



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

FRANCISCO FÁBIO DE SOUSA FEITOSA

**AVALIAÇÃO DO USO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO PARA
ATENUAÇÃO DE PICOS DE CHEIA UTILIZANDO O SWMM**

JUAZEIRO DO NORTE-CE

2015

FRANCISCO FÁBIO DE SOUSA FEITOSA

AVALIAÇÃO DO USO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO PARA ATENUAÇÃO
DE PICOS DE CHEIA UTILIZANDO O SWMM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares.

JUAZEIRO DO NORTE-CE

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- F336a Feitosa, Francisco Fábio de Sousa.
 Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para atenuação de picos de cheia
 utilizando o SWMM / Francisco Fábio de Sousa Feitosa. – 2015.
 101 f. : il. color. , enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
 Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2015.
 Área de Concentração: Recursos Hídricos.
 Orientação: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares.

1. Recursos hídricos. 2. Drenagem. 3. Sustentabilidade. 4. Urbanização. I. Título.

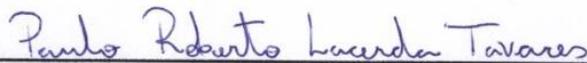
FRANCISCO FÁBIO DE SOUSA FEITOSA

AVALIAÇÃO DO USO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO PARA ATENUAÇÃO
DE PICOS DE CHEIA UTILIZANDO O SWMM

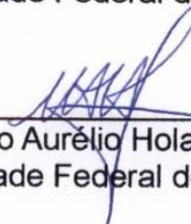
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 09/09/2015.

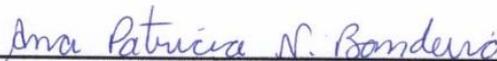
BANCA EXAMINADORA



Professor Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Professor Marco Aurélio Holanda de Castro Ph.D
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Professora Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

A Deus pela imensidão do seu amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus a quem devo tudo e por estar sempre presente em minha vida.

Ao Professor Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares, pela paciência, pela ajuda durante todo o curso e por ter acreditado no meu trabalho.

À minha querida esposa Erika pelo companheirismo e os muitos incentivos durante o curso e ao meu filho Filipe pelas muitas alegrias concedidas e que foram responsáveis pelo renovo de forças.

À minha mãe pelo grande esforço durante toda sua vida pela educação de seus filhos.

Aos Professores Dra. Celme Torres e Dr. Luiz Alberto de Mendonça pela contribuição em minha formação.

Às secretarias Edineusa Firmino e Shirley Gomes que por apesar da distância, foram sempre prestativas nas minhas solicitações.

Aos colegas do Cariri, Francismário e Joelma pela ajuda e companheirismo durante as várias etapas que caminhamos juntos.

Ao amigo Marcondes Vidal pela grande contribuição dada durante o curso.

Ao Instituto Nacional do Seguro Social por ter me licenciado de minhas atividades para a conclusão deste trabalho.

“O mundo tornou-se perigoso, porque os homens aprenderam a dominar a natureza antes de se dominarem a si mesmos.”

Albert Schweitzer.

RESUMO

O crescimento dos centros urbanos e o processo de urbanização das últimas décadas em todo mundo têm causados diversos impactos no meio ambiente, principalmente no ciclo hidrológico, trazendo consigo um aumento na quantidade e magnitude de cheias urbanas. O presente estudo teve como objetivo principal analisar o escoamento superficial gerado no bairro Mirandão em Crato-CE, propondo uma solução para sua diminuição através do emprego de trincheiras de infiltração, implantadas no passeio público e que receberão apenas as águas provenientes dos telhados das edificações existentes nos lotes. Utilizou-se para as simulações o programa computacional Storm Water Management Model – SWMM, com parâmetros retirados da literatura. Foram estudados dois cenários, no primeiro simulou toda a área em estudo, urbanizada na sua situação limite. No segundo cenário, foram incluídas as trincheiras no modelo anterior e analisados os resultados. As simulações realizadas demonstraram que o local, após total urbanização, poderá ter problemas com o escoamento superficial e que a solução proposta através do uso de trincheiras de infiltração se demonstra eficiente na diminuição dos picos de vazão, se mostrando na maioria dos casos capaz de reduzir em pelo menos 70% da vazão gerada pelos lotes. Analisando a área como um todo, não foram observados retardos de picos devido a influência do escoamento gerado pelas ruas, que ocorreu em todos os casos após 12 minutos de precipitação. Destaca-se, por fim, que através do uso das práticas de drenagem Low Impact Development (LID) os benefícios vão muito além de tratar os problemas das cheias na região de instalação, podendo também diminuí-las em outras áreas a jusante e favorecer o incremento das reservas de recursos hídricos subterrâneos local.

