a setembro de 2021, sendo elas: Etapa 1 - análise da situação do canal da Tamandaré; Etapa 2 - estabelecimento de cenários de sedimentação de sólido; Etapa 3 - avaliação do comportamento hidrodinâmico com a sedimentação e avaliação do impacto com o acúmulo de sedimentos. Na Figura 10 são representadas as etapas da pesquisa.

Figura 10 – Etapas da Pesquisa



ETAPA 1 – ANÁLISE DA SITUAÇÃO DO CANAL DA TAMANDARÉ.

Nessa etapa foi realizado o levantamento de informações para caracterizar a Bacia da Tamandaré, o que ocorreu em três fases:

- a) A primeira fase consistiu na obtenção de dados para aplicação do modelo computacional SWMM na bacia da Tamandaré;
- b) A segunda fase consistiu na verificação das contribuições de sedimentos à bacia;
- c) A terceira fase consistiu no levantamento do atual desempenho hidráulico do canal.

Fase 1 – Obtenção de dados e aplicação no Modelo SWMM

No levantamento de dados nessa fase foram consultados:

- Projeto do Sistema de Macrodrenagem da Bacia da Tamandaré, (PMB);
- Base de mapas cartográficos, hidrográficos e de lotes (CODEM/PMB).

Na pesquisa também foram utilizados também dados oficiais de entidades públicas governamentais, como a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), do Ministério das Cidades e do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), da Secretaria Municipal de Saneamento – SESAN e da Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém – CODEM.

Inicialmente, foi pesquisada a planialtimetria e a delimitação oficial da bacia da Tamandaré, já que essas informações são fundamentais para implantação do modelo matemático. Para isso foram consultados documentos de órgãos da Prefeitura de Belém, como a Secretaria de Saneamento (SESAN) e a Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM) e literaturas técnico-científicas, bem como os registros topográficos históricos da bacia, que marcam o início da formação urbana do município de Belém.

Em seguida, avaliado se os documentos oficiais apresentavam a real área de contribuição do escoamento de águas pluviais até o exutório, já que existe discordância de autores (TAVARES, 2017; PONTES et al., 2017, COSTA et al., 2015; PAIVA et al., 2012; SANTOS, 2012; e SILVA, 2003) sobre o valor de área da bacia. Para isso, a base planialtimétrica foi processada em sistema de informação geográfica, a partir do software ArcGis 10.3. Com os dados digitais de elevação, foi, com isso, elaborado o mapa hipsométrico.

Para avaliação do escoamento da área estudada foram calculadas as variáveis morfométricas (geométrica, relevo e rede de drenagem) citadas por Teodoro et al. (2007) e Santos, Carvalho e Antoneli (2016).

Nessa fase da pesquisa foram levantados os dados hidrológicos da bacia estudada, sendo divididos em dados de precipitação pluviométrica e dados maregráficos que também foram retratados para justificar sua utilização ou não para esse estudo desenvolvido.

No estudo foi realizado o levantamento bibliográfico e de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a caracterização dos eventos chuvosos que afetam a bacia e constatado ser esse fator é a principal fonte de entrada de água na bacia. Por conseguinte, foram estudados eventos de precipitação pluviométrica com diferentes durações, que possam ter maior influência nos resultados, no caso, as durações de 1,5h, 3h, 6h e 12h e utilizados os anos de estudo que o INMET possibilitava maior coerência nos números, por fim os dados geraram gráficos de precipitação para cada duração e a pluviosidade utilizada foi o valor correspondente ao pico dos gráficos sendo esse o maior cenário pluviométrico para melhor acuracidade das simulações.

Os 4 hietogramas relacionando TR e duração gerados foram fundamentados pelo estudo da relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Belém (Equação 01) proposto por Souza et al. (2012).

$$i = \frac{960,5846 T^{0,0954}}{(t + 9,7993)^{0,7245}} \quad (01)$$

Onde:

I: intensidade da precipitação em mm/h;

T: período de retorno em anos;

t: duração em minutos.

Verificados todos esses dados e a área da bacia, foi atribuída sua divisão em sub-bacias adaptadas de nylander (2019), o resultado das simulações será uma figura geral com a divisão das sub-bacias de forma clara.

Fase 2 - Verificação das contribuições de sedimentos ao canal de drenagem

Os sólidos presentes nos cursos d'água podem ter sua origem em processos erosivos naturais ou acelerados do solo, no lançamento de efluentes domésticos e industriais, na disposição de resíduos sólidos no ambiente e carreado pelas chuvas através da drenagem superficial ou, ainda, por meio de processos de urbanização de bacias hidrográficas, constata-se que as principais fontes de sólidos na água estão associadas à intervenção humana ao meio ambiente (BASSO *et al.*, 2011).

O local de estudo em questão apresenta coleta seletiva somente em alguns poucos pontos, porém é muito grande a quantidade de resíduos que não é separado e tratado. Essa situação de disposição inadequada de resíduos na cidade pode causar sérios problemas como: entupimento de córregos, pontes, bueiros, e, conseqüentemente, provocando enchentes na área central da cidade. No local de estudo ficou evidente que a questão da coleta seletiva é um projeto ainda insatisfatório, enquanto que grande quantidade de resíduos produzida tanto pela população quanto pelos demais setores públicos e privados da cidade chega a bacia da Tamandaré indevidamente, e tal quantitativo foi alocado nos cálculos de sedimentação.

Como uma das mais significativas alterações impostas pela urbanização sobre os regimes naturais, o escoamento superficial é um fenômeno de difícil contenção e pode suscitar processos danosos, tais como a erosão, com o conseqüente transporte de sedimentos e assoreamento de cursos d'água e canais de drenagem. A velocidade de ocorrência deste fenômeno, muito elevada em comparação à de seus processos contrários - infiltração e percolação – sobretudo nas regiões com maior declividade, sobrecarrega as áreas de várzea das bacias, aumentando a probabilidade de enchentes (ARAÚJO, *et al.*, 2011). Segundo França e Souza Filho (2003), a erosão em uma bacia é controlada pela interatividade dos processos de ventos e retificação do canal, que ocasionam a erosão, o transporte e a sedimentação, de acordo com a conformação e orientação retificação, e de suas condições infraestruturais e com a vegetação, repercute numa maior ou menor quantidade de sedimentos carreadas a bacia aos processos e aos agentes dinâmicos.

Além disso, foi investigada a declividade na Bacia da Tamandaré, já que a pequena velocidade da água, pode resultar no aumento da frequência dos alagamentos. Isto posto, a velocidade de escoamento passa a exercer grande influência no escoamento das águas pluviais, sendo a declividade um dos principais responsáveis pela sedimentação e pelo alagamento de determinadas áreas. O descarte inadequado de esgoto em galerias pluviais também é outro

problema considerável, a contribuição é de até 5% em caso de sistema separador absoluto podendo chegar a 45 % em áreas sem coleta de esgoto, dependendo da situação do saneamento in-loco (Volschan 2009).

Tendo em vista o conhecimento ainda limitado quanto ao quantitativo de sedimentos em uma bacia por métodos computacionais, foram enfatizadas inicialmente as informações relativas às principais fontes de sedimentação disponíveis como a disposição de resíduos, a erosão e sua ocorrência dependente diretamente da infraestrutura do canal e de sua retificação, e da existência de coleta e tratamento de esgoto. Volschan (2009) propõe um método de investigação do acréscimo de sedimentação que leva em consideração a integração de dados de resíduos, erosivos e chegada de esgoto, sendo este acréscimo de sedimentos determinado através do cruzamento dessas informações para elaboração de uma porcentagem de acréscimo de sedimentos.

Para atribuir-se este acréscimo, as principais fontes de resíduos sedimentáveis foram divididas em parâmetro, sendo eles: coleta de resíduos, definidas três classes: alta (áreas com alta taxa de coleta de resíduos, sem deposição irregular e coleta seletiva), parcial (áreas com alta taxa de coleta, com baixa deposição irregular de resíduos e coleta seletiva) e mínima (áreas com baixa coleta de resíduos e com deposição irregular). Para o parâmetro erosão são consideradas três classes: baixa (áreas retificadas), média (áreas retificadas com infraestrutura inadequada) e alta (áreas não retificadas) e quanto a coleta de esgoto são consideradas três classes: baixa (áreas sem coleta de esgoto), média (áreas com sistema combinado de coleta de esgoto) e alta (áreas com sistema do tipo separador absoluto).

Cada parâmetro apresenta três classificações de porcentagens de 5%, 10% e 15% que se multiplicado por 3 parâmetros temos 45% como o máximo de acréscimo de volume de resíduos que pode adentrar a bacia, portanto, dependendo da situação de cada item elencado, para a área de estudo: coleta de resíduos: alta (a região apresenta alta cobertura de recolhimento e deposição de resíduos de forma irregular é pontual); erosão: baixa (o canal é retificado e possui problemas estruturais pontuais) e coleta de esgoto: alta (a região do estudo possui sistema separador absoluto para tratamento do esgoto e Estações de tratamento pontuais em empreendimentos e residenciais).

A porcentagem final gerada a partir do cruzamento dos dados, será analisado, e comparado com a área total do canal e validado para se chegar a uma porcentagem adequada, sendo esse proveniente da eficiência dos principais parâmetros de acréscimo de sedimentos na bacia.

Fase 3 - Avaliação do atual desempenho hidráulico do canal

Nessa fase foi realizada a caracterização planialtimétrica da bacia da Tamandaré, com base em dados obtidos em documentos da CODEM. Em relação à esquematização do sistema geométrico do canal da Tamandaré foram considerados os dados das seções transversais e dos perfis longitudinais, fornecidos pela Prefeitura de Belém, essa atividade foi ainda complementado pelo levantamento topográfico do canal da Tamandaré citado no trabalho de Nylander (2019) em campo.

Os dados das seções e perfis considerados do canal da Tamandaré foram depois da retificação. Para fins de modelagem do sistema geométrico do canal da Tamandaré, três aspectos de dados foram considerados:

- Extensão do canal da Tamandaré, cotas dos perfis longitudinais de fundo e das bordas dos canais.
- Seções transversais com estaqueamento de 100 em 100 m em toda a extensão do canal.
- A partir da berma do canal foi considerado um raio de 50 m para às margens esquerda e direita. Tal superfície foi considerada nesse estudo como Planície e/ou área limítrofe de inundação.

A determinação da altimetria da planície teve como base os níveis das vias marginais projetadas.

Os dados geométricos e altimétricos foram utilizados como entrada no modelo hidrodinâmico. Sendo as cotas superiores das ruas próximas ao canal da Tamandaré foram representadas no modelo computacional, nessa atividade foi empregado, também, o tipo de forma irregular, as larguras e as extensões das vias que foram obtidas de imagem de satélite (Google Earth), enquanto, a profundidade foi variada em função do nível do terreno no trecho representado, sendo utilizadas as profundidades do trabalho de Nylander (2019) que as avaliou in-loco.

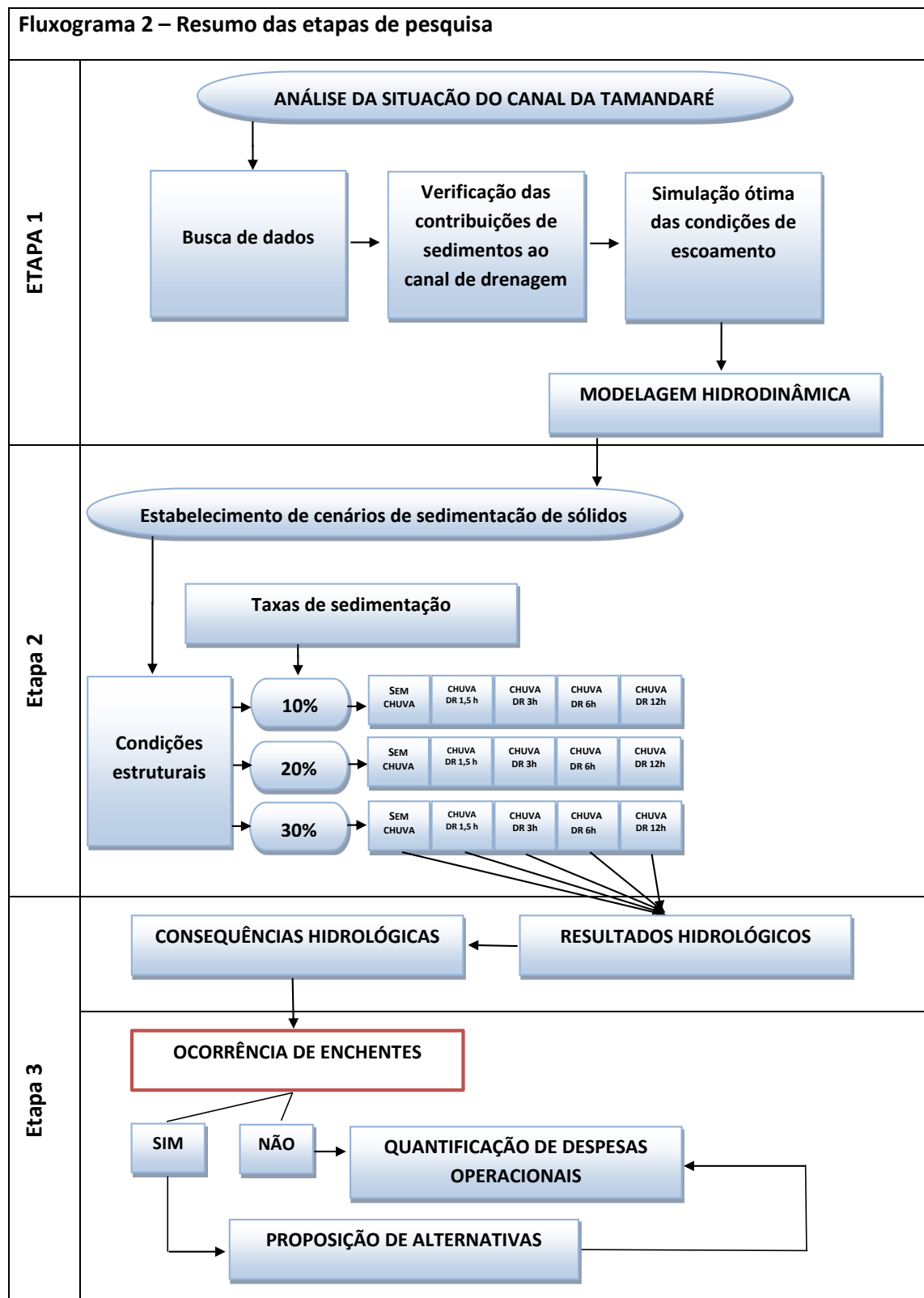
Por fim, foram coincidos os picos do hidrograma das diferentes precipitações pluviométricas e da condição de maré baixa, pois de acordo com Nylander (2019) nas condições

de maré alta acima de 3,11 metros o canal da Tamandaré é submetida a consequências hidrodinâmicas tais como inundações, o que dificulta a análise da sedimentação e das suas consequências e que gerariam mais quinze simulações, demonstrando a interação hidrodinâmica dos dois fatores hidrológicos na estrutura de macrodrenagem da Tamandaré e de seus efeitos no espaço urbano. Portanto, foram totalizadas 16 simulações hidrodinâmicas diferentes para representar as condições de escoamento no Canal da Tamandaré.

ETAPA 2 – DETERMINAÇÃO DE CENÁRIOS DE SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS.

A Etapa 2 foi realizada em fase única, com o estabelecimento de cenários de sedimentação realizado com auxílio do software SWMM 5.0, em razão da capacidade de simulação de diferentes características de bacias urbanas e das adaptações possíveis ao software garantindo simular cenários de sedimentação de sólidos de 10, 20 e 30 % respectivamente na área do canal da Tamandaré.

Esquema 2 – Fluxograma de Resumo das etapas de pesquisa.



Fase 1 – Simulação de cenários com obstrução por sedimentação

Na continuidade da pesquisa, a partir do conhecimento da ocorrência de eventos de inundação no canal da Tamandaré, foi verificada a capacidade de comportar sedimentos do canal.

Na simulação do dimensionamento do sistema de macrodrenagem afetado pela sedimentação foi utilizado o software SWMM. Na interface de Precipitação, o software SWMM utiliza dos dados da equação de IntensidadeDuração-Frequência - IDF do local de estudo, disponibilizado pelo INMET. No caso foram utilizados dados do município de Belém, bem como as equações de chuva do município.

Antes de iniciar a modelação propriamente dita, foi necessário caracterizar a ribeira adotada como caso de estudo. Depois, foi necessário avaliar se a ribeira poderia ser tratada, para efeitos de modelação, como foi considerado canal prismático e ao fazer isso que influência poderia ter nos resultados. Na análise também foi considerado o coeficiente de Manning e a declividade longitudinal da ribeira, a altura normal do escoamento para diferentes caudais, por fim as curvas de vazão. O valor de Manning do canal 0,014 – Superfície cimentada; foi definido a partir das condições observadas in loco, considerando os valores do quadro 1.

Quadro 1 – Valores do coeficiente de Manning para canais em diferentes condições de escoamento.

Tipo	Natureza das paredes	<i>n</i>
1	Superfícies excepcionalmente lisas, juntas perfeitas, acabamentos vitrificados.	0,009
2	Superfícies, juntas e vértices lisos e bem acabados, cimento muito liso tipo forma metálica.	0,010
3	Superfície lisa tipo reboco (2 areia e 1 cimento) desempenado no local por meios mecânicos.	0,011
4	Superfícies lisas mas com alguma aspereza, tipo emboço (3 areia e 1 cimento) e pequenas imperfeições no alinhamento e nas juntas, desempenado no local por meios mecânicos.	0,012
5	Superfícies de concreto e/ou argamassa, com pequenas imperfeições no acabamento e no alinhamento, desempenada por meios manuais com régua de madeira (*coletores de esgotos – valor usual).	0,013
6	Superfície cimentada (concreto) não muito alisado nem desempenado, pequeno crescimento de algas e depósitos no fundo.	0,014
7	Superfícies ásperas, alvenarias de tijolos ou paralelepípedos rejuntados, concreto ciclópico, reboco de argamassa com defeitos ou incompleto, juntas irregulares, cortes lisos a frio em rocha alinhamento tortuoso das superfícies (falta de desempenho).	0,015
8	Superfícies muito ásperas como concreto com a brita aparecendo saliente, superfícies cortadas em terreno tipo arenito, superfícies de alvenaria de tijolos ou pedras, não bem acabadas ou rejuntadas, rebocos ou acabamento mal feito ou em mau estado. Superfícies cortadas em rocha irregularmente. Canais com depósito no fundo, musgo nas paredes.	0,017
9	Superfícies cortadas em terra cobertas com argilo-cimento ou argilo-betume, ou canais de alvenaria ou concreto em más condições de manutenção e fundo com depósitos de pedregulhos; de terra, mas sem vegetação.	0,018
10	Superfícies em terreno compactado ou de gabiões, ou de concreto irregular ou arenito cortado manualmente e com alguma erosão e depósitos, além de um pouco de vegetação nas margens.	0,020
11	Canais de terra feitos pelo homem mantido em boas condições, com pouca vegetação, e canais naturais com as mesmas características (margens e fundo razoavelmente alinhados, sem grandes reentrâncias).	0,025
12	Canais de terra, com vegetação média, fundo com irregularidades por erosões; e assoreamentos, margens razoavelmente alinhadas.	0,028
13	Canais com fortes irregularidades no leito e nas margens não muito alinhadas e com vegetação normal.	0,030
14	Canais tipo rios permanentes em terreno aluvial, mas com bastante vegetação e variação da seção transversal, moderada.	0,033
15	Canais naturais tipo montanhoso, com vegetação, sedimentos (areia, cascalho e pedras grandes), corredeiras seguidas de lados seguido de corredeiras, com vegetação e variação transversal acentuada.	0,035
16	Idem Item 15, mas em condições mais severas.	0,040
17	Idem Item 15, em condições ainda mais severas.	0,067
18	Idem Item 15, em condições muito severas.	0,080
19	Canais naturais ou não com muita vegetação (árvores).	0,100
20	Condições muito severas de vegetação e irregularidades no leito do canal, como durante um transbordamento.	0,220

Fonte: Azevedo Netto e Fernández (2015)

Os dados de entrada do software referente à canalização podem ser divididos em três segmentos:

- a) Área externa ao leito;
- b) leito do canal;
- c) características infraestruturais.