Palavras-chave: drenagem urbana, trincheiras de infiltração, SWMM.

ABSTRACT

The growth of urban centers and the process of urbanization of the last decades has caused many impacts on the environment, especially in the water cycle, increasing the amount and magnitude of flooding. The present study had the main objective to evaluate the process of urbanization of an urban area located of Crato-CE, analyzing the runoff generated and proposing a solution for its reduction using infiltration trenches only getting the water from the roofs buildings. The computational model simulations Storm Water Management Model - SWMM was used with parameters available in the literature. Two scenarios were studied; the first simulated the entire urbanized area study in its extreme situation. In the second scenario, the trenches were included in the previous model and analyzed the results. The parameters of the materials were all taken from the literature. The results showed that the site after total urbanization may have problems with the runoff and that solution presented demonstrates effective in decreasing the flow rate peaks, showing in most cases able to reduce at least 70% of the flow generated by batches. Analyzing the area as a whole are not peaks observed delays due to the influence of the flow generated through the streets, which occurred in all cases after 12 minutes of rainfall. Finally, the use of drainage practices Low Impact Development (LID) the benefits go far beyond addressing the problems of flooding in the installation area, and may also reduce them in other areas downstream and favor the increase in water site underground resources reserves.

Keywords: urban drainage, infiltration trenches, SWMM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhe das Camadas da cobertura com sistema alveolar e exemplo de cobertura na Austrália.....	22
Figura 2 - Camadas de sistema laminar e exemplo de uma cobertura	22
Figura 3 - Esquema construtivo de um pavimento poroso	23
Figura 4 - Esquema construtivo de um pavimento semi-permeáveis	24
Figura 5 - Exemplo de um jardim de chuva aplicado em Recife-PE.....	25
Figura 6 - Exemplo de uma vala de infiltração associada a uma trincheira de infiltração	26
Figura 7 - Esquema de um poço de infiltração	28
Figura 8 - Exemplo de um reservatório de retenção.....	29
Figura 9 - Esquemática de uma trincheira de infiltração.....	30
Figura 10 - Redução do volume útil em grandes inclinações	32
Figura 11 - Trincheiras em declive com divisórias	33
Figura 12- Visão Conceitual do Fenômeno do Escoamento no SWMM.....	41
Figura 13 - Curva de infiltração	42
Figura 14 - Bairro Mirandão em Crato-CE.....	48
Figura 15 - Bairro Mirandão em a) 22/11/2005 b) 21/08/2009.....	49
Figura 16 - Bairro Mirandão a) 09/02/2013 b) 01/01/2014	49
Figura 17 - Exemplo de drenagem SWMM	50
Figura 18 - Metodologia de utilização do UFC8 –	51
Figura 19 - Processo de dimensionamento no UFC8.....	52
Figura 20 - Discretização das subáreas	54
Figura 21 - Modelo Urbanizado	57
Figura 22 - Detalhe típico de uma trincheira do modelo.....	58
Figura 23 - Situação das Trincheiras de Infiltração no Modelo.....	58
Figura 24 - Distribuição das trincheiras no bairro	59
Figura 25 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado com $Tr=3$ anos	62
Figura 26 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado com $Tr=5$	63
Figura 27 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado com $Tr=10$ anos	64
Figura 28 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado e trincheiras de infiltração com $Tr=3$ anos	65
Figura 29 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado e trincheiras de infiltração com	