A modelagem dos processos hidrológicos foi fundamental para a compreensão integrada dos fenômenos de transporte de águas pluviais e materiais que afetam a qualidade da água. Com o modelo calibrado, tornou-se possível a realização de simulações que resultam na quantificação de riscos e eficiências dos sistemas de drenagem.

No caso específico do projeto, a modelagem permitiu integrar as várias informações a serem levantadas e, pela concepção distribuída do modelo, compreender a gênese dos materiais carregados pelos deflúvios superficiais e da acumulação de sedimentos e funcionamento com o adequado escoamento do canal. O modelo a ser utilizado será do tipo distribuído, em que a bacia de drenagem é subdividida em células poligonais e dentro de cada célula realizada o balanço hídrico em que participam a precipitação, infiltração deflúvio superficial e as influências para as células vizinhas.

Em seguida, foram definidas as dimensões (altura, largura e comprimento) em metros de cada seção da estrutura de macrodrenagem. Vale comentar que foi utilizado o tipo de forma, para integrar ao sistema as peculiaridades existentes em cada trecho do canal. Enquanto, nos trechos do canal sob as pontes foram utilizadas o tipo de forma, para representar o canal em seção fechada. O valor de Manning do canal foi definido a partir das condições observadas *in loco* no trabalho de Nylander (2019) e das observações in-loco realizadas para os procedimentos metodológicos deste trabalho, que consideraram um único valor do coeficiente de Manning para o canal tendo em vista suas condições semelhantes em cada sub-bacia.

Os aspectos condizentes com a caracterização dos elementos de drenagem foram inspecionados no local de estudo para verificar a existência e condições de dispositivos como: bueiros, sarjetas, corta água, poços de visita, lagoa de captação entre outros. Essa verificação foi

tomada como de extrema importância por influenciar decisivamente na adoção e qualificação dos referidos elementos de drenagem no uso do SWMM.

ETAPA 3 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO COM A SEDIMENTAÇÃO

Nesta etapa foram realizadas três fases, para posterior apresentação dos resultados divididos em impactos hidrodinâmicos – fase 1, quantificação de despesas com a sedimentação – fase 2 e por fim foi criada uma proposta de alternativas – fase 3; os impactos hidrodinâmicos dizem respeito ao comportamento do canal e as implicações da sedimentação nos sistemas de macrodrenagem e microdrenagem e na circunvizinhança do canal. A fase seguinte (fase 2) trás a quantificação de despesas e comparações econômicas necessárias após os resultados hidrodinâmicos, findando com a fase 3 – que diz respeito as propostas de intervenções ante a resposta do funcionamento da bacia com a ocorrência de sedimentos.

Fase 1 – Impactos Hidrodinâmicos

Os hidrogramas de saída do modelo hidrológico SMWW são os resultados da modelagem hidrológica por sub-bacia. Sendo demonstrado o comportamento mediante a sedimentação, com os resultados da modelagem hidrológica utilizados para atribuir a ocorrência de inundações, utilizado também para sedimentação, que se dá de forma diferente ao longo das sub-bacias ficando os sólidos acumulados em maior volume nas áreas próximos das pontes e condutos fechados e mais espessada a jusante da sub-bacia.

Nessa fase será indicada a limpeza necessária para impedir certa porcentagem de sólidos que causará inundações na Bacia, os resultados estão dispostos no cenário sem chuva, com chuva de 1,5 h, 3h, 6h e 12 horas respectivamente e indicará se o canal será capaz de escoar as águas pluviais. Caso o canal não seja capaz de escoar o volume haverá indicação do período inundado e cota de inundação.

Fase 2 - Quantificação das despesas operacionais de remoção dos sólidos sedimentáveis

Essa etapa pretendeu verificar e indicar a necessidade e frequência de funcionamento do serviço público de limpeza urbana de limpeza e desobstrução de canais, Informações adicionais serão mais bem detalhadas no item dos resultados correspondente a modelagem hidrodinâmica e ao intervalo de limpeza adotado atualmente.

Considerando os mesmos dados de entrada da etapa anterior, considerando somente as condições de regime sem maré e de precipitação pluviométrica mínima e máxima, considerando o TR de 25 anos e as quatro durações (1,5h, 3h, 6h e 12h), foi simulado a partir de que porcentagem de sedimentação se faz necessária à retirada dos resíduos e a frequência de retirada dos mesmos para otimização de despesas, e caracterização do acréscimo de resíduos devido as condições de saneamento do local de estudo.

Foram Determinados os custos anuais de remoção de sólidos suspensos no canal; a caracterização da influência dos sólidos sedimentáveis na bacia e manutenção do canal de drenagem.

Fase 3 – Proposição de alternativas

A realização dos diferentes cenários e avaliação da ocorrência de inundação na microbacia da Tamandaré, pós realização de simulações no canal da Tamandaré foi avaliado se o canal da Tamandaré tem capacidade de comportar o volume de sedimentos nas porcentagens propostas no estudo, com precipitações de diferentes eventos pluviométricos, servindo como reservatório de detenção quando coincidem com momentos de cheia do corpo receptor, o que piora a sedimentação pela falta de carreamento de resíduos.

Finalmente, nessa fase, os resultados serão comparados com os dados obtidos nas etapas anteriores, para apresentar a redução do impacto das inundações a partir da retirada de resíduos e a porcentagem dos mesmos.

5 RESULTADOS

A desestruturação da infraestrutura desses locais acaba repercutindo na operação e manutenção do sistema de drenagem urbana, sendo o lançamento indevido de resíduos sólidos visualmente percebida nos canais de macrodrenagem da RMB, como pode ser observado na Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Canal de drenagem com sólidos



Fonte: Agência Belém (2021).

Apesar de praticamente todos os canais de drenagem de Belém apresentarem excesso de sólidos, as atividades da pesquisa foram concentradas na análise da situação do canal da Bacia da Tamandaré.

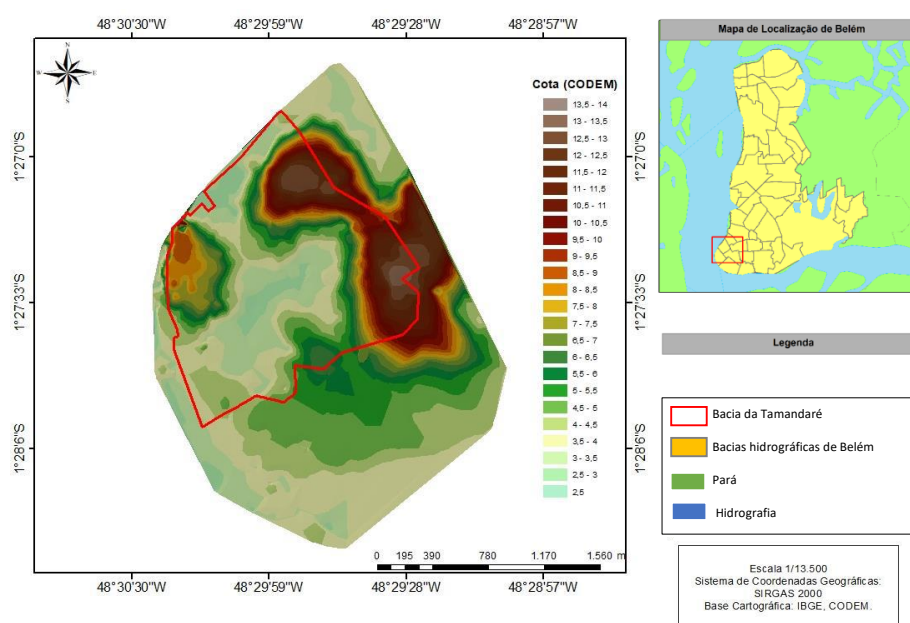
5.1 Análise da situação do canal da Tamandaré

5.1.1 Busca de dados para posterior aplicação no modelo SWMM

Nesta pesquisa fez-se necessário o estudo planialtimétrico da bacia da Tamandaré, para determinar a real área de contribuição e o subsequente escoamento de águas pluviais até o sistema de macrodrenagem da Tamandaré.

Na avaliação topográfica, realizada por geoprocessamento, foi identificado que a Bacia da Tamandaré, é, na verdade, formada por duas bacias, fazendo com que não haja interligação do escoamento entre certas áreas da região, essa constatação difere do indicado pela CODEM, que em sua delimitação oficial considera a incorporação de bacias menores nas bacias hidrográficas do município de Belém, o que levou a um novo rearranjo semelhante do trabalho de Nylander (2019). Na figura 12 é apresentado a hipsometria da bacia da Tamandaré e a região das microbacias que a compõem.

Figura 12 – hipsometria da bacia da Tamandaré



Fonte: Autor, adaptado de Nylander (2019)

Essa divisão também consta do trabalho de Silva (2003), que denominou a área que não contribui para o canal de drenagem da Tamandaré como Bacia do Comércio, o que foi confirmado por Nylander (2019) e tornou possível perceber tal situação à nordeste no mapa. A

bacia do comércio apresenta o escoamento das águas pluviais direcionado para o Ver-o-Peso, que sofre periodicamente com as elevações do nível da maré, e à Estação das Docas. A diferença topográfica entre os pontos de montante e jusante na Estação das Docas direcionam o escoamento pluvial diretamente para a baía do Guajará, reduzindo, então, a área de contribuição do canal da Tamandaré e, por consequência, o volume de água pluvial que deveria ser transportado por este canal até o corpo receptor, influenciando também na quantidade de sólidos no canal da Tamandaré.

A real área de contribuição do canal da Tamandaré passa dos limites topográfico-administrativa da bacia, como também constatado na análise planialtimétrica da bacia, a mesma possui variação altimétrica de 2,53 a 13,91 e área de 1,75 km² (perímetro da microbacia é 5,65 km), valor semelhante ao encontrado nas pesquisas de Nylander (2019), Costa et al. (2015), Paiva et al. (2012), e Santos (2012). A área da bacia da Tamandaré que direciona as águas pluviais até o canal de drenagem é denominada de microbacia da Tamandaré. Com isso, foram estabelecidos os limites da área de contribuição para o canal de macrodrenagem da Tamandaré, considerando os dados de altimetria, conforme a figura 13.

Figura 13 – Mapa da Área de Contribuição da Microbacia da Tamandaré.



Fonte: Autor (2021)

Em seguida, à pesquisa foi desenvolvida a caracterização morfométrica, que é baseada na área do mapa de 1,75 km² (Microbacia da Tamandaré). Como a real área de contribuição para o escoamento pluvial até o canal da Tamandaré é diferente da divisão de bacias da CODEM, com isso o levantamento de informações morfométricas baseados na delimitação oficial traria respostas errôneas para o sistema de macrodrenagem da bacia de estudo.

Na determinação das características morfométricas (geométrica, relevo e rede de drenagem) da real área de contribuição da Tamandaré, é relacionada na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização Morfométrica da Microbacia da Tamandaré.

Característica	Variável	Formulação	Valor encontrado
Geométrica	Índice de circularidade (IC)	$IC = \frac{12,57 \times A}{p^2}$	0,69
	Índice de compacidade (Kc)	$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,20
	Índice de forma (F)	$F = \frac{A}{Lex^2}$	0,71
Relevo	Cota Máxima	Maior Cota	13,91 m
	Amplitude altimétrica máxima	Maior cota – Menor cota	11,38 m
	Declividade média (I)	$I = \frac{Eq}{A} \times (\Sigma(\text{curva de nível}))$	0,0137 m/m
Rede	Densidade de drenagem (Dd)	$Dd = \frac{Lt}{A}$	0,65 Km/Km ²
	Índice de sinuosidade (Is)	$Is = \frac{L}{Dv}$	1,006
	Índice de gradiente do canal (G)	$G = \frac{\Delta a}{Lc} \times 100$	0,0483

Em relação as características Morfométricas, para aplicação no modelo, na pesquisa iniciou-se com a verificação das características Geométricas, cujos resultados foram de um IC de 0,69, o que configura forma da bacia mais circular. Segundo Cardoso (2006) o índice de circularidade (IC) relaciona a área da bacia com a área de um círculo de perímetro igual ao da área da bacia. Este valor tende para unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui conforme a mesma se torna mais alongada. Portanto o índice de circularidade de 0,69 é maior que 0,51, que pode gerar um impacto negativo para o tempo de concentração no escoamento da bacia, e ocasiona o aumento da sedimentação, pois, a microbacia da Tamndaré tem forma pouco irregular e o volume escoado acaba chegando ao exutório no mesmo período, o que aumenta a probabilidade de cheias e de acumulação de sólidos, podendo também gerar deflúvios de diversos pontos da bacia chegando simultaneamente ou em intervalos de tempo próximos nos pontos mais baixos.

Também é importante salientar que a mesma conclusão foi encontrada na análise do coeficiente de compacidade (valor de 1,20) e de forma (0,71), confirmando a tendência à ocorrência de inundações relacionadas aos eventos intensos de precipitação pluviométrica e favorecendo a sedimentação de materiais sólidos no canal da Tamandaré.

Quanto às características de relevo, foi analisada conforme proposição de Marchetti (1980), através da relação entre a diferença de altitude dos pontos extremos da bacia ou amplitude altimétrica, a cota altimétrica encontrada foi a diferença entre 13,91 m, e a amplitude altimétrica de 11,38 m, a altimetria afeta entre outras também a radiação emitida à bacia, alterando a precipitação pluviométrica, evapotranspiração e temperatura, quanto menor a altitude, maior a intensidade solar que a bacia recebe.

O relevo baixo da bacia favorece a ocorrência de inundações graduais, pois esse valor de declividade gera deflúvios com pequena energia potencial e impacta a velocidade de escoamento de águas pluviais até os pontos mais baixos da bacia da Tamandaré. As condições de baixa declividade são características da topografia do município de Belém, sendo verificada também nessa área de contribuição, com valor médio de 1,37%. Considerando a classificação de Santos et al. (2018), os relevos de bacias que apresentam variação de declividade entre 0 a 3% são consideradas planas, apresentando diferença de cotas muito pequenas.

No caso da rede de drenagem, a bacia da Tamandaré teve densidade de drenagem de 0,65 km/km², esse valor que demonstra a pequena extensão de canal para comportar o volume

escoado por unidade de área, favorecendo o aumento do nível de água no canal da Tamandaré.

Por sua vez, o índice de sinuosidade da microbacia foi de 1,006; o quanto mais próximo de 1 mais retilínea é a rede de drenagem, o que diminui a tendência de acúmulos de sedimentos no canal, em comparação aos canais que apresentam mudanças de sentido. Entretanto, o índice de gradiente do canal da Tamandaré foi de 0,0483%, esse valor demonstra a pequena declividade do canal da Tamandaré, o que reduz a velocidade de escoamento e forma a pequena força de arraste, resultando em ambiente propício para grande acúmulo de sedimentos ao longo do canal da Tamandaré.

Com isso, essas informações da bacia da Tamandaré foram utilizadas no restante da pesquisa, inclusive como nexo causal de acúmulo de sedimentos.

A área que contribui para o canal da Tamandaré tem forma mais arredondada, fazendo com os escoamentos, a partir de pontos mais distantes do exutório, cheguem em intervalos de tempo semelhantes, podendo apresentar tendência para ocorrência de inundações, além disso a bacia plana (baixa declividade) e a pequena diferença altimétrica geram escoamento com maior tempo de concentração, favorecendo a drenagem da área ao reduzir o pico de vazão.

Também a área de contribuição apresenta condições ruins de drenagem, apresentando apenas um canal de forma retilínea, com pequena amplitude topográfica entre pontos de montante e de jusante, o que facilita a sedimentação de partículas suspensas e demanda serviços periódicos de dragagem por parte do poder público.

5.1.1.1 Precipitação Pluviométrica

Pontes (2017) cita que os eventos pluviométricos na microbacia da Tamandaré são moldados por fenômenos da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), das Linhas de Instabilidade (LI) e dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), fatores que relacionados geram precipitações mesmo em período menos chuvoso. Na tabela 2 são relacionados os valores médios de precipitação mensal no município de Belém, no período de 1996 a 2015.

Tabela 2 – Média Mensal da Precipitação Pluviométrica de Belém (1996-2015).

Período de 1996 até 2015. Média (mm)/mês	
Janeiro	387.56
Fevereiro	401.28
Março	492.67
Abril	486.27
Maio	319.09
Junho	213.30
Julho	170.97
Agosto	134.17
Setembro	125.15
Outubro	118.9
Novembro	128.25
Dezembro	286.69

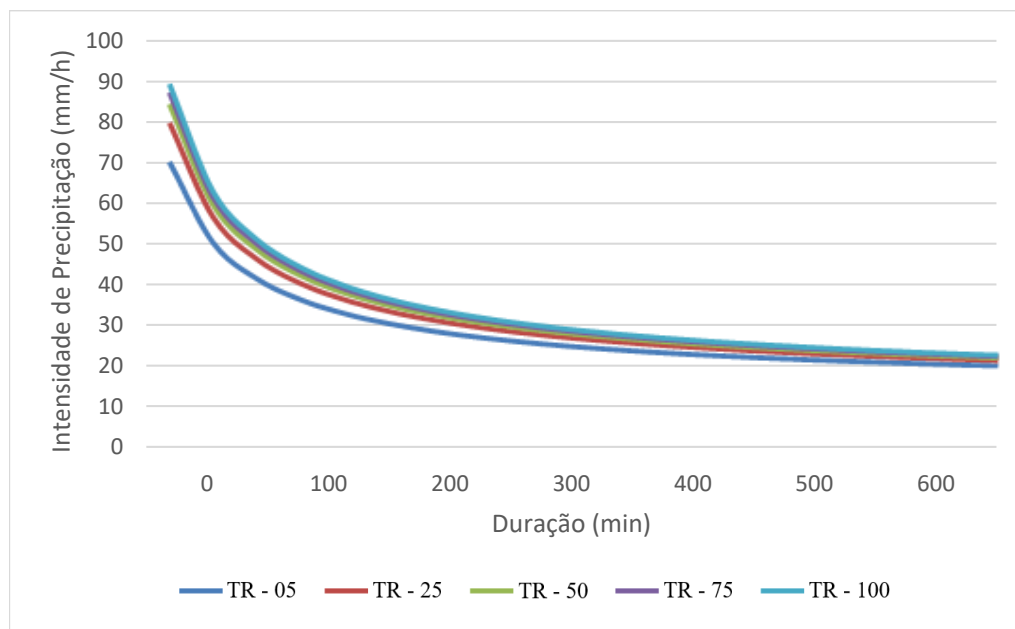
Fonte: INMET, 2016. Adaptado pelo autor.

No período de maior intensidade pluviométrica (de janeiro a maio) são observados valores mensais acima de 300 mm, valor superior à média (272,02 mm/mês), enquanto no período menos chuvoso é verificado que o volume precipitado fica, abaixo de 200 mm/mês, com exceção de Junho. É importante ressaltar que o período deste estudo foi de 1996 à 2015, anos com os dados mais consistentes de pluviosidade disponibilizados pelo INMET em um período de 20 anos. Destaca-se também que o acúmulo indevido de águas pluviais (alagamentos) em Belém ocorre em todos os meses do ano, enquanto problemas de inundação são verificados no período chuvoso.

Além disso, as precipitações pluviométricas do município de Belém tiveram incremento de volume ao longo dos anos quando avaliado o período de 1969 a 2009 (SANTIAGO et al., 2011). Essa afirmativa contribui para a sobrecarga do sistema de drenagem da Tamandaré o que facilita o acúmulo indevido de resíduos sólidos na água pluvial que escoam em logradouros da área urbana.

Na pesquisa, foi utilizada a equação IDF de Belém, proposta por Souza et al. (2012), para verificar a intensidade precipitada em eventos com diferentes tempos de recorrência (Figura 14).

Figura 14 – Gráfico da Intensidade de precipitação pluviométrica de Belém para diferentes tempos de retorno.



As características de precipitações pluviométricas convectivas verificadas nas curvas IDF geradas, indicam grande intensidade em precipitações pluviométricas de curta duração, decaindo ao longo do tempo. Observa-se que, quanto maior o tempo de retorno, menor a variação entre os volumes precipitados. Portanto, foi tomado como referência o TR-25, adotado na elaboração de alguns projetos de macrodrenagem e medidas de contenção. Na Tabela 3 são relacionados os valores totais calculados pela IDF de Belém.

Tabela 3 – Volume precipitado com de TR de 25 anos no município de Belém.

<i>Precipitação Pluviométrica</i>	<i>Duração da precipitação pluviométrica</i>			
	1,5	3	6	12
<i>Intensidade (mm/h)</i>	46,99	29,88	18,44	11,26
<i>Total Precipitado (mm)</i>	71,42	89,66	110,60	135,18

Como o Instituto Nacional de Meteorologia não dispõe de pluviógrafos em Belém, o registro do volume precipitado não é dado pela função horária, ou seja, não foi possível verificar o comportamento dos eventos chuvosos durante a sua ocorrência, apenas o total diário.

Contudo, na pesquisa realizada por Leme Engenharia (2011) foram identificados volumes precipitados em eventos de diferentes durações em Belém, sendo na Tabela 4 apresentados os valores monitorados e comparados aos calculados para precipitação pluviométrica de TR de 25 anos

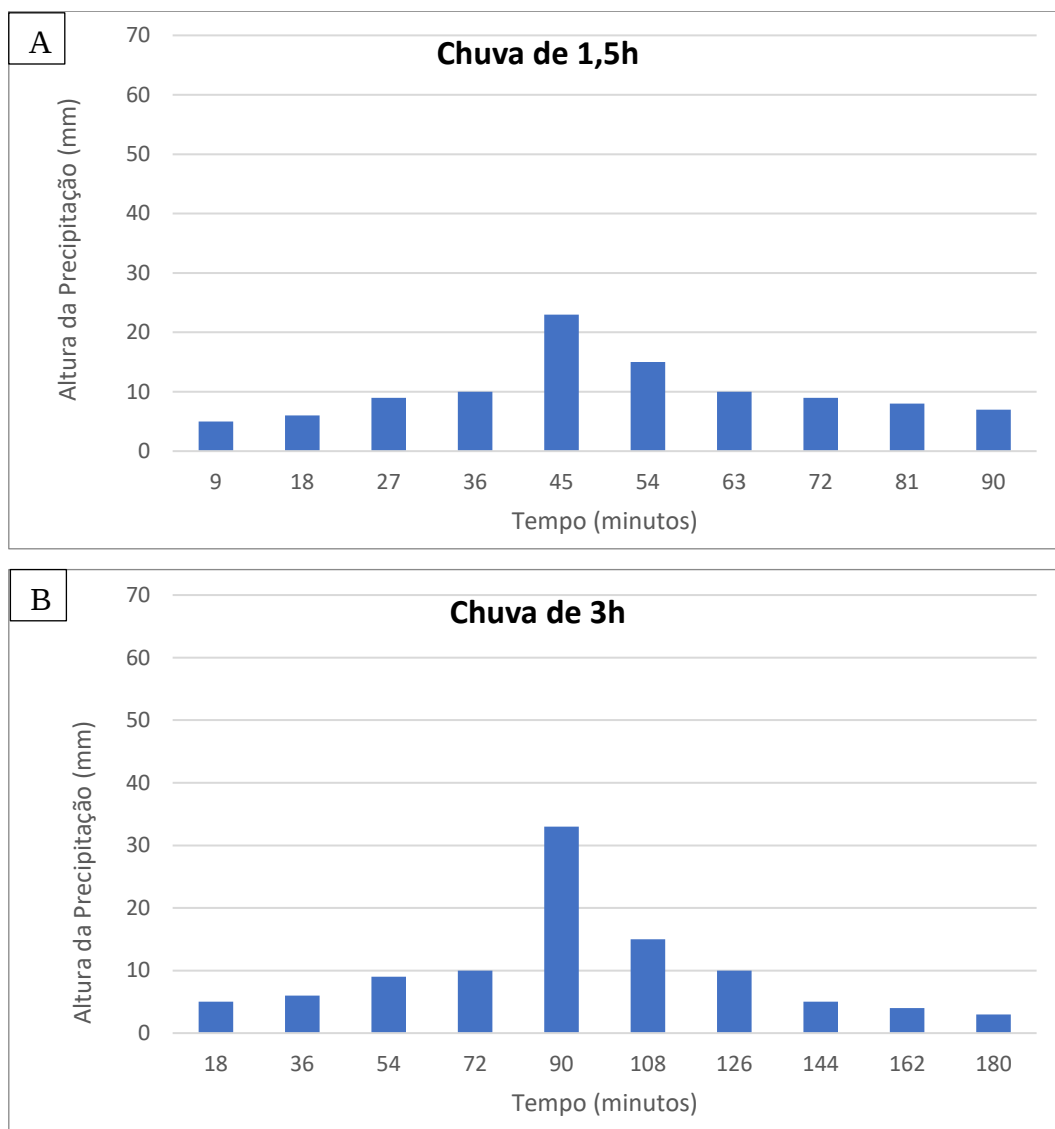
Tabela 4 – Comparação do volume precipitado no município de Belém (monitorado e calculado).

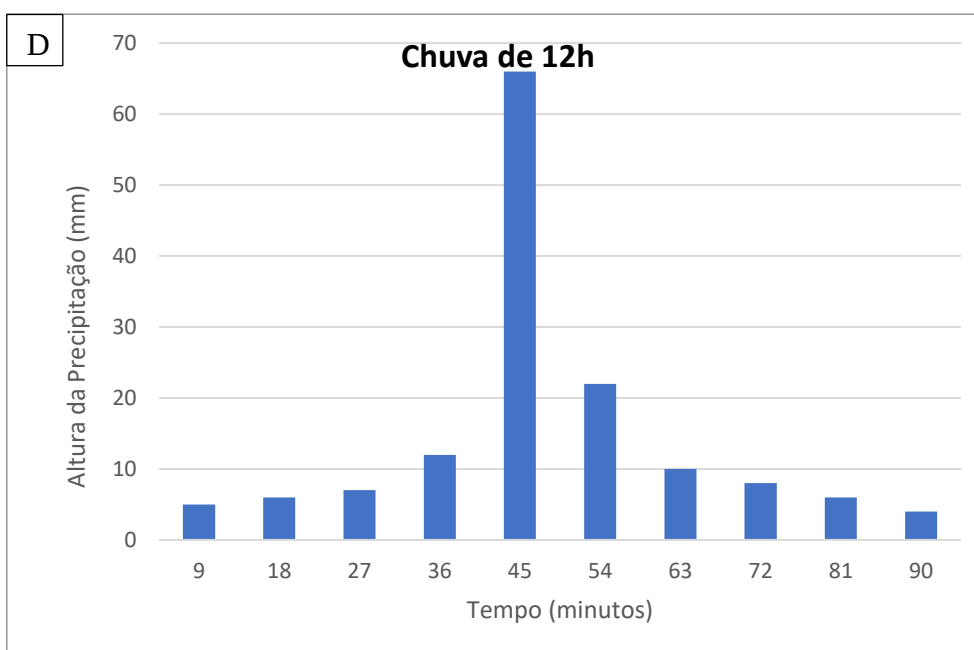
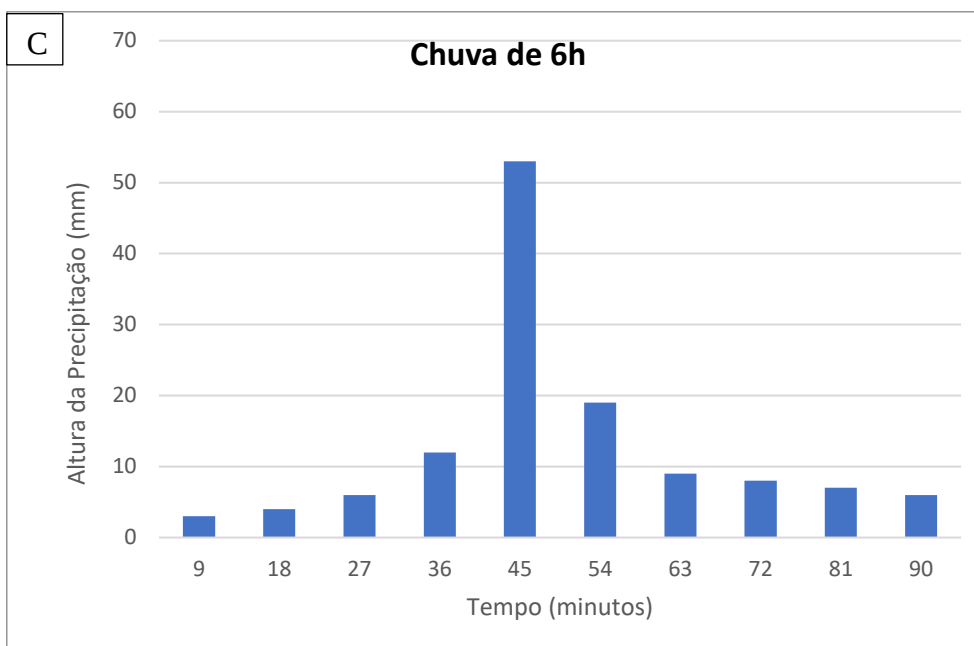
<i>Duração (h)</i>	<i>Precipitação Acumulada (mm)</i>	
	Monitorada (Leme Engenharia)	Calculada (IDF)
1	62,00	61,70
2	72,00	78,72
3	77,00	89,66
6	98,60	110,60
12	123,20	135,18

Fonte: Leme Engenharia (2011).

Os valores observados e calculados apresentaram boa correlação (0,98), apesar de somente 5 pontos o monitoramento da Leme Engenharia horário justifica a utilização dos valores calculados como referência ao representarem eventos mais severos. Para retratar o comportamento dos eventos chuvosos no município, foi gerado os hietogramas das precipitações pluviométricas de projeto de Belém, mostrado nos Gráficos a seguir.

Figura 15 – Hietogramas de precipitação pluviométrica de 1,5h (a), 3h (b), 6h (c) e 12h (d) no município de Belém (TR-25).





5.1.1.2 Maré

No Porto de Belém foi estabelecida a referência de nível (RN) da Marinha do Brasil no município, utilizada como orientação para diversos monitoramentos de níveis de maré da baía do Guajará, tendo quatro momentos registrados oficialmente, entre 1955 e 1987. O mais antigo monitoramento foi de 1948 a 1950; o segundo ocorreu entre os anos 1955 e 1956, sendo utilizado até os dias atuais para o desenvolvimento da estimativa da Tábua de Maré, pelo método

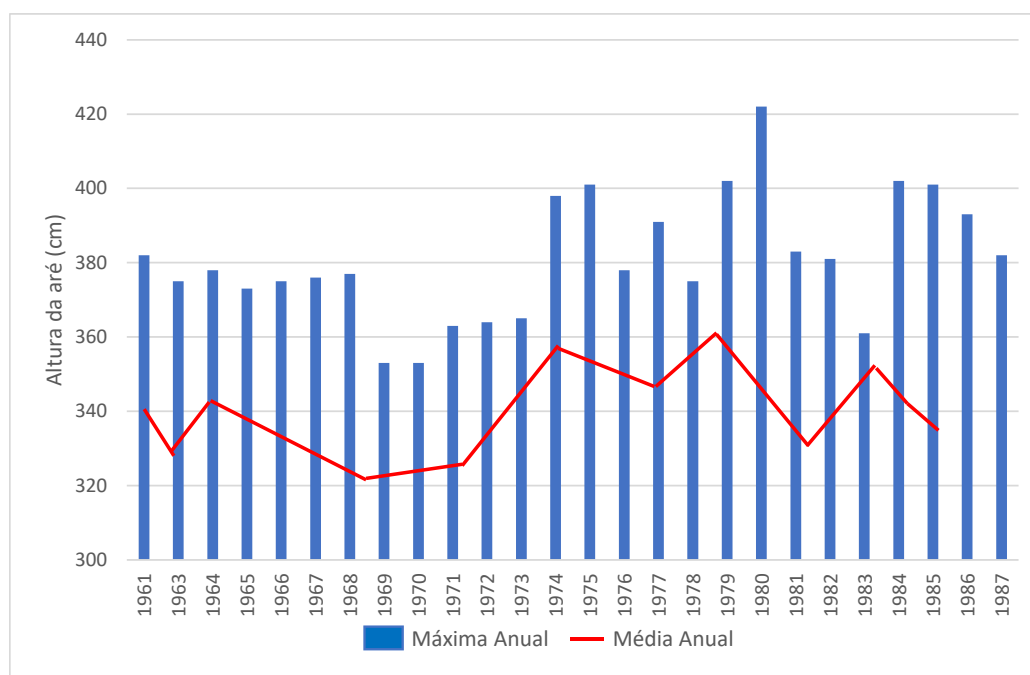
harmônico, apresentado anualmente pela Marinha do Brasil.

O terceiro registro foi entre 1961 e 1962; por fim, o maior período registrado sequencialmente ocorreu de 1963 a 1987, intervalo em que foram encontradas as maiores alturas de maré. Ressalta-se que após 1987 não foi mais realizado registros de nível de maré, ficando restrita a utilização dos dados supracitados.

O período de 1962 a 1963 apresentou valores destoantes de toda a série histórica de maré, com altura máxima chegando a 1,37 m. Esse valor foi muito baixo em comparação aos demais anos.

Considerando os outros dados, o comportamento da maré máxima da baía do Guajará não apresentou grande variação (0,70 m) ao longo dos 26 anos monitorados, passando de 3,54 m (1968 e 1969) até 4,24 m (1980), conforme pode ser observado na figura 16.

Figura 16 – Gráfico das Alturas máximas e médias anuais das marés registradas no Porto de Belém (1961-1987).



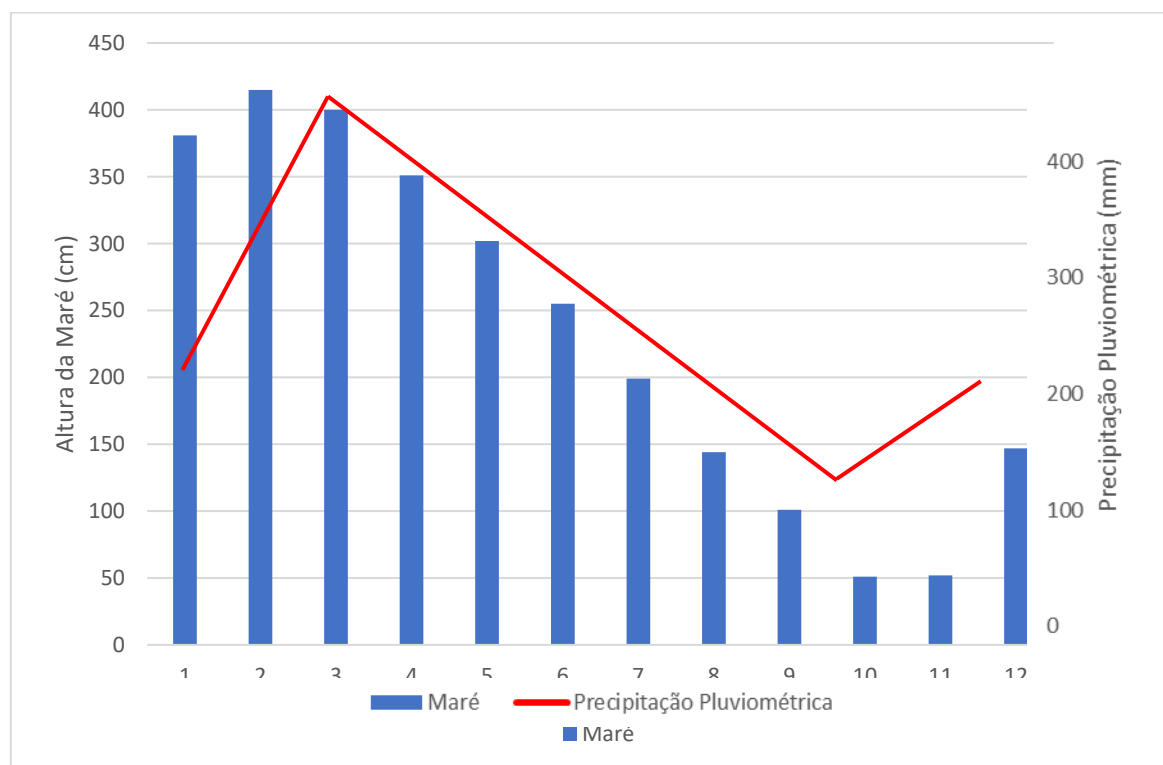
Fonte: Marinha do Brasil (2018).

A relação entre os valores anuais médio e máximo teve comportamento semelhante, sendo a maré máxima superior a média de 1,07 a 1,17 vezes. A amplitude entre os valores máximos de maré foi de 0,70 m, tendo sido registrado o menor valor (3,54 m) em 1968 e o maior

valor (4,24 m) em 1980. Mesmo não apresentando grande amplitude, é possível identificar que as alturas máximas de maré não apresentam tendência uniforme para a sua ocorrência, o que dificulta as previsões anuais de altura máxima e a determinação do tempo de recorrência.

Enquanto a avaliação anual não proporciona bons parâmetros para prever alturas máximas de maré, a sazonalidade mensal, que apresenta grande relação com fatores pluviométricos, permite melhor indicação do período em que ocorrem as maiores elevações de maré, conforme pode ser observado na figura 17.

Figura 17 – Gráfico das médias máximas mensais de Maré e de Precipitação Pluviométrica do município de Belém.



Fonte: Marinha do Brasil e INMET.