Tr=5 anos	66
Figura 30 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado e trincheiras de infiltração com Tr=10 anos	67
Figura 31 - Hidrogramas de saída.....	68
Figura 32 - Hidrogramas de entrada e saída da trincheira da quadra Q21	70
Figura 33 - Escoamento na Subbacia Q28	70
Figura 34 - Hidrograma no Exutório 0	71
Figura 35 - Hidrograma do Exutório 1	72
Figura 36 - Hidrograma do Exutório 2	72
Figura 37 - Hidrograma do Exutório 3	73
Figura 38 - Hidrograma do Exutório 4	73
Figura 39 - Hidrograma do Exutório 5	74
Figura 40 - Hidrograma do Exutório 6	74
Figura 41 - Hidrograma do Exutório 7	75
Figura 42 - Hidrograma do Exutório 7 sem o escoamento das quadras	76
Figura 43 - Hidrograma de saída no exutório 7 com parâmetros de infiltração diferentes	77
Figura 44 - Hietograma Tr=3 anos	85
Figura 45 - Hietograma Tr=5 anos	85
Figura 46 - Hietograma Tr=10 anos	86
Figura 47 - Hidrograma do Exutório 0	87
Figura 48 - Hidrograma do Exutório 1	87
Figura 49 - Hidrograma do Exutório 2	88
Figura 50 - Hidrograma do Exutório 3	88
Figura 51 - Hidrograma do Exutório 4	89
Figura 52 - Hidrograma do Exutório 5	89
Figura 53 - Hidrograma do Exutório 6	90
Figura 54 - Hidrograma do Exutório 7	90
Figura 55 - Hidrograma do Exutório 0	91
Figura 56 - Hidrograma do Exutório 1	91
Figura 57 - Hidrograma do Exutório 2	92
Figura 58 - Hidrograma do Exutório 3	92
Figura 59 - Hidrograma do Exutório 4	93
Figura 60 - Hidrograma do Exutório 5	93

Figura 61 - Hidrograma do Exutório 6	94
Figura 62 - Hidrograma do Exutório 7	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição da população urbana e rural no Ceará.....	17
Tabela 2 - Uso de BMP em diversas partes do mundo.	20
Tabela 3 - Composição de custos de um metro linear de uma trincheira	34
Tabela 4 - Hipóteses para colmatação da superfície em diversos países.	38
Tabela 5 - Períodos de Retorno para diferentes ocupações	53
Tabela 6 - Coeficiente de Escoamento Superficial do modelo.....	55
Tabela 7 - Porosidade Efetiva de alguns materias de enchimento	60
Tabela 8 - Estimativa da capacidade mínima de infiltração.....	61
Tabela 9 - Picos de Vazão das Subáreas	69
Tabela 10 - Tempo de Pico nos Exutórios	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMP	Best Management Practices
CAD	Computer Aided Design
CN	Curve number
GIS	Geographic Information System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, Duração e Frequência
LID	Low Impact Development
LIUUD	Low Impact Urban Design and Development
NRCS	National Resources Conservation Service
PET	Politereftalato de etileno
SCS	Soil Conservation Service
SUDS	Sustainable Urban Drainage Sustersms
SWMM	Storm Water Management Model
UFG	Universidade Federal de Goiás
US EPA	United States Environmental Protection Agency
USA	United States of America
VBA	Visual Basic Aplications
WRE	Water Resource Engineers
WSUD	Water Sensitive Urban Design