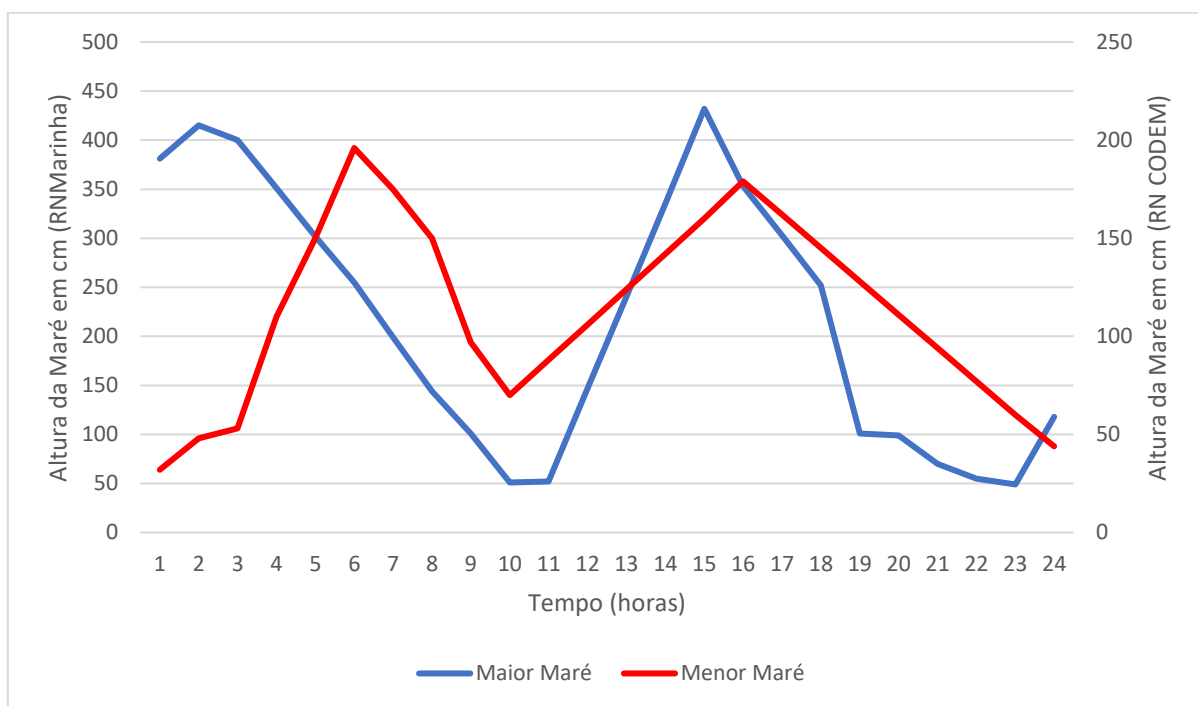
Nos meses em que ocorre o maior volume de precipitação pluviométrica (Janeiro, Fevereiro, Março e Abril) também são observados as maiores alturas de maré. Segundo Pegado et al. (2014), principalmente no mês de março, a combinação desses fatores favorece a ocorrência de inundações, e Tavares (2008) ainda complementa que, em Belém, as oscilações máximas de maré (maré de sizígia) desse período são intensificadas por efeitos astronômicos (lua nova e lua

cheia).

O comportamento hidrodinâmico diário das águas da baía do Guajará é influenciado por dois fatores, os ambientes fluviais ao sul (contribuições do rio Guamá e rio Acará) e as marés oceânicas ao norte, tornando as águas mais salobras em períodos de baixa intensidade pluviométrica. Na baía do Guajará, a influência oceânica gera comportamento de maré semi-diurna, formando duas preamar e baixa-mar diariamente, contudo, é maior a dominância fluvial, fazendo com que haja aumento da duração do período de vazante em relação à enchente (GREGÓRIO; MENDES, 2009).

Normalmente, as marés de sizígia da baía do Guajará alcançam níveis de 3,6 m, (SANTOS et al., 2014), entretanto, a maior altura de maré registrada nesse corpo hídrico já atingiu o valor de 4,24 m no dia 19 de fevereiro de 1980. Enquanto, o menor registro do valor da altura de pico de maré (0,98 m) em 26 de fevereiro de 1977. Na figura 18 é apresentado o comportamento oscilatório das alturas de maré monitorada na baía do Guajará.

Figura 18 – Gráfico do Comportamento horário do maior e do menor nível de maré registrado no Porto de Belém.



Fonte: Marinha do Brasil (2018).

O comportamento da maré alta demonstrou que a enchente da baía do Guajará ocorreu aproximadamente em cinco horas (das 9h às 14h), enquanto, a vazante durou cerca de oito horas. Com relação ao movimento oscilatório da menor maré, a duração de vazante e enchente foi inversa, no caso, a vazante transcorreu em cinco horas (das 5h às 10h) e a enchente durou 7h. Vale comentar que esses casos extremos de maré podem ser considerados eventos com grande tempo de recorrência, podendo a cidade de Belém sofrer periodicamente.

5.1.1.3 Divisão de Sub-bacias e Dados de Entrada

A microbacia da Tamandaré foi representada no software SWMM. Para isso, a área de contribuição do canal de macrodrenagem escolhida e implantada de 1,75 km² foi dividida em 27 sub-bacias, estabelecidas de acordo com as características topográficas e as ruas principais com galerias chegando ao canal, seguindo o trabalho realizado por Nylander (2019). Na Figura 19 é apresentada a divisão das 27 sub-bacias de drenagem da microbacia da Tamandaré.

Figura 19 – Identificação das sub-bacias da microbacia da Tamandaré.



Fonte: Nylander(2019)

Essas sub-bacias apresentam algumas características em comum, no caso, o valor do coeficiente de Manning da área permeável de 0,15 (superfície gramada) e os valores de armazenamento em depressões permeáveis e impermeáveis, de 2,54 mm e 5,08 mm, respectivamente. As outras variáveis de área, de largura equivalente, de declividade, de parcela impermeável, de coeficiente de Manning ($n_{\text{Ponderado}}$) da área impermeável e de CN apresentaram valores distintos para cada sub-bacia, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Características das sub-bacias que contribuem para o escoamento no canal da Tamandaré

<i>Sub-bacia</i>	<i>Área (há)</i>	<i>Largura Equivalente (m)</i>	<i>Ieq (%)</i>	<i>Parcela Impermeável</i>	<i>n ponderano</i>	<i>Cneq*</i>
					<i>Impermeável</i>	
1	16,87	205,36	2,03	0,121	89,05	67,60
2	16,66	175,31	1,80	0,121	93,92	68,08
3	8,47	100,09	1,02	0,120	95,79	68,40
4	5,13	70,43	0,97	0,121	92,83	67,56
5	5,66	77,73	1,03	0,121	90,46	67,00
6	5,09	67,32	0,88	0,121	94,98	68,09
7	3,54	67,40	1,55	0,121	94,73	67,88
8	2,84	49,40	1,02	0,121	94,73	68,05
9	10,18	112,74	0,63	0,121	92,32	67,81
10	8,27	94,69	0,56	0,121	92,73	68,05
11	3,86	47,28	0,55	0,121	94,82	67,81
12	9,53	108,07	0,73	0,121	93,32	68,05
13	3,42	64,94	0,96	0,121	92,93	67,81
14	1,04	46,86	1,19	0,124	63,26	62,43
15	0,48	30,94	0,45	0,122	63,82	62,52
16	28,89	372,32	2,03	0,121	92,84	68,15
17	4,42	111,60	1,35	0,120	94,93	68,42
18	5,71	84,23	1,77	0,121	87,53	66,50
19	3,08	74,35	0,71	0,121	94,66	68,12
20	3,84	67,05	0,72	0,121	95,86	68,24
21	1,99	44,87	0,57	0,122	94,34	67,82
22	2,12	41,53	0,68	0,121	93,26	67,64
23	5,63	104,98	1,51	0,121	95,62	68,20
24	6,71	126,32	1,89	0,121	94,90	68,08
25	3,68	56,30	1,31	0,121	96,28	67,98
26	7,05	96,75	1,37	0,121	96,04	68,10
27	0,49	31,84	1,03	0,121	94,75	67,72

As sub-bacias apresentaram grande variação de área de 28,89 há até 0,48 há. É importante destacar que as duas áreas localizadas a montante do canal (sub-bacias 1 e 16) representa $\frac{1}{4}$ da área da bacia (45,76 há), concentrando grande parcela do volume escoado desde a cabeceira da estrutura de macrodrenagem e sendo uma área de grande influência para o acúmulo de sólidos.

A declividade das sub-bacias não apresentou muita variação, com o menor valor sendo de 0,45%, e o maior valor de 2,03%, confirmando a característica de bacia plana em todas as sub-áreas, favorecendo a redução de picos de escoamento, e tendo influência direta no carreamento de sólidos. As larguras equivalentes identificadas também apresentaram variação, indo de 372,32 m a 30,94 m.

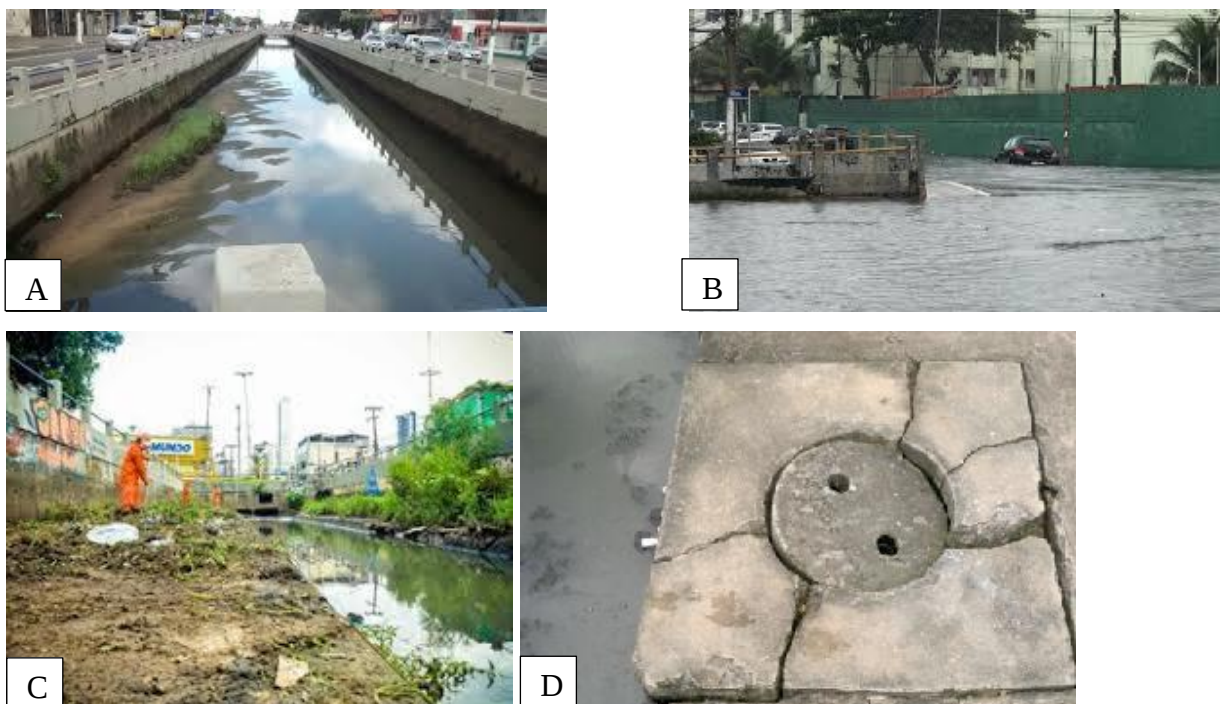
A bacia possui grande parte de sua área impermeável. Em levantamento das superfícies impermeáveis realizado por Nylander (2019) foi identificado que grande parte da bacia já apresenta terreno impermeável, com valor médio de 93,06%. O autor afirma que o impacto é identificado no grande volume escoado superficialmente até o canal de macrodrenagem, favorecendo a ocorrência de inundações e alagamentos em pontos mais baixos da microbacia.

Como a área de contribuição da Tamandaré contém parcela significativa de área impermeável, os valores do coeficiente de Manning e de CN foram altos, no presente estudo foi adotado n de 0,0122; e o CN de 65,42, valores com redução de 30%, conforme as recomendações de Martins (2015). Cada um desses valores encontrados para a bacia da 72róxima72s foram utilizadas para a determinação de volumes, servindo de base para a posterior determinação valores de porcentagens de sedimentação e de sedimentação total diária na bacia, e em seguida para a relação de gastos com limpeza da mesma.

5.1.2 Verificação das contribuições de sedimentos ao canal drenagem

Mesmo estando explícita a relevância do canal da Tamandaré para o desenvolvimento do espaço urbano, diversos problemas foram verificados nessa estrutura de drenagem urbana, entre esses estão, resíduos sólidos, afluentes sanitário, deficiências estruturais, galerias afogadas e ocorrência de inundações, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 20 – Problemas identificados no canal de drenagem da Tamandaré.



Fonte: g1.globo.com (2020)

A disposição de resíduos sólidos em áreas próximas ao canal da Tamandaré (Figura 20 -c) gera grandes prejuízos ao sistema de drenagem, favorecendo a obstrução de bocas-de-lobo, a ocorrência de alagamentos e o aumento do material sedimentado. Além disso, ocorre a chegada de grande volume de efluente no canal de drenagem, mesmo em momentos de ausência de precipitação pluviométrica (Figura 21-a), indicando a existência de inúmeras ligações de esgoto sanitário conectadas nas galerias de microdrenagem, isso acaba afetando negativamente a qualidade da água pluvial efluente encaminhada para a baía do Guajará, além de influenciar no cálculo do aporte de sedimentos na bacia.

Semelhante ao verificado na microdrenagem, o sistema de macrodrenagem (canal da Tamandaré e comporta) não apresenta boas condições operacionais, contendo inúmeras seções com disposição de sedimentos e crescimento de vegetação (Figura 20-a), e estruturais, como avarias no guarda-corpo e rachaduras ao longo do canal (Figura 20-d), o que pode vir a gerar mais sedimentos provenientes de processos erosivos. A sedimentação de partículas suspensas nos efluentes também é um grande problema do canal da Tamandaré, pois a pequena

declividade do canal favorece essa ocorrência, acentuando a necessidade de dragagem periódica. Vale comentar que o acúmulo indevido de resíduos no canal aumenta a rugosidade do fundo e diminui a altura útil, reduzindo o desempenho hidráulico nessa estrutura de macrodrenagem e reforçando a importância do estudo de porcentagens de sedimentos em fases próximas da pesquisa.

O canal da Tamandaré ainda sofre com influência da maré, que provoca afogamento de algumas galerias em períodos de cheia (Figura 20-b). Como consequência, tem-se o alagamento em pontos a montante na rede de microdrenagem, já que esses condutos apresentam baixa capacidade de escoamento.

As consequências mais prejudiciais da influência da maré no canal de drenagem da Tamandaré, juntamente com os outros fatores que dificultam o escoamento de águas pluviais no canal, os casos de inundação (Figura 20-b), são mais frequentes nos meses de maior intensidade pluviométrica, e quando há coincidência das precipitações pluviométricas de longa duração com elevação do nível de maré.

Segundo Costa et al. (2016) o volume médio anual de sedimento dragados do canal da Tamandaré foi de 2.900 m³ nos períodos de 2010 a 2013.

Figura 21 – Problemas identificados no canal da Tamandaré.



Fonte: Autor (2021).

Vale observar que o canal de drenagem da Tamandaré deveria representar uma importante estrutura para o saneamento de bairros de Belém (Batista Campos, Campina e Cidade Velha), com a finalidade de afastar as águas pluviais até a baía do Guajará. Entretanto, a falta de

iniciativas dos gestores municipais para garantir o atendimento das demandas públicas de drenagem urbana acaba por desenvolver estruturas com deficiências, que causam diversos transtornos à população residente e que transita nas proximidades da área estudada, principalmente, na ocorrência de eventos de inundação, que prejudicam a mobilidade urbana e facilitam a transmissão de doenças de veiculação hídrica.

Para Soares e Carvalho (2018), mecanismos para avaliar a magnitude das inundações e estudar medidas de intervenção que modifiquem a realidade atual do sistema de macrodrenagem da Tamandaré são de grande valia, pois a intervenção e o interesse público são necessários para a mudança de realidade do espaço urbano, melhoram a dinâmica socioambiental de partes da cidade com cotas mais baixas. Sendo interessante o emprego de instrumentos computacionais que representem o escoamento e confirmem a eficácia das medidas de intervenção.

5.1.2.1 Condições Estruturais do Sistema de Drenagem Urbana

A falta de informações de projetos e cadastros das estruturas de drenagem da área que contribui para o escoamento até o canal da Tamandaré em órgão oficial não apresentou grande valia por apresentar dispositivos implantados ainda no século XIX, tendo diversos cadastros e projetos perdidos ao longo dos anos.

De acordo com Nylander (2019), cuja pesquisa na bacia é recente e pode ser confirmado in-loco, verificou-se diversas imperfeições nas estruturas de micro e macrodrenagem da bacia, o que ocorre por problemas de manutenção e limpeza, resultando em tampas deterioradas e acúmulo de resíduos em grelhas das bocas-de-lobo, além da contribuição de esgoto sanitário, conforme pode ser verificado nas fotografias 22 e 23 abaixo.

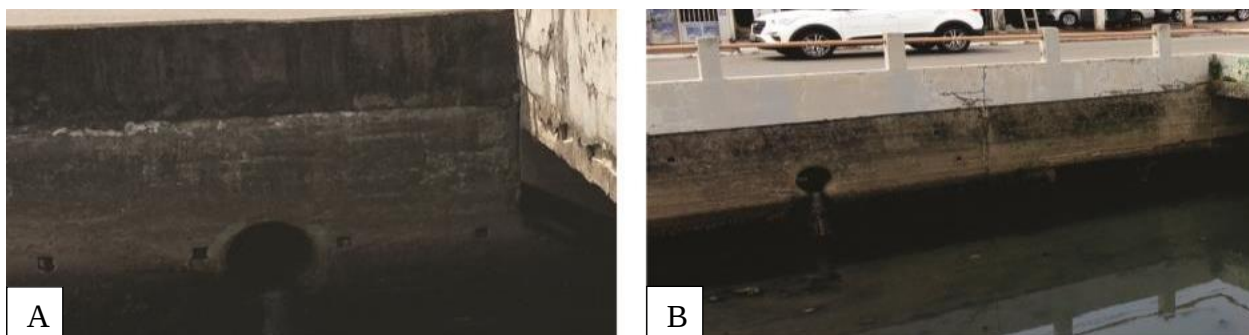
Figuras 22 e 23 – Estruturas de microdrenagem de áreas próximas ao canal da Tamandaré.



Fonte: Autor (2021)

Também não foram obtidas informações das galerias de drenagem, dificultando o estabelecimento do encaminhamento desses condutos. Desse modo, foram utilizados os dados de Nylander (2019) que contabilizou in loco as galerias com trecho final no canal, esse autor identificou 71 galerias, com diâmetros variando de 300 mm a 1200 mm. As principais galerias da área de contribuição da Tamandaré seguem o encaminhamento do sistema viário, recebendo contribuições de pontos à montante. Na Figura 24 são apresentadas 4 das 71 galerias que chegam ao canal de macrodrenagem.

Figura 24 – Galerias que chegam ao canal da Tamandaré.



Fonte: Nylander (2019)

Um importante parâmetro de acúmulo de resíduos, especialmente de sólidos grosseiros

e de grande dimensão ou volume, é o sistema de comportas, especialmente quando situado a jusante como no caso do canal da área de estudo. O sistema de comportas na jusante do canal da Tamandaré é formado por cinco células com gradeamento e comporta de mesmas dimensões. As estruturas de gradeamento foram construídas em aço com angulação de 90°, a área do gradeamento apresentou largura de 1,90 m e altura de 2,8 m, com 18 barras (espessura 11 mm) espaçadas a cada 10 cm e posicionadas antes das comportas para impedir que resíduos grosseiros sejam carregados até essas estruturas, com limpeza manual ocorrendo diariamente e esse serviço é incluso nos dados da prefeitura como limpeza geral do canal.