LISTA DE VARIÁVEIS

ϕ_m	Potencial matricial da frente de molhamento [L]
A_{perc}	Área total dos lados da estrutura de percolação [L ²];
A_w	Área molhada [L ²]
C	Coeficiente de escoamento
D	Volume específico de percolação [L ³]
d	Profundidade da água no reservatório [L]
d_p	Altura de armazenamento por depressão [L]
f	Capacidade de infiltração no tempo [L.T ⁻¹]
f_0	Capacidade de infiltração inicial [L.T ⁻¹]
f_c	Capacidade mínima de infiltração [L.T ⁻¹]
g	Aceleração da gravidade [L.T ⁻²]
h	Carga hidráulica [L]
I	Intensidade máxima de chuva [L.T ⁻¹]
i_e	Precipitação efetiva [L.T ⁻¹]
I_T	Intensidade da precipitação de T anos de retorno [L.T ⁻¹]
k	Condutividade hidráulica do solo [L.T ⁻¹]
K	Coeficiente de permeabilidade
k_f	Coeficiente experimental de caída exponencial
l	Distância longitudinal [L]
L	Comprimento do talvegue [L]
L_u	Distância entre a superfície e a frente de umidade [L]
n	Coeficiente de rugosidade de Manning [L.T ⁻³]
Q	Vazão [L ³ .T ⁻¹]
q_L	Contribuição lateral por largura [L]
S	Declividade [L.L ⁻¹]
S_0	Inclinação do canal [L.L ⁻¹]
S_f	Inclinação da linha de energia [L.L ⁻¹]
t	Duração da precipitação [T]
t_s	Tempo decorrido desde a saturação superficial do solo [T]
T	Período de retorno [T]
t_c	Tempo de concentração da bacia [T]

t_p	Tempo de percolação [T]
V_d	Volume de dimensionamento [$L^3.T^{-1}$]
V_e	Volume acumulado de entrada [$L^3.T^{-1}$]
$V_{perc}(t)$	Volume de água percolado no solo [$L^3.T^{-1}$]
V_s	Volume acumulado de saída [$L^3.T^{-1}$]
V_T	Volume total escoado no tempo t para uma precipitação de T anos de retorno [$L^3.T^{-1}$]
$\nabla\phi$	Gradiente hidráulico na direção vertical;
W	Largura representativa da sub-bacia [L]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Urbanização e os problemas dela decorrentes	17
3.2	Medidas de Controle.....	18
3.2.1	<i>Medidas Não Estruturais</i>	19
3.2.2	<i>Medidas Estruturais</i>	19
3.2.2.1	<i>Sistemas Clássicos de Drenagem Urbana</i>	19
3.2.2.2	<i>Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana</i>	20
3.2.2.2.1	Telhados verdes.....	21
3.2.2.2.2	Pavimentos permeáveis e semipermeáveis	22
3.2.2.2.3	Bioretenção	24
3.2.2.2.4	Valas de infiltração.....	25
3.2.2.2.5	Poços de infiltração	27
3.2.2.2.6	Reservatórios de retenção e detenção	29
3.2.2.2.7	Trincheiras de infiltração.....	30
3.3	Modelos hidrológicos	38
3.3.1	<i>SWMM</i>	38
4	METODOLOGIA	47
4.1	Local do estudo	47
4.2	Modelagem no SWMM	50
4.2.1	<i>Sistema UFC8</i>	51
4.2.2	<i>Precipitação de projeto</i>	52
4.2.3	<i>Discretização das Sub-áreas</i>	53
4.2.4	<i>Condução do escoamento</i>	54
4.3	Cenários Estudados	55
4.3.1	<i>Situação Urbanizada</i>	55

4.3.2	<i>Situação Urbanizada com LID: uso de trincheiras de infiltração</i>	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	Simulação sem as trincheiras de infiltração	62
5.2	Simulação com as trincheiras de infiltração	64
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE A – HIETOGRAMAS DE PROJETO	85
	APÊNDICE B – HIDROGRAMA DE SAÍDA DOS EXUTÓRIOS PARA T=5ANOS ..	87
	APÊNDICE C – HIDROGRAMA DE SAÍDA DOS EXUTÓRIOS PARA T=10ANOS	91
	ANEXO A – METODOLOGIA DE CÁLCULO DE OUTROS DISPOSITIVOS DE DRENAGEM NA FONTE.	95