As comportas da Tamandaré apresentam mecanismo de acionamento automático, esses dispositivos utilizam a pressão hidrostática gerada na elevação da maré para definir o fechamento das comportas, isto é, quando a pressão exercida pela maré excede a pressão interna do canal (LIMA, 2017). Todavia, anualmente, a operação dessas comportas apresenta falha no acionamento, permitindo a entrada da maré e, por consequência, a ocorrência de inundações de vias próximas ao canal e influenciando na dinâmica da dispersão dos resíduos sólidos e em seu movimento

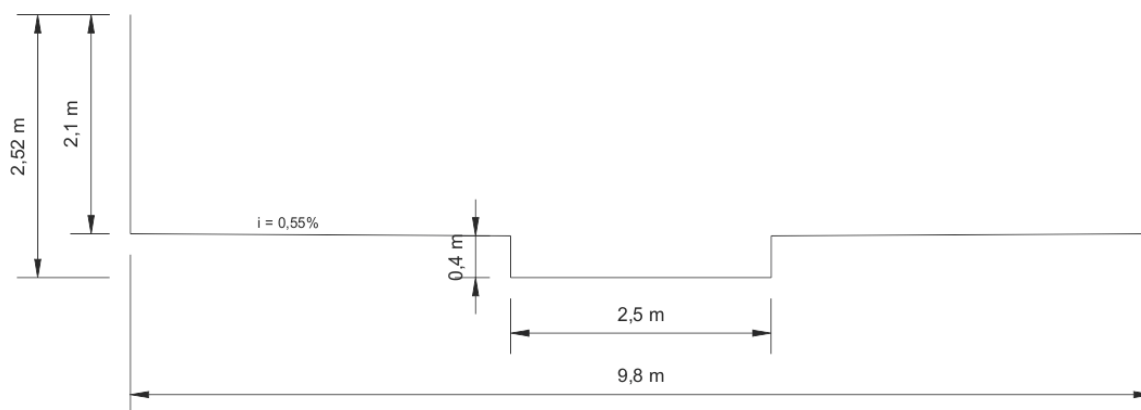
O canal da Tamandaré possui extensão de 1,15 km, sendo margeada pela via de mesmo nome, Avenida Almirante Tamandaré. O traçado da malha urbana dessa área faz com 12 vias de acesso chegando ao canal. Desse total, 7 vias (Travessa Padre Eutíquio, Travessa São Francisco, Avenida Dezesesseis de Novembro, Rua Ângelo Custódio, Travessa de Breves, Rua Doutor Assis e Travessa São Pedro) cruzam essa estrutura de drenagem e 5 vias (Rua Doutor Rodrigues Santos, Travessa Monte Alegre, Travessa Carlos Carvalho, Travessa Gurupá e Rua São Boa Ventura) finalizam seu trecho ao chegar no canal.

A intervenção pública mais significativa no canal da Tamandaré teve seu início em meados de 1964, foi um processo em toda região, iniciando pelo bairro atualmente denominado Batista Campos. O processo de adensamento foi registrado por meados da década de 60 e intensificado a partir de 1967, ano em que se concluíram os trabalhos de construção do canal do Tamandaré.

A obra do canal da Tamandaré foi realizada em 4 anos, e viria a ser uma obra de drenagem notável, incluindo um sistema de galerias de águas pluviais, 5 pontes, baterias de comportas automáticas, avenidas marginais ao canal com mais de 1 km de extensão e a estrutura do canal recebeu revestimento em concreto, nas laterais e no fundo, e guarda-corpo misto em

alvenaria e tubo metálico (Madaleno, 2002, p. 89-90). Contudo, é importante ressaltar que o fundo do canal é irregular, por apresenta desnível para garantir o escoamento de afluentes da montante, sem diminuir a área molhada da seção projetada para o escoamento de água pluvial, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Dimensões da seção transversal do trecho de montante (Seção 1) do canal da Tamandaré.



Fonte: Nylander (2019)

O canal da Tamandaré apresenta largura média de 10 m e profundidade variada ao longo de seu comprimento, devido à alterações nos valores de cota do terreno. Para o melhor detalhamento das dimensões do canal da Tamandaré, essa estrutura de macrodrenagem foi dividida em 10 seções, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Seccionamento dos trechos do canal da Tamandaré.



Fonte: Nylander (2019)

É importante comentar que as pontes diminuem a altura útil do canal, contribuindo para o acúmulo de resíduos e podendo causar efeitos de remanso. Entretanto, é a transição da Seção 1 para a Seção 2 do canal que apresenta a redução mais significativa da sua seção transversal, passando por um “estrangulamento” e saindo de um conduto aberto o canal passa a operar em conduto fechado. É possível inferir que essa seção não atende ao projetado, pois gera grandes impactos negativos ao escoamento a montante e ao acúmulo de resíduos.

A declividade do fundo do canal da Tamandaré não é acentuada, apresentando pequeno desnível de montante para jusante, correspondendo à diferença de 56 cm entre a cabeceira até o exutório do canal. Isso gera escoamento em baixas velocidades e que favorece a elevação da lâmina líquida e a sedimentação de partículas sólidas. Na Tabela 6 são apresentados os valores de cota e de dimensões por seção do canal levantadas in loco por Nylander (2019).

Tabela 6 – Dimensões do canal da Tamandaré.

<i>Seção</i>	<i>Ponto</i>	<i>Cota¹</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Largura (m)</i>	<i>Comprimento (m)</i>
S1	Montante	1,30	2,10	9,80	55,40
	Jusante	1,28	2,05	9,80	
S2	Montante	1,28	0,60	4,80	111,53
	Jusante	1,20	0,70	4,85	
S3	Montante	1,20	2,20	9,80	91,10
	Jusante	1,13	2,25	9,85	
Ponte 1	Montante	1,13	1,70	9,85	14,03
	Jusante	1,13	1,70	10,00	
S4	Montante	1,13	2,25	10,00	148,52
	Jusante	1,08	2,30	10,00	
Ponte 2	Montante	1,08	1,75	10,00	16,61
	Jusante	1,08	1,75	10,00	
S5	Montante	1,08	2,30	10,00	10,93
	Jusante	1,03	2,30	10,00	
Ponte 3	Montante	1,03	1,85	10,00	15,96
	Jusante	1,03	1,85	10,00	
S6	Montante	1,03	2,30	10,00	95,11
	Jusante	0,95	2,35	10,00	
Ponte 4	Montante	0,95	1,95	10,00	1,50
	Jusante	0,95	1,98	10,00	
S7	Montante	0,95	2,35	10,00	167,86
	Jusante	0,92	2,40	10,50	
Ponte 5	Montante	0,92	2,10	10,50	1,50
	Jusante	0,92	2,10	10,50	
S8	Montante	0,92	2,40	10,50	153,01
	Jusante	0,91	2,30	10,70	
Ponte 6	Montante	0,91	1,90	10,70	14,82
	Jusante	0,91	1,95	10,70	
S9	Montante	0,91	2,30	10,70	82,02
	Jusante	0,86	2,67	10,00	
Ponte 7	Montante	0,86	2,30	10,00	15,33
	Jusante	0,86	2,30	10,10	
S10	Montante	0,78	2,75	10,10	50,92
	Jusante	0,64	2,80	9,90	
Total					1150,05

*Esse valor de cota não considerou a profundidade da valeta central.

A grande variação de valores de profundidade (0,6 m até 2,80 m) é explicada pelas diferentes seções que compõem o canal, foi observada a drástica redução na Seção 2 (estrangulamento), intervalo no qual o canal passa a ser conduto fechado, reduzindo a altura máxima da estrutura de 2,05 m para 0,6 m. Além disso, as pontes também reduzem a profundidade, diminuindo a área transversal de escoamento do canal. Essas situações impactam na capacidade hidráulica do canal, tendo implicações diretas no carreamento e sedimentação de resíduos e podendo favorecer a ocorrência de inundações em situações de alta intensidade

pluviométrica.

Com relação à largura do canal, foi observada pequena variação, de 9,75 m a 10,70 m (intervalo de 0,95 m), quando excetuada a Seção 2. Esta seção também apresenta redução na dimensão de largura, passando de 9,75 m, da seção anterior, para 4,80 m, confirmando que diversos problemas de elevação do nível de água à montante da Seção 2 podem ocorrer.

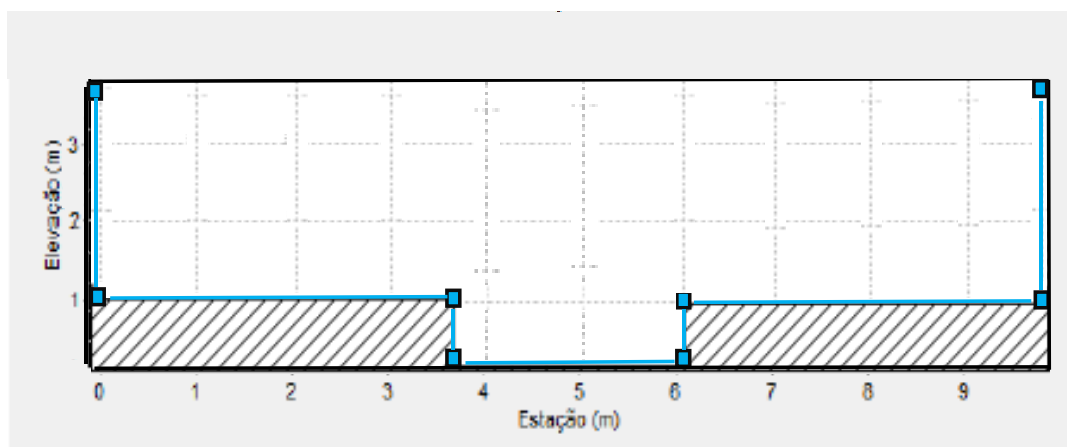
O levantamento dos valores de cota do canal foi baseado na RN da CODEM, demonstrando que essa estrutura de drenagem está sujeita a ser afetada pelo nível de água do corpo receptor, havendo entrada de maré mesmo na situação de menor pico registrado (0,98 m).

5.1.3 Simulação Hidrodinâmica e Avaliação do Atual Desempenho Hidráulico do Canal

A modelagem hidrodinâmica (SWMM) do sistema de macrodrenagem da bacia da Tamandaré foi precedida por um levantamento dos aspectos das sub-bacias, juntamente, com os dados do canal de drenagem e dos fatores hidrológicos.

Nessa primeira modelagem foram identificados os níveis de água em vias próximas que recebem a parcela de inundação e o nível de água no canal. Na Figura 27 é apresentada a seção transversal do canal a montante.

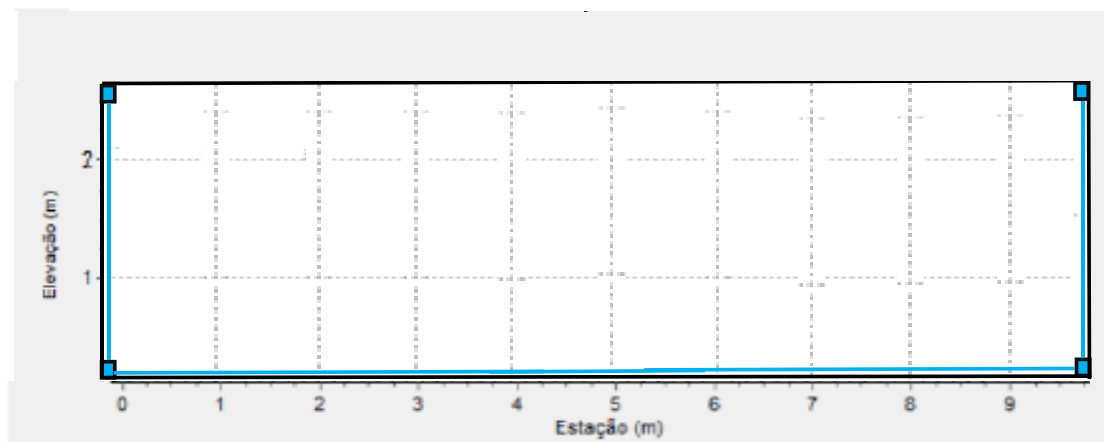
Figura 27 – Seção transversal de montante (Seção 1) do canal da Tamandaré no SWMM 5.0.



É importante destacar que a altura da valeta central é de 0,40 m (Seção 1), sendo reduzida ao longo da extensão canal até alcançar o mesmo nível das bordas, que ocorre na última seção (Seção 10). Essa peculiaridade do canal foi acrescentada ao modelo para o

desenvolvimento das simulações hidrodinâmicas. Na Figura 28 é apresentado as dimensões da seção de jusante do canal da Tamandaré.

Figura 28 – Seção transversal de jusante (Seção 10) do canal no SWMM 5.0.

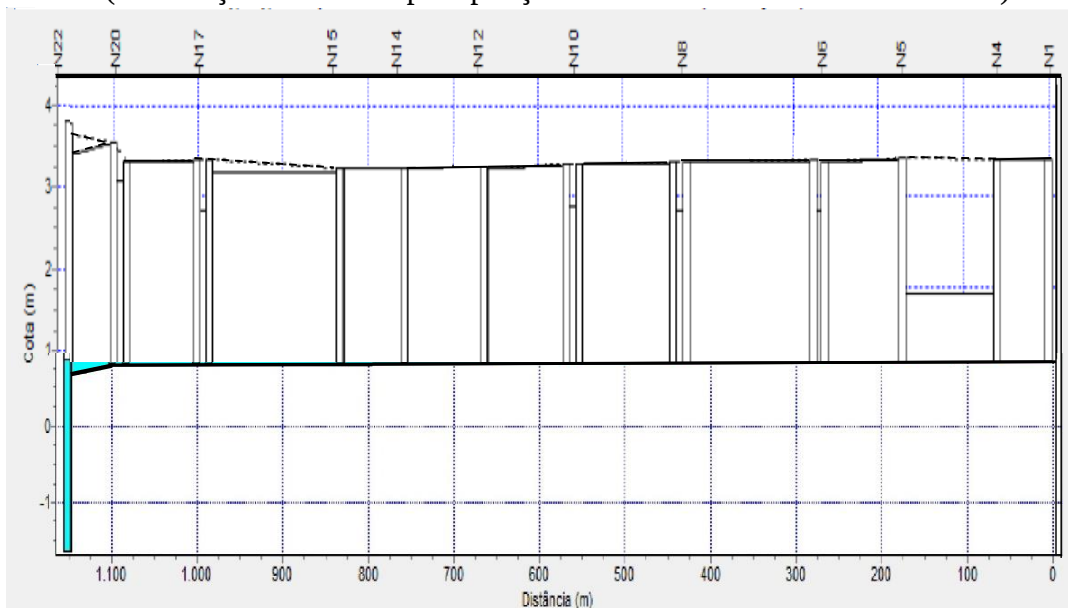


Os valores incorporados no SWMM permitiram avaliar o comportamento hidrodinâmico no canal de drenagem na Tamandaré, o acúmulo de resíduos e o consequente impacto de inundação na área urbana, inicialmente, foram considerados dois cenários distintos, no caso, sem precipitação pluviométrica e com maré baixa e combinação da precipitações pluviométricas com maré baixa, a maré alta foi desconsiderada por motivos supracitados, sendo importante destacar que em todas as simulações com maré alta de trabalhos anteriores foram constatadas inundações que não contribuem para o trabalho que objetiva, entre outros, saber a percentagem de sedimentos capaz de causar inundações e outras implicações hidrológicas.

Vale destacar que foi identificado grande efeito de remanso em todas as simulações, gerado pela diminuição da área transversal na Seção 2. Nesse trecho do canal passa uma importante via (Travessa São Pedro) sobre o canal, que auxilia na mobilidade urbana nessa área de Belém. Entretanto, do ponto de vista das condições de drenagem urbana, foi identificado que essa via causa grande impacto negativo para o sistema de escoamento de águas pluviais, reduzindo momentaneamente a capacidade hidráulica do canal e aumentando o nível de água à montante, além de causar diversos impactos quanto ao acúmulo do sólidos de sedimentos que também é alvo desta pesquisa.

Na Figura 29 é possível identificar o nível de água (NA) do canal no instante de operação ótimo, isto é, sem o efeito da maré, sem precipitação pluviométrica e sem sedimentos depositados no fundo do canal, sendo a taxa de sedimentação, portanto, nula (0%).

Figura 29 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré no instante de operação ótimo (Simulação ótima sem precipitação e sem a ocorrência de sedimentos).



A simulação sem sólidos e sem precipitação demonstra que o nível de água no interior do canal não é significativo durante ocorrência de tal evento, sendo comportado na calha central os casos de inundação e sem a sedimentação acompanhada, por conseguinte da limpeza adequada do canal, podem ser agravados na coincidência com eventos de precipitação pluviométrica. As simulações envolveram apenas os eventos de maré baixa, portanto, a menor cota de maré registrada no porto de Belém, para identificar o nível de água que atinge as áreas próximas do canal e sem eventos de precipitação pluviométrica, condição ótima de escoamento.

Para essa avaliação, nesta pesquisa foram relacionados a maré baixa, as condições ótimas de escoamento durante eventos de precipitação pluviométrica nula, sendo posicionados para que ocorressem no mesmo instante, gerando a melhor situação de escoamento do sistema de macrodrenagem, para posterior comparação com as fases seguintes que terão situações de cenários de sedimentação de sólidos.

5.2 Cenários de sedimentação de sólidos

As simulações desenvolvidas confirmaram que o acúmulo de sólidos sedimentáveis é um fator determinante para a ocorrência de inundações. A falta de controle operacional e de manutenção torna, diversas vezes, a situação crítica, contribuindo mais ainda para possível ocorrência de alagamentos no local. Assim, foram estabelecidos cenários percentuais de sedimentação de sólidos de 10, 20 e 30 % respectivamente, e se mesmo com o seu volume reduzido pela sedimentação, o canal é capaz de realizar a contenção dos eventos de inundação simulados na etapa anterior.

O intuito da proposta é acompanhar o impacto do acúmulo de resíduos no espaço urbano da área de estudo. Além de avaliar se o acúmulo de sedimentos é um fator preponderante para ocorrência de eventos de inundação, e, a partir de que ponto de acúmulo de sedimentos a situação torna-se passível de manutenção na estrutura de drenagem. Portanto, na pesquisa foi considerado o mesmo sistema do canal sem o acúmulo de sedimentos e seu comportamento, e cenários de sedimentação para determinação posterior dos intervalos de limpeza adequados para pleno funcionalidade do canal do ponto de vista hidráulico e econômico.

Em relação a comporta, de acordo com Nylander (2019), em momento de enchente, a comporta deve ser fechar quando o nível da maré atingir a cota de 0,13 m, o que resulta em diferença de 0,51 m até a soleira do canal (cota 0,64 m), o que permite concluir que o canal com a comporta fechada não deve ter mais do que 20 % do seu leito ocupado com sólidos sedimentáveis ou 0,13 m para evitar os alagamentos. Outro fator considerado em relação a comporta e ao controle operacional foi o nível máximo para abertura, mantendo o estabelecido que a comporta deve permitir passagem quando a lâmina de água na jusante do canal atingir a cota 2,94 m, valor 4 cm abaixo da menor cota de via próxima ao canal.

Além disso, sem a ocorrência de evento chuvoso, fica estabelecido que deve ser realizado manobra de abertura da comporta quando a maré, em período de vazante, estiver abaixo da cota 1,80 m e o nível de água no canal estiver acima da cota 0,80 m, permitindo o balanço das massa líquidas pluvial e fluvial sem a ocorrência de inundações e reduzindo o tempo de detenção no canal.

As simulações da coincidência dos picos de escoamento de precipitação pluviométrica e de maré com acionamento de comporta de Nylander (2019) confirmam que o canal da Tamandaré não tem capacidade para suportar a parcela do volume dos eventos das precipitações

pluviométricas analisadas com comporta fechada durante o pico de maré alta, reafirmando novamente o porquê será desconsiderado os eventos de maré alta nessa pesquisa. Quando utilizado apenas comporta em canal de drenagem, a eficiência dessa estrutura é reduzida com o aumento da duração da precipitação pluviométrica, devido ao maior volume que acaba sendo concentrado no canal sem capacidade de escoamento em momentos de cheias. Contudo, foi observada a importância dessa estrutura para impedir a entrada de maré ao gerar redução da magnitude dos eventos de inundação, o sistema de comportas na jusante do canal também acaba diminuindo o período inundado e NA máximo sobre as vias.

Entretanto, do ponto de vista do acúmulo de sedimentos, o fechamento das comportas contribui para aumentar o volume de sedimentos presente no canal e que não escoam para seu exutório, salientando que a bacia também recebe esgoto sanitário. O descarte inadequado de esgoto em galerias pluviais também é outro problema considerável, a contribuição é de até 5% em caso de sistema separador absoluto podendo chegar a 45 % em áreas sem coleta de esgoto, dependendo também das demais condições do saneamento local. (Volschan 2009), esses dados também serão considerados para posterior atribuição de intervalo de limpeza adequado a realidade da bacia.

Em todas as simulações foram eliminados os fatores externos (maré), sendo que as primeiras simulações realizadas consistiram em avaliar a capacidade de escoar os diferentes eventos chuvosos do canal da Tamandaré.

As Simulações 1 (sem precipitação pluviométrica), 2 (Precipitação Pluviométrica de 1,5 h), 3 (Precipitação Pluviométrica de 3 h), 4 (Precipitação Pluviométrica de 6 h) e 5 (Precipitação Pluviométrica de 12 h), demonstram que o canal da Tamandaré tem a capacidade de escoar eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações, sem riscos de inundação com 10 % de seu volume comprometido pela sedimentação.

Entretanto, foi verificada que na simulação 2 (com precipitação pluviométrica de 1,5 horas) a elevação é próxima do nível de inundação, ficando no limite que o canal é capaz de suportar e foi verificada uma elevação significativa no trecho à montante do canal pela brusca redução de seção entre os trechos 1 e 2, durante eventos de maior intensidade.

Na Figura 30 (simulação 1), é possível identificar o nível de água (NA) do canal no instante que atinge a menor cota. Nas figuras de 18 a 21 são dispostas as demais simulações com 10% de volume sedimentado na bacia (simulações 2 a 5).

Figura 30 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré em evento sem precipitação pluviométrica com 10% do volume do canal com sedimentos (Simulação 1).

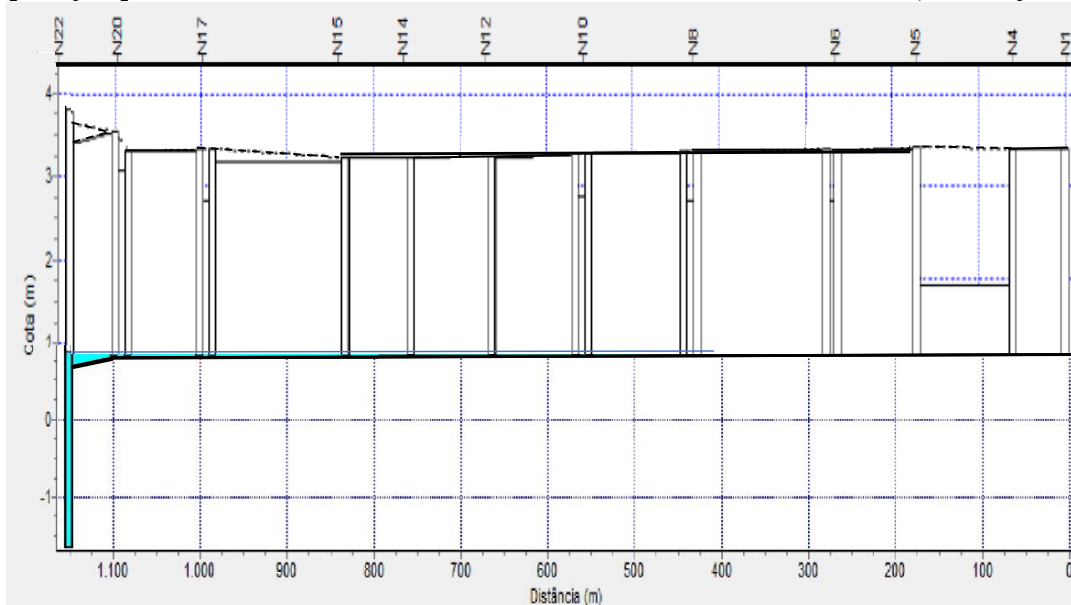


Figura 31 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 1,5 h (Simulação 2), a cota de água está próxima do leito de inundação.

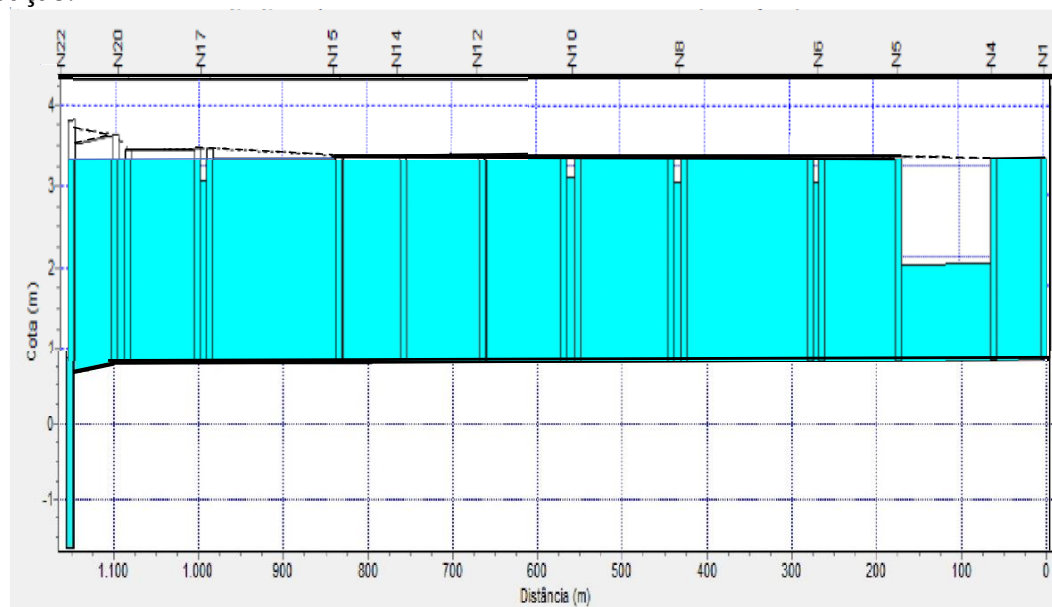


Figura 32 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 3h (Simulação 3).

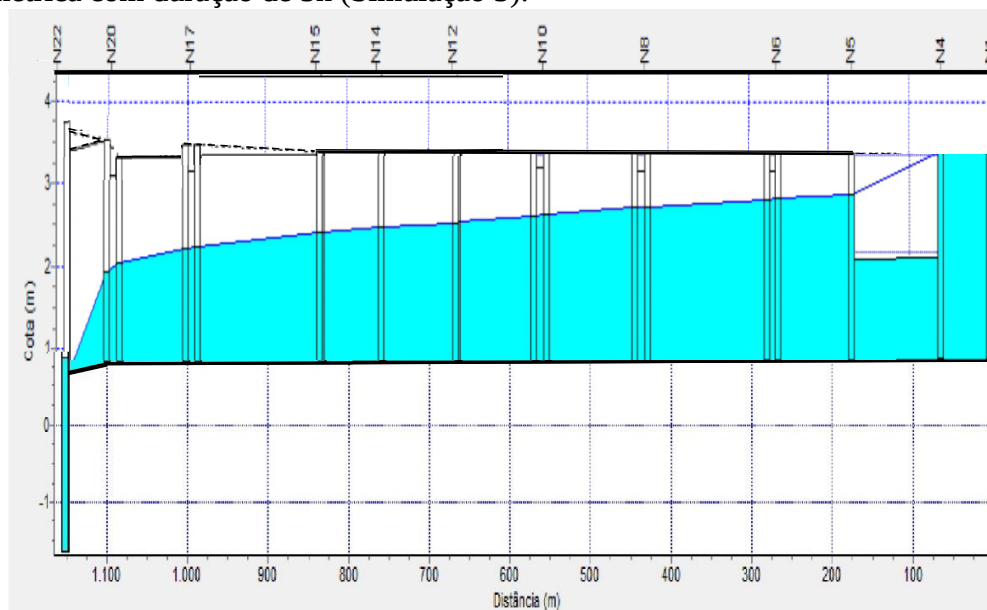


Figura 33 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 6h (Simulação 4).

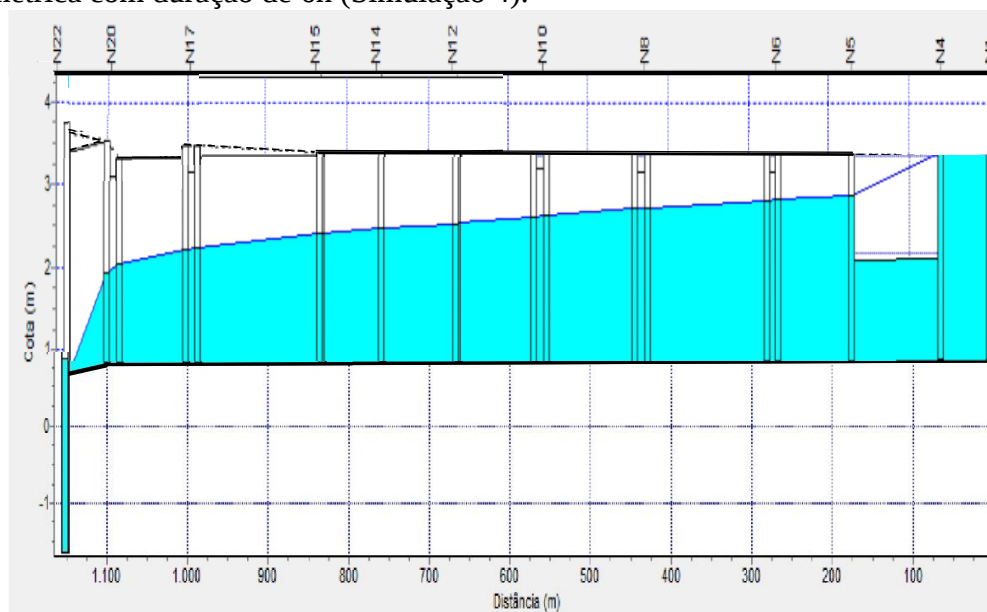
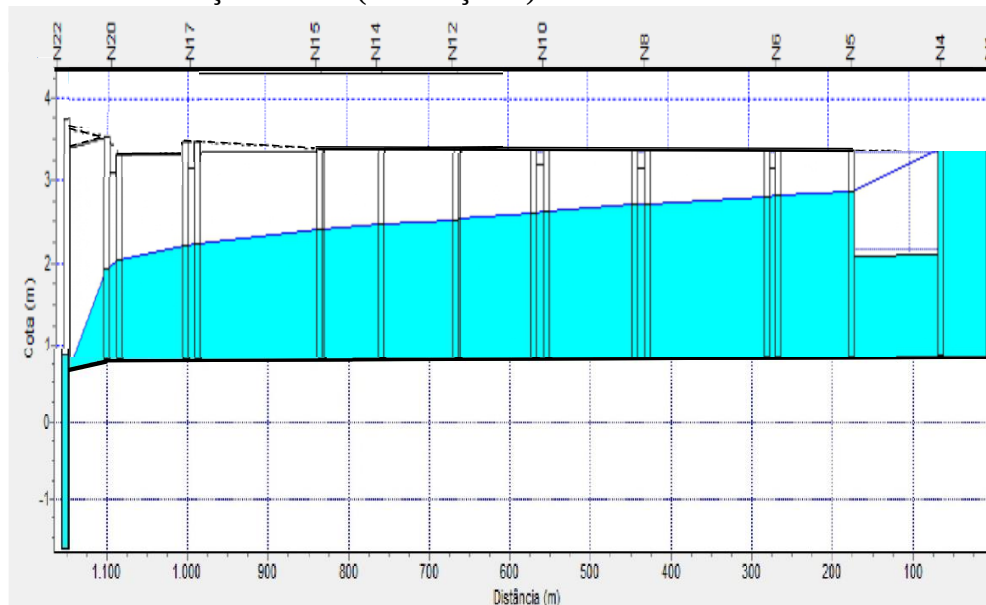


Figura 34 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 12h (Simulação 5).



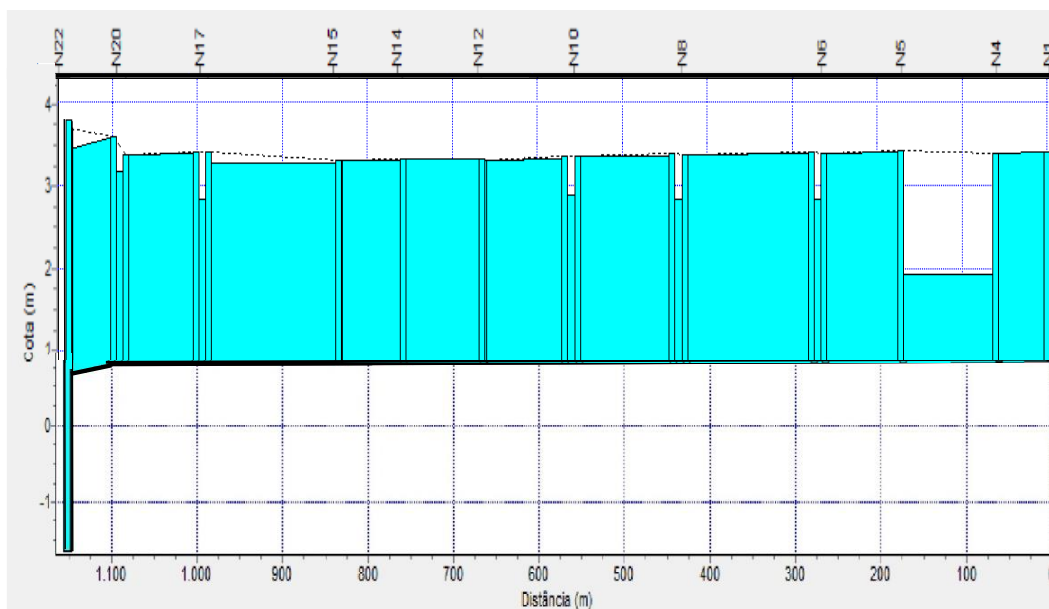
De modo geral, as simulações apresentaram que a estrutura se comporta bem apesar de 10 % de seu volume afetado pela sedimentação, não sofrendo inundações e outros impactos mais severos.

Nas simulações foi verificado que a redução da área transversal (Seção 2) no trecho de montante causa grande impacto negativo para as condições hidráulicas de escoamento, sendo agravada com o aumento da intensidade da chuva, entretanto, na chuva de 1,5 horas o nível da água sobe mais devido a um maior volume precipitado em menos tempo para escoamento. Ao longo do canal, foi observado que nível de água não ultrapassa a altura útil disponível da estrutura de drenagem, isto é, o nível de água (NA) está abaixo de 0,30 cm da altura máxima, gerando escoamento do volume pluvial sem sobrecargas. Da mesma forma, a jusante do canal apresentou boas condições de escoamento, sem apresentar elevação de água na ausência de maré.

Na Simulação 2 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade para escoar o volume precipitado pelo evento de 1,5 h, sem que ocorra inundação. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 3,03 m, após 1,05 h de precipitação pluviométrica, período em que já foi precipitado 60,12 mm. A elevação de água nessa situação não atingiu o nível máximo da altura útil do canal na Seção 1, deixando borda livre de 0,36 m.

Nas simulações de 6 a 10 o acúmulo de sedimentos na bacia foi de 20 %, na Simulação 6 (com o efeito da maré e sem precipitação pluviométrica) foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade para escoar o volume precipitado com a maré baixa, sem que ocorra inundação. A borda livre do canal alcançou a cota de 2,50. Na Figura 23 é possível identificar o nível de água (NA) do canal no instante em que atinge a menor cota (simulação 6).

Figura 35 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante eventos de precipitação pluviométrica e chuvas de 3, 6 e 12h (simulações de 7 a 9).



Nas Simulações de 7 a 9 foi verificado que o canal da Tamandaré não tem capacidade para escoar o volume precipitado em qualquer evento pluviométrico, em todos os eventos com essa taxa de sedimentação ocorreu inundação.

O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 3,06 m, após 1,09 h de precipitação pluviométrica para simulação 7 de 1,5 horas de intensidade pluviométrica, período em que já foi precipitado 61,20 mm.

A precipitação pluviométrica com duração de 3 h na simulação 8, mesmo escoando maior volume pluvial até o canal em relação a simulação 7 de 1,5 horas alcançou menor altura do nível d'água, comportamento esse semelhante a todas as simulações comparado as durações da precipitação, isso ocorre pela menor intensidade da chuva, atenuando o pico de vazão especialmente da montante. A elevação de água em todas essas situações alcançou o nível

máximo da altura útil do canal nas Seções sem a borda livre.

As Simulações de 11 a 15 seguiram a tendência das simulações de 7 a 9, foi verificado que o canal da Tamandaré não tem capacidade para escoar o volume precipitado pelos eventos de pluviosidade, sem que ocorra inundação. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 4,03 m, após 1,99 h de precipitação pluviométrica, período em que já foi precipitado 55,30 mm. As precipitações pluviométricas com duração de 12 h apresentaram comportamento semelhante ao observado nas precipitações pluviométricas da simulação anterior com 20 % do volume sedimentado, resultados até piores foram comprovados, pois, as simulações de 11 a 15 possuíram uma taxa de sedimentação de 30 % de ocupação do canal e registraram eventos de inundação na bacia.

Na Simulação 11 (sem precipitação) foi verificado que o canal da Tamandaré tem a capacidade para comportar o volume fluvial que entra na estrutura, mesmo com 30 % do canal ocupado pela sedimentação, enquanto na Simulação 12 a 15 (com pluviosidade) foi confirmado que a intensidade pluviométrica com mais de 20 % do leito ocupado por sedimentos tem capacidade para gerar eventos de inundação na microbacia da Tamandaré.

Na Simulação 12 foi verificado que após 1,66 h de precipitação pluviométrica, o canal atinge seu valor máximo de 3,39 m e alcança a soleira do canal. Na Simulação 13 foi verificado que a maior altura o canal atinge a soleira do canal da Tamandaré após 1,60 h do seu ponto de vale (nível máximo de vazante), demonstrando que, com essa precipitação ocorreu inundação, com afloramento de água pelas estruturas de microdrenagem, sem extravasamento do canal. No Mapa 6 é apresentado as vias afetadas por efeitos da inundação.

O evento de inundação gerado pela precipitação durou 3,33 h, período em que alcançou a cota de 3,39 m, formando lâmina líquida sobre as vias com altura máxima de 0,61 m.

A pior situação de inundação ocorreu durante a precipitação pluviométrica de 1,5 h, simulação 12, quando o NA alcança a cota 2,11 m, atingindo maior extensão de vias, o volume pluvial mais distribuído ocorreu durante a precipitação pluviométrica de 12 h, o que permite escoar a precipitação pluviométrica de maneira gradativa, gerando o menor impacto de inundação dos eventos de inundação e justificando que mesmo com 20% do canal com sólidos foi possível escoar pelo canal o volume que o adentrava para chuva de 12h (simulação 6).

As Simulações 13 (Precipitação pluviométrica 3 h + 30% do leito com sólidos), 14 (Precipitação pluviométrica 6 h + 30% do leito com sólidos) e 15 (Precipitação pluviométrica 12

h + 30% do leito com sólidos) demonstram que o canal da Tamandaré não tem a capacidade de escoar eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações, com riscos de inundação, se 30 % do leito do canal estiver tomado pela sedimentação. Entretanto, foi verificada elevação significativa no trecho à montante do canal pela brusca redução de seção entre os trechos 1 e 2, durante eventos de maior intensidade.

Nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38 é possível identificar os níveis de água (NA) do canal no instante em que atinge a cota com 20% de sólidos sedimentáveis sem efeito da pluviosidade, 30% de sedimentação ainda sem o efeito das chuvas e o efeito atingido na maioria das simulações de 7-9 e de 12-15 durante eventos de precipitação pluviométrica e sedimentação acima de 20%.

Figura 36 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré sem eventos de precipitação e com 20% do leito com sedimentos (simulação 6).

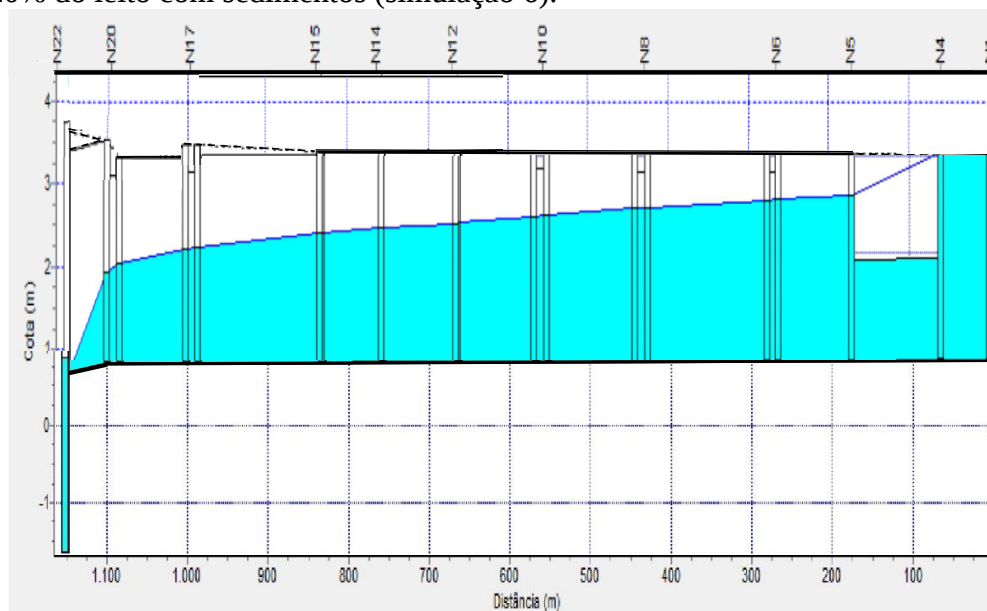


Figura 37 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré sem eventos de precipitação pluviométrica e com 30% do leito com sedimentos (simulação 11).

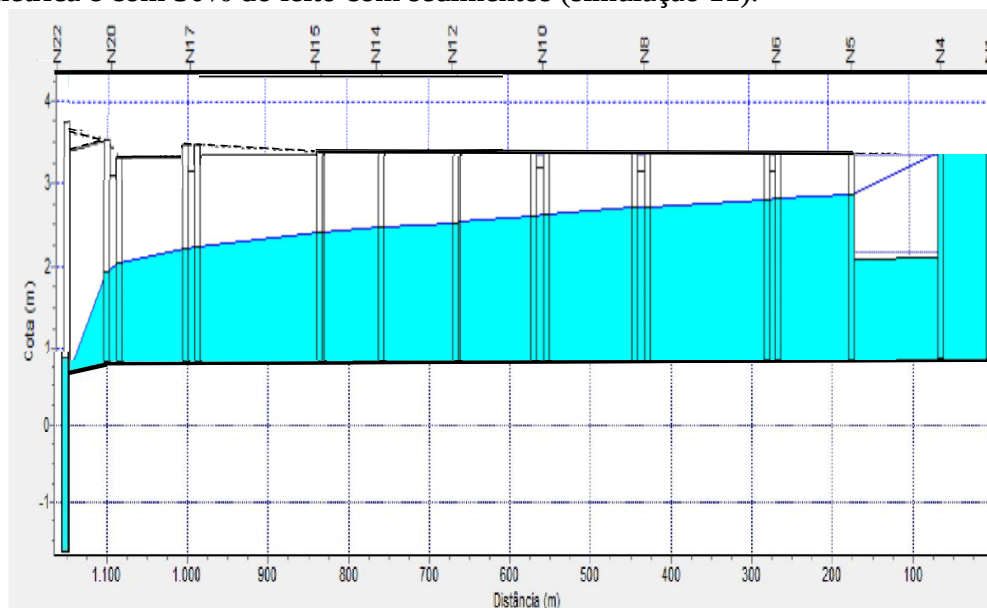
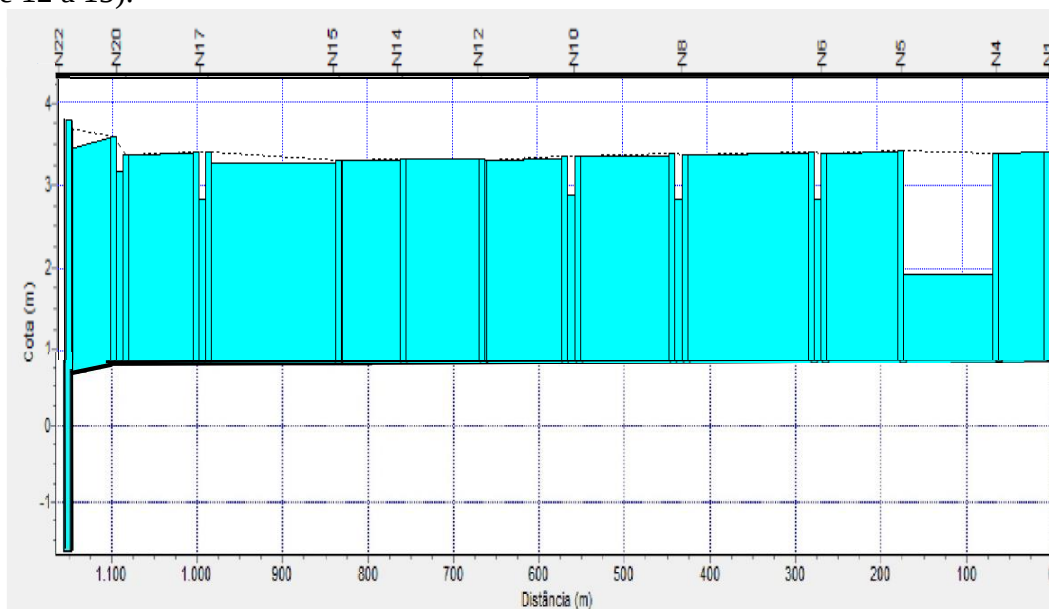


Figura 38 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré com eventos de precipitação pluviométrica e com mais de 20% do leito ocupado por sedimentos (simulações 7 a 9 e de 12 a 15).



5.3 Avaliação do comportamento hidrodinâmico com o acúmulo de sedimentos

5.3.1 Impactos hidrodinâmicos do acúmulo de sólidos sedimentáveis

As simulações desenvolvidas confirmaram que o acúmulo de sedimentos no canal de drenagem é um fator determinante para a ocorrência de inundações. Para avaliar se efeitos de inundação podem ser impedidos pelo intervalo de limpeza adotado atualmente buscou-se um comparativo com os resultados da fase anterior.

A limpeza deve impedir que o canal alcance a partir de 20% do leito do canal ocupado com sedimentos, pois, com uma chuva de 1,5 h, 3h e 6 h o canal não foi capaz de escoar as águas pluviais. Do mesmo modo, com 30% do canal comprometido com o acúmulo de resíduos, em nenhum evento de pluviosidade estudado de 1,5h, 3h, 6h e 12h foi possível o funcionamento do canal de forma adequada, isto é sem a ocorrência de inundações.

Tabela 7 – Resumo das simulações de escoamento com taxas de sedimentação.

<i>Simulação</i>	<i>Situação</i>	<i>Intensidade Pluviométrica (mm/h)</i>	<i>Cota máxima alcançada pelo nível da água</i>	<i>Evento de Inundação</i>	<i>Tempo para atingir a cota do terreno (h)</i>	<i>Período inundado (h)</i>
1	MB – SC	-	-	Não	-	-
2	C – 1,5h	-	-	Não	-	-
3	C – 3h	-	-	Não	-	-
4	C – 6h	-	-	Não	-	-
5	C – 12h	-	-	Não	-	-
6	MB – SC	-	-	Não	-	-
7	C – 1,5h	45,51	3,06	Sim	1,09	2,12
8	C – 3h	29,19	3,05	Sim	1,11	2,44
9	C – 6h	18,01	3,05	Sim	1,31	2,49
10	C – 12h	-	-	Não	-	-
11	MB – SC	-	-	Não	-	-
12	C – 1,5h	29,19	4,03	Sim	1,99	2,88
13	C – 3h	18,01	4,01	Sim	1,66	3,13
14	C – 6h	11,00	3,93	Sim	1,60	3,33
15	C – 12h	9,89	2,91	Sim	1,50	3,55

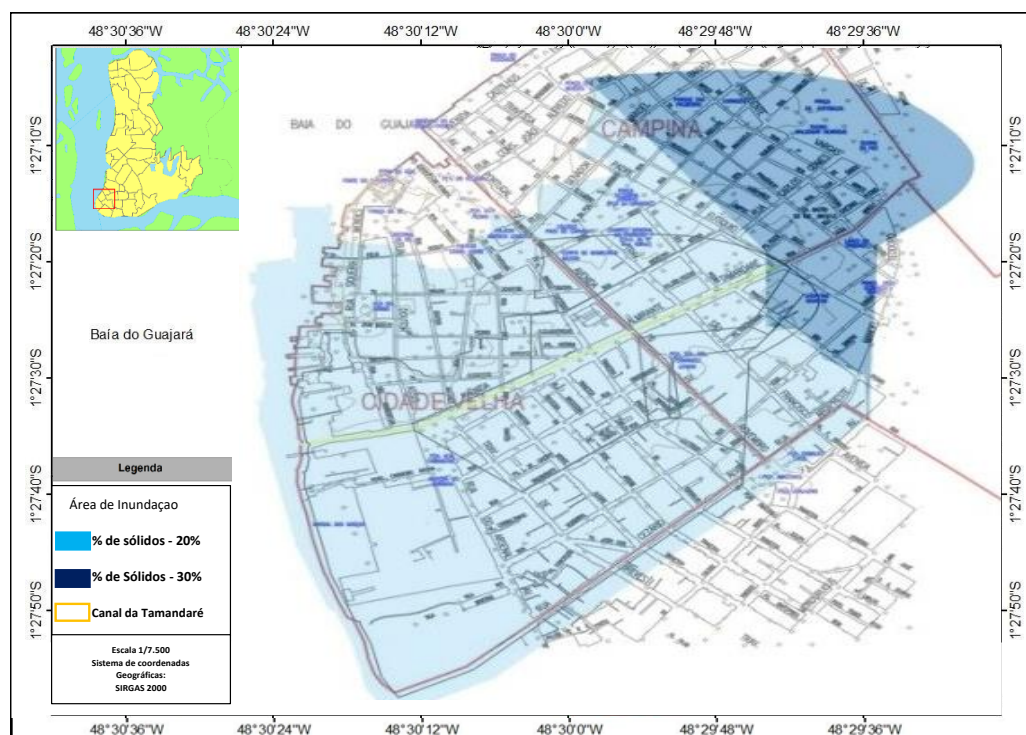
C – Chuva; Sc – Sem Chuva; MB – Maré baixa.

Vale destacar que foi identificado grande efeito de remanso em todas as simulações, gerado pela diminuição da área transversal na Seção 2. Nesse trecho do canal passa uma

importante via (Travessa São Pedro) sobre o canal, que auxilia na mobilidade urbana nessa área de Belém. Entretanto, do ponto de vista das condições de drenagem urbana e principalmente do acúmulo de sedimentos foi identificado que essa a diminuição da seção do canal nesta parte causa um grande impacto negativo para o sistema de escoamento de águas pluviais, aumentando o nível de água a montante, aumentando a sedimentação neste ponto específico e reduzindo momentaneamente a capacidade hidráulica do canal.

A pior situação de inundação ocorreu durante a precipitação pluviométrica de 6 h com 30% de sedimentos acumulados no canal, quando o NA alcança a cota 1,55 m, atingindo maior extensão de vias. Esse cenário também é verificado durante as precipitações pluviométricas de 1,5 h e 3 h no acumulado de 20% de sedimentos e também em 12h com 30% de sedimentos no leito do canal, fazendo a cota de inundação atingir níveis mais elevados. O volume pluvial mais distribuído ocorreu durante a precipitação pluviométrica de 12 h, fato que justifica o canal conseguir escoar as águas pluviais, mesmo com 20% do canal comprometido, mesmo que de maneira gradativa, sem gerar, portanto, impacto de inundação, conforme pode ser observado na figura 39.

Figura 39 – Impacto da Inundação na área de estudo.



Ainda que as precipitações pluviométricas de diferentes durações modifiquem o impacto das inundações geradas, foi observado pequena variação de NA máximo entre os eventos simulados. Isso demonstra que o acúmulo de sólidos prevalece sobre o escoamento do canal e necessita ser impedidos para a adequada condução das águas pluviais na microbacia da Tamandaré. Nesse sentido, foi estudada a quantificação das despesas unida a um intervalo de limpeza adequado para impedir as inundações no canal de drenagem provenientes do acúmulo de sólidos.

5.3.2 Quantificação das despesas operacionais de remoção dos sólidos sedimentáveis

Na elaboração das projeções econômicas foi necessário obter os valores de remoção dos resíduos sólidos provenientes dos canais urbanos de Belém, a frequência de remoção destes sólidos no local de estudo supracitado e o quantitativo de sólidos acumulados no canal. Isso foi possível com pesquisas as fontes disponibilizadas pela PMB confirmadas nos portais de transparência de gastos e licitações para tais atividades.

Dados mais atualizados das características de remoção dos resíduos sólidos na cidade de Belém não foram encontrados em literaturas acadêmicas, como artigos, trabalhos técnicos científicos. Essa escassez de trabalhos resultou em dados disponibilizados somente nos órgãos gestores como a SESAN, desde que os dados destes órgãos estivessem confirmados também no portal da transparência da prefeitura nos itens despesas detalhadas.

Por fim, para determinar a quantidade de sedimentos acumuladas, foi realizada comparação que considera o volume do canal, sendo possível assim, determinar o quantitativo de massa sedimentada para cada porcentagem atribuída através de regra de três simples, 100% da área do canal correspondente a determinado valor e as porcentagens de 10, 20 e 30% do canal com seus devidos valores baseados na diferença do volume total do curso d'água em questão.

A taxa de acúmulo foi baseada em Volshan (2009), que para o caso específico da bacia da Tamandaré é da ordem de 25% ao dia, tendo acréscimo de 12,5% para cada limpeza, pois tal procedimento acontece duas vezes ao dia. Tal valor se chegou a partir da análise que considerou os principais parâmetros de acréscimo de resíduos como: Resíduos Sólidos a) parcial (área com alta taxa de coleta, com baixa deposição irregular de resíduos e coleta seletiva), acréscimo de 10% de volume de sólidos; b) erosão: baixa (área retificada), acréscimo de 5% de resíduos e quanto a

coleta de esgoto: média (áreas com sistema combinado de coleta de esgoto), 10% de acréscimo de resíduos; totalizando 25% de acréscimo ao dia para além do volume de sedimentos que normalmente adentra a Bacia. A taxa de acúmulo e o volume de sedimentos juntamente aos resultados hidrológicos encontrados anteriormente, e a frequência ideal de limpeza do canal está disposta no quadro 2 apresentado abaixo.

Quadro 2 – Cenários de sedimentação de sólidos e custos para sua remoção.

CENÁRIOS (% DE SEDIMENTAÇÃO)	Massa sedimentada na bacia(ton/dia)	Intervalo de limpeza (Quantidade/h)	Massa removida (toneladas)	Custo mensal (R\$)
ATUAL (SESAN)	2,9	2/12 horas	8,5	116.064,46
10	27	6/4 horas	25,5	348.193,38
20	32	8/3 horas	34	464.258,76
30	47	10/2,4 horas	42,5	1.160.644,60

O cenário de referência apresentou um gasto de R\$ 116.064,46, valores que crescem com os cenários de 10% e 20% de comprometimento do canal com sólidos para R\$348.193,38 e R\$464.258,76 respectivamente; com as massas removidas de 25,5 toneladas e 34 toneladas, o que corresponde a 6 e 8 caçambas basculante carregadas, e, portanto, o intervalo de limpeza de 6 e 8 vezes ao dia, em contrapartida com um cenário de sedimentação de 30% as despesas crescem vertiginosamente alcançando um patamar acima de R\$ 1.000.000,00; os resultados evidenciam a importância da manutenção dos canais de drenagem, em especial o canal da Tamandaré, a remoção de sólidos grosseiros sedimentáveis torna-se imprescindível também para sustentabilidade econômica da PMB.

Contudo, o ideal seria a criação de um índice para analisar a sedimentação do canal através de uma ferramenta de índices operacionais, econômicos e de qualidade para auxiliar a avaliação de resultados e tomada de decisões. O registro das informações ao longo do tempo gera um grande número de dados analíticos, que precisam ser transformados em um formato

sintético e correlacional. Os resultados devem descrever e representar, de forma compreensível e significativa o estado atual e as tendências de eficiência tanto econômicas como técnicas da qualidade da prestação dos serviços de limpeza pública por parte dos prestadores. Tal ferramenta deveria ser utilizada como um instrumento gerencial para a tomada de decisões por parte do ente regulador além de dar transparência aos usuários.

Atualmente, as informações encontram-se espaçadas de modo que para se chegar ao intervalo de limpeza do canal se dá apenas a uma visita in-loco com os responsáveis pela limpeza, sendo esse o único meio para saber a frequência de limpeza atual, podendo essa informação assim como a de duas caçambas basculantes ao dia estar de mais fácil acesso em meios públicos como o portal da SESAN ou portal de transparência da prefeitura. Por conseguinte, a informação da ausência de limpeza em alguns finais de semana, principalmente em domingos e feriados também não se encontra nos portais da prefeitura, esse fato ajuda a entender o atual cenário de acúmulo de sedimentos, pois, a frequência atual de limpeza do canal realizado pela prefeitura asseguraria o não acúmulo de sedimentos, desde que fosse feito na frequência atual de forma diária, sendo esse mais um dos fatores que explica a realidade de constantes inundações na área.

Os gastos com a limpeza pública foram obtidos no website de despesas detalhadas, disponibilizado pela prefeitura de Belém, e trás somente a informação geral de limpeza na área, para extrair o valor utilizado para limpeza específica do canal de R\$116.054,46, se fez necessário, dividir o valor gasto total de limpeza da área que é de R\$580.322,30 por cinco, haja visto que das cinco máquinas de limpeza e transporte dos resíduos no local somente uma realiza a limpeza do canal da Tamandaré, é importante ressaltar também que os portais da prefeitura disponibilizam somente o valor total da área sem o detalhamento do que é utilizado e da demanda de funcionários, sendo assim, a despesa com mão de obra, mesmo a área do canal da Tamandaré demandando pelo menos um funcionário a mais responsável por acompanhar cada uma das limpezas da área, que é realizada duas vezes ao dia é igualada a despesa de outras áreas que não necessitam de funcionários a mais, fato esse que seria sanado com um maior detalhamento dos gastos por parte da prefeitura e seus órgãos gestores.

Por fim, a limpeza e manutenção de canais demonstrou ser um desafio que precisa ser enfrentado, pois é preciso atender aos mais diversos atores que têm suas vidas afetadas por inundações ao longo do canal, bem como existe a urgente necessidade de adequar essa bacia a tendência mundial de melhorar a qualidade ambiental e, principalmente, da população local e

transeuntes deste local movimentado, que poderão usufruir desse espaço importante e histórico da capital paraense e gerar maior valorização dos atores e atividades relacionadas a essa importante bacia para o município de Belém.

5.3.3 Proposição de alternativas para melhor gestão de remoção de sólidos na Microbacia da Tamandaré

Com as simulações foi possível observar que a má gestão de manutenção e ineficientes mecanismos de limpeza pública são determinantes para a ocorrência e aumento da magnitude das inundações. Por isso, a medida inicial para a mudança de realidade e melhora das condições de drenagem urbana na bacia estudada é a limpeza diária constante dos sólidos que adentrem o canal, impedindo que 20% da estrutura fique comprometida com sedimentos, pois, a partir desse valor com a infraestrutura existente não apresenta capacidade para impedir eventos de inundações e/ou enchentes.

Contudo, a limpeza da estrutura que opera atualmente na área de estudo não é suficiente para contenção e/ou atenuar eventos de inundação, não impede o extravasamento do canal de drenagem, fato confirmado pelas simulações hidrodinâmicas no SWMM. Portanto, o intervalo de limpeza adequado, desde que executado de forma diária se mostra uma solução para eventos de inundações na bacia. Nesse sentido, é fundamental também a integração do saneamento e o pleno funcionamento das demais estruturas do canal, tais como: comportas, bacias de acumulação e reservatórios enterrados, para condução do volume excedente que chega ao canal pelas precipitações pluviométricas.

Por conseguinte, é importante destacar que apenas a limpeza diária na microbacia da Tamandaré, apesar de apontar a resolução dos problemas, se realizada de maneira correta e em intervalo adequado, atualmente necessita do melhor controle operacional e de maiores gastos, pois, a falta de uma limpeza adequada tornou a sedimentação uma realidade.

Desse modo, a limpeza diária e, principalmente, em um volume adequado, realizado de forma operacional correta e contínua, é de grande importância para o controle de eventos extremos de inundação e melhora das condições de drenagem urbana da microbacia da Tamandaré, garantindo o bem-estar da população que utiliza essa parte da área central do município de Belém.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As condições das estruturas de drenagem urbana levantadas *in loco* demonstram falta manutenção nas parcelas de microdrenagem e da macrodrenagem. Na macrodrenagem foi verificada uma limpeza incipiente e sem integração com as demais estruturas de saneamento. Além disso, diversos problemas foram identificados no canal da Tamandaré, como o acúmulo de resíduos sólidos, despejo de efluente sanitário, falta de manutenção, galerias afogadas e inundações, fatores esses que favorecem o acúmulo de resíduos.

Esses problemas foram avaliados a partir de simulações realizadas no software SWMM 5.0, que demonstrou ser eficiente para modelar o acúmulo de resíduos em uma bacia urbana mediante modificações nas condições de escoamento. Para a modelagem hidrodinâmica, a microbacia da Tamandaré foi seccionada em sub-bacias, como em trabalhos anteriores. Estas sub-bacias apresentaram pouca variação de declividade e baixíssima área impermeável. A partir dos dados de entrada das sub-bacias, foi avaliado o escoamento e o acúmulo de sólidos na bacia sem precipitação pluviométrica e sem o acúmulo de resíduos, gerando uma simulação de base para posterior análise de escoamento com o comprometimento de 10%, 20% e 30% do volume total do canal com sedimentos, possibilitando a análise de mais 15 simulações hidrodinâmicas.

Os resultados dos cenários (1,2,3,4 e 5) simulados demonstraram que o canal da Tamandaré tem capacidade de escoar os volumes precipitados mesmo com 10% do seu volume comprometido. Na Simulação 6, condição de 20% de sedimentos no canal sem precipitação, foi verificado um escoamento bom. Entretanto, na modelagem de 20% com precipitações de 1,5 a 6 horas (Simulações 7,8 e 9), foi verificado que há inundação na bacia, a exceção foi a simulação com precipitação pluviométrica de 12h (simulação 10) que mesmo com 20% do canal tomado de sedimentos foi capaz de escoar a vazão, devido a precipitação desta magnitude ser mais distribuída.

Nos casos de 30% do volume do canal comprometido e com eventos de precipitação (Simulação 12, 13, 14 e 15), foi verificado que o canal não tem capacidade de transportar o volume pluvial até o exutório sem a ocorrência de inundações, contudo, a situação sem precipitação (simulação 11), mesmo com 30% do volume comprometido foi capaz de escoar a vazão apesar da cota atingida ter ficado bem próximo a cota de inundação.

O estudo desenvolvido possibilitou avaliar que as estruturas de limpeza do canal não são

suficientes para remoção dos sólidos, que ficam acumulados e contribuem para os eventos de alagamento e inundações nas proximidades do canal da Tamandaré, não estão atendendo ao papel de evitar inundações de vias próximas ao canal da Bacia da Tamandaré, se continuarem a ser realizadas no padrão atual, situação que pode ser resolvida, com o devido controle operacional e estrutura de limpeza, desde que a remoção seja diária e em volumes adequados.

No que concerne às recomendações para trabalhos futuros, tem-se as considerações apresentadas a seguir. Uma proposta de estudo posteriores seria um estudo mais detalhado do cálculo da massa de sedimentação em um canal de drenagem, uma proposta que coloque valores de sedimentação para além de percentuais para erosão, resíduos sólidos e tratamento de esgoto, refinando os dados para pesquisas posteriores e aumentando a eficiência do resultado de simulações hidrodinâmicas a fim de verificar a eficiência das alternativas de concepção indicadas no estudo para prevenção e/ou contenção dos cenários de inundação. Tais recomendações possibilitariam a melhoria e complementação dos resultados apresentados, resultando em informações mais precisas que permitiriam um melhor preparo para situações de inundações.

Vale destacar que a limpeza se devidamente e continuamente realizada da maneira correta previne a geração de maiores custos operacionais futuros, reduz os impactos urbanísticos desta importante bacia, e assegura que não haja acúmulo indevido de sedimentos, sendo interessante em futuros estudos a avaliação da importância do tratamento de esgoto e da educação ambiental para evitar que mais sólidos indevidos cheguem a rede de drenagem, e da eficácia das operações de limpeza das estruturas de macrodrenagem na contenção de eventos de inundação, a fim gerar benefícios à população da bacia da Tamandaré e melhorar o bem estar ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2017. São Paulo, SP: ABRELPE, 2018. 74 p.
- Aghbashlo, M.; Kianmehr, M. H.; Arabhosseini, A. Modeling of thin-layer drying of potatoes lices in length of continuous band dryer. *Energy Conversion and Management*, v.50, p.1348-1355, 2009.
- ALLISON, R.A., WALKER, T.A., CHIEW, F.H.S., O'NEILL, I.C. & MCMAHON, T.A. 1998 FROM ROADS TO RIVERS - Gross pollutant removal from urban waterways, Research Report for the Co-operative Research Centre for Catchment Hydrology, Australia, 98 pp.
- AMARAL, Daniele Pereira Batista. Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na Gestão de Águas Pluviais Urbanas: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto. Rio de Janeiro. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Carlos Ribeiro. Natureza da Modificação e Modificação da Natureza: antropogênese da bacia hidrográfica da Estrada Nova. Belém (PA). **Geo UERJ**. Rio de Janeiro, ano 16, v. 1, n. 25, p. 39-61, 2014.
- ARMITAGE, N. The reduction of urban litter in the stormwater drains of South Africa. *Urban Water Journal*, v.4, n.3, 151-172, 2007. DOI: 10.1080/15730620701464117.
- ARMITAGE, N.; ROOSEBOOM, A. The removal of urban litter from stormwater conduits and streams: Paper 1 - The quantities involved and catchment litter management options. *Water SA*, v.26, n.2, 181-187, 2007.
- ARNOLD, G. e RYAN, P. 1999. Marine Litter originating from Cape Town's residential, commercial and industrial areas: the connection between street litter and storm-water debris. A co-operative community approach. Island Care New Zealand Trust, C/- XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 15 Department of Geography, The University of Auckland, New Zealand. Percy FitzPatrick Institute, University of Cape Town.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F. Manual de Hidráulica. ed. 9, São Paulo: Edgard Blücher,. 2015.
- BASSO, L., & PIZZATO F. 2011. A influência da precipitação na concentração e carga de sólidos em cursos d'água urbanos: o caso do arroio Dilúvio, Porto Alegre-RS. *Geosul*, 26: 145–163.
- BASSO, L.A. et al. A influência da precipitação na concentração e carga de sólidos em cursos d'água urbanos: o caso do arroio Dilúvio, Porto Alegre-RS.

BELÉM. **Bacias Hidrográficas.** 2014. Disponível em: <<http://www.belem.pa.gov.br/app/c2ms/v/?id=18&conteudo=4756>>. Acesso em: 29 de Setembro de 2020.

BERTONI, J. C. TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas na América do Sul. 1. ed. Porto Alegre: ABRH- Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

BORGES, Denilce Rabelo. **As Institucionalidades na Gestão do Território: Os Limites das Dominialidades Territoriais sobre os Terrenos da Marinha em Belém – PA.** 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

BRASIL. Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Lei n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979, n. 8.036, de 11 de maio de 1990, n. 8.666, de 21 de junho de 1993, e n. 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei n. 6.528, de 11 de maio de 1978. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ano 144, n. 8, 8 jan. 2007. Seção 1, p. 3-7. Retificada no Diário, 11 jan. 2007, Seção 1, p.1. Disponível em: . Acesso em: set. 2020.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico.** Brasília: Ministério das Cidades, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/AECBF8E2/Plansab_Versao_Conselhos_Nacionais_020520131.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Saneamento Básico.** Brasília, 2013. Disponível em:

BRITES, Ana Paula Zubiaurre, Enquadramento de corpos d'água através de metas progressivas, probabilidade de ocorrência e custos de despoluição hídrica. – USP. São Paulo. 2010.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CORREIA, Evaldo Flávio Gomes; RIBEIRO, Gilberto Pessanha; BAPTISTA, Alessandra Carreiro. Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas. Nova Friburgo. RJ. Utilizando o Potencial de Geotecnologias na Definição de Áreas de Risco à Inundação. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, n. 67, p. 1183-1202, nov./dez. 2015. Disponível em: . Acesso em: 19 out. 2020.

COSTA, Maria Elisa Leite. Monitoramento e Modelagem de Águas de Drenagem Urbana na Bacia do Lago Paranoá. 2013. 203 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. CRED

COSTA, Maria Elisa Leite. **Monitoramento e Modelagem de Águas de Drenagem Urbana na Bacia do Lago Paranoá.** 2013. 203 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DECINA, Thiago Galvão Tiradentes; BRANDÃO, João Luiz Boccia. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, ABES, v. 21, n. Ja/Mar. 2016, p. 207-217, 2016. Disponível

em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41520201600100116134> > DOI: 10.1590/S1413-41520201600100116134. Acesso em: 29 nov. 2020.

FIGUEIREDO, E. C. de; COSTA, J. V. V. da; LUCENA, F. R. de; PEDROSA, E. da Cunha; LUCENA, J. A. de; NASCIMENTO, K. C. do; OLIVEIRA, H. S. e LIMA, A. O. de (2002). Limpeza do rio Capibaribe no município do Recife. VI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos: R.S.U. especiais. Gramado: ABES.

FINKLER, R. . Planejamento, manejo e gestão de bacias. 2012. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Elaboração de conteúdo).

GIRONÁS, J.; ROESNER, L. A.; ROSSMAN, L. A.; DAVIS, J. A New Applications Manual for the Storm Water Management Model (SWMM). In: Environmental Modelling & Software 25 (2010) 814-814. Disponível em: acesso em: 10 de dezembro de 2020.

GOMES, Kaline Muriel de Figueiredo. Modelagem da Poluição Difusa em uma Bacia de Drenagem Urbana. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

HAGEMMAN et al, 2004 disponível em : Inundações Urbanas na América do Sul / Carlos E. M. Tucci, Juan Carlos Bertoni (organizadores). - Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

HELLER, L.; CASTRO, J. E. Política pública de saneamento: apontamentos teóricoconceituais. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.12, n. 3, p. 284-295, jul/set 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/> Acesso em; setembro de 2019.

ISLAND CARE NEW ZEALAND TRUST. 1996. Reducing the incidence of stormwater debris and street litter in the marine environment: a co-operative community approach. Auckland: Island Care New Zealand Trust.

LEÃO, M. B. M. S. Paisagem ribeirinha nas baixadas de Belém/PA: usos e apropriações na bacia da Estrada Nova. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL. 17., 2017, São Paulo, **Anais**. São Paulo: XVII ENANPUR, 2017.

MACHADO, P. J. de O.; TORRES, F. T. P. Introdução à hidrogeografia. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MADALENO, Isabel Maria. A cidade das mangueiras: agricultura urbana em Belém do Pará. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian/ Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2002.

Martínez, A., Larrañaga, A., Pérez, J., Basaguren, A., Pozo, J., 2013. Leaf-litter quality effects on stream ecosystem functioning: a comparison among five species. Fundamental and Applied Limnology / Archiv für Hydrobiologie 183, 239-248.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. **Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MOTA, S. Gestão ambiental de recursos hídricos. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2008.

NEVES, M.G.F.P; TUCCI, C.E.M. (2008); Resíduos sólidos e drenagem urbana: estudo de caso. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n.4, p 43-54.

NYLANDER, J. D. A.; FERREIRA, J. F. H.; PEREIRA, J. A. R. Avaliação de alternativa para amortização de eventos de inundação em bacia de drenagem urbana. In: SEMINARIO IBEROAMERICANO DE REDES DE AGUA Y DRENAJE. 7., 2017, Bogotá, **Anais...** Bogotá - Colômbia: Universidad de Los Andes, 2017, p. 90-98.

NYLANDER, João Diego Alvarez; Avaliação da Utilização de Comporta em Eventos Extremos de Precipitação Pluviométrica e de Maré no Canal de Drenagem da Tamandaré. 2019. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

PONCIANO, João Lucas do Carmo. Águas Pluviais: Análise de Problemas de Novos Loteamentos. Estudo de Caso do Setor Habitacional Arniqueira– DF. 2016. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

POSSANTTI, Iporã Brito; DORNELLES, Fernando. Prognóstico por Modelagem da Eficácia de Banhado de Precipitação pluviométrica no Atendimento do Enquadramento de Um Rio Urbano. Revista Caminhos da Geografia, Uberlândia, v. 18, n. 64, dez. 2017. Disponível em: . Acesso em: 29 ago. 2020.

PRIEST, S. J.; PARKER, D. J.; TAPSELL, S. M. Modelling the potential damage-reducing benefits of flood warnings using European Cases. Environmental Hazards: Human and Policy Dimensions, London, v. 10, p. 101-120, 2011.

PRODANOV, C. C; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico : métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico . 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PROSAB – Programa de pesquisa em saneamento básico. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/prosab/index.html>. Acesso em: 28 ago de 2020.

REIS, João Bosco Coura dos. Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos. 2014. 95 f. Dissertação (Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, 2014.

RIBEIRO, Alexandra; CARDOSO, Alberto. Integração de Modelos de Simulação em SIG: Aplicação ao Caso da Drenagem de Águas Pluviais Urbanas. In: SANTOS, José Gomes dos et al. Atas das I Jornadas Lusófonas de Ciências e Tecnologias de Informação Geográficas, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2015, p. 699-720.

RIGHETTO, A.M. (coord) Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 396p

RONQUIM, Joyce. Gestão de Drenagem Urbana em Palmas-PR: Conflitos e Alternativas. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

ROSA, Deyvid Wave Barreto. Resposta Hidrológica de Uma Bacia Hidrográfica Urbana à Implantação de Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana – Bacia do Córrego do Leitão. Belo Horizonte. Minas Gerais. 2017. 220 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento. Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model: User's Manual Version 5.1. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency. 2015. Disponível em: . Acesso em: 14 ago. 2019.

SANTOS, K. A. S.; RUFFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 5, p. 943-952, set./out. 2017. Disponível em: . Acesso em: 10 out. 2020.

SANTOS, Odete Cardoso de Oliveira. As Chuvas, Alagamentos e Enchentes. no Período Chuvoso em Belém. Estado do Pará. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 5, p. 173-183, 2012. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufam.edu.br/revista-geonorte/article/view/2488>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

SILVA, Daniele Feitoza. **Análise da Influência de Microrreservatórios em um Loteamento e seus Efeitos em Escala de Bacia**. 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, Izabela Cristiane de Lima. Proposta Metodológica para Avaliação da Qualidade de Planos Municipais de Saneamento Básico. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVA, J. P. 2007. Estudos Preliminares para Implantação de Trincheiras de Infiltração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 154 /07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p.

SILVA, Narjara Rúbia Lima da et al. Aplicação do Modelo de Gestão de Drenagem Urbana (SWMM) na Sub-Bacia 2 da Estrada Nova em Belém do Pará. Sustentare, Três Corações, v. 1, n. 1, p. 01-17, ago./dez. 2017.

SILVEIRA, A. L. L. 2001. Problems of urban drainage in developing countries. In: International Conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage, 1, 2001, Lyon. Novatech, p. 143-150.

SOARES, André Araújo Sombra; CARVALHO, André Cutrim. Desafios da Governança do Espaço Urbano na Era do Antropoceno e o Caso das Inundações e Alagamentos Em Belém- Pa. **Revista GeoAmazônia**, Belém, v. 6, n. 11, p. 105-142, 2018. Disponível em:

SOUSA, Rillary de Freitas; ALVES, Taís Corrêa. DRENAGEM URBANA FRENTE À CRESCENTE IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO: ASPECTOS LEGISLATIVOS, ESTUDO DE CASO. 2016. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de

ASSEMAE - Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento 788 Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: . Acesso em: 21 mar. 2020.

TEODORO, P. H. M.; NUNES, J. O. R. Os alagamentos em Presidente Prudente-SP: um trabalho interdisciplinar embasado no mapeamento geológico. *Revista Formação*, n.17, volume 2 – p. 81-102. São Paulo, 2007.

TEODORO, V. L. I. *et al.* O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, n. 20, p. 137-156, 2007. Disponível em:

Tonello, K. C. 2005, *Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas*, Guanhanês, MG, Dissertação de Mestrado, UFV.

TSAI, Lin-Yi et al. Using the HSPF and SWMM Models in a High Pervious Watershed and Estimating Their Parameter Sensitivity. *Water*, v. 9, n. 10, p. 1-16, 2017. Disponível em: . Acesso em: 10 ago. 2019.

TUCCI, C. E. M. BERTONI, J. C. Inundações Urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas: impactos da urbanização. Porto Alegre: Ed. ABRH/RHAMA, p87-124, 2007.

TUCCI, C. E. M. Urbanização e recursos hídricos. In: BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. *Águas do Brasil: análises estratégicas*. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Educação para a prevenção e redução de riscos climáticos / Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; [coordenador geral Paulo Belli Filho; autores do conteúdo: Maurício Dalpiaz Mello, Rosemy da Silva Nascimento, Sung Chen Lin]. - Florianópolis: [s. n.], 2014. 98p.

VINAGRE, Marco Valério de Albuquerque et al. Modelo de Gestão de Drenagem Urbana Aplicada à Bacia do Una e Belém-PA. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações*, v. 15, n. 1, p 253-267, jan./jul. 2017. Disponível em: . Acesso em: 09 ago. 2019.

Volschan I., Tsutiya M.T., Martins R.H.O. &Yazaki L.F.O. (2009) - Ensaio: o Sistema de Coleta de Esgotos Tipo Unitário é uma Solução Viável para o Brasil? *Revista DAE*. Vol. 180 40-43.

MONTENEGRO, I. R. (2011). *Análise de sistemas de drenagem no plano piloto*. Monografia de Projeto Final, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 118p.

ANEXO

MANUTENÇÃO DOS SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA (2021)

Despesas Detalhadas

Para encontrar dados detalhados sobre a execução orçamentária e financeira do Município, com possibilidade de pesquisar informações por dia e pela fase de

Entidade Governamental: PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM

Ano: 2021

Orgão/Unidade: 2.10.21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO

Período: 01/01/2021 Até 31/12/2021

de Seleção

☐ por Empenho ☐ por Nome/CNPJ ☒ por Projeto/Atividade ☐ por Função e Sub Função ☐ por Natureza de Despesa ☐ por Fonte

Projeto/Atividade: manutenção dos serviços de limpeza urbana

Operações

[Consultar](#)   

s Encontrados

Empenho	Data	Unidade Gestora	Fornecedor
181/2021	11/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	SÓLIDA CONSTRUÇÃO LTDA
182/2021	11/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	GUAMA - TRATAMENTO DE RESIDUOS LTDA
183/2021	11/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
184/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
185/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
186/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
187/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
188/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
189/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
190/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA
191/2021	12/03/2021	21 - SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO	TERRAPLENA LTDA