1 INTRODUÇÃO

A expansão dos centros urbanos e o processo de urbanização das últimas décadas em todo mundo, seja em países desenvolvidos ou subdesenvolvidos, vêm impactando de forma substancial o meio ambiente, principalmente no ciclo hidrológico. Uma das principais consequências destas ações do homem é o aumento da quantidade e magnitude de inundações que trazem diversos transtornos para a sociedade, com prejuízos para saúde pública, danos materiais e humanos (JUNIOR e BARBASSA, 2006).

Segundo Silva (2007), o ciclo hidrológico é um sistema fechado que rege toda a distribuição da água da Terra, onde parte da água precipitada sobre o solo sofre o processo de infiltração, que é a transferência desta para o seu interior. Contudo, este processo é prejudicado com a urbanização que aumenta as áreas impermeáveis com telhados, ruas e calçadas, causando assim um escoamento superficial maior e que podem ser agravadas por problemas no planejamento dos sistemas de drenagem e por ocupações dos leitos dos corpos d'água urbanos (ARAUJO *et al.*, 2000).

O tratamento clássico dado as cheias urbanas é através do rápido escoamento das águas precipitadas para jusante, através da execução de galerias pluviais que transferem as vazões e muitas vezes agravam o problema das inundações em outro local, resultando assim novas obras de drenagem, com aumento da seção de canais naturais ou substituição de condutos antigos por outros de maior diâmetro, com custos elevados e, cada vez mais onerosos para a sociedade.

No entanto, novas abordagens vêm sendo tomadas principalmente nos países desenvolvidos, na tentativa fazer com que o ciclo hidrológico da área se aproxime o máximo possível de suas condições antes da urbanização, com o intuito de aumentar a infiltração das águas e retardar o escoamento. Pavimentos permeáveis, poços de infiltração, trincheiras de infiltração, reservatórios de retenção ou retenção e telhados verdes, são apenas algumas destas técnicas utilizadas desde os anos de 1970 em todo o mundo.

Em Seattle (Washington, EUA) por exemplo, um projeto-piloto ganhou grande reconhecimento ao reduzir 99% do escoamento superficial através da reconstrução da 2ª avenida (200m; Street Edge Alternative Street Project), deixando o traçado da via mais sinuoso, reduzindo a velocidade de automóveis, além de promover um ambiente mais convidativo para a população com o plantio de 100

árvores e 1100 arbustos integrados a dispositivos de controle de águas pluviais (SOUZA *et al.*,2012).

Apesar das grandes vantagens observadas com tais técnicas, seu uso ainda aparece de forma bem tímida no Brasil, onde apenas algumas cidades como Porto Alegre, Belo Horizonte, Curitiba, Santo André e São Paulo vêm enfrentando de forma diferente o problema das enchentes urbanas, no entanto o fato de que as águas pluviais devem ser tratadas na fonte produtora vem se tornando cada vez mais necessário.

Este trabalho propõe-se estudar o processo de urbanização de um bairro em Crato-CE, analisando as suas implicações no escoamento superficial e verificando os efeitos da implantação de um sistema de desenvolvimento de baixo impacto (Low Impact Development - LID), através do uso de trincheiras de infiltração, construídas no passeio público.

Visando caracterizar os cenários da área estudada, propôs-se a aplicação de um modelo matemático que possibilite prever os impactos decorrentes das situações existentes e propostas pelo estudo, para tanto utilizou-se como ferramenta o Storm Water Management Model– SWMM, versão 5.1, programa de simulação computacional do tipo chuva-vazão muito utilizado por pesquisadores em análise de sistemas de drenagem em diversas partes do mundo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo modelar um sistema de drenagem de baixo impacto composto de trincheiras de infiltração, verificando sua eficiência na redução de processos de inundações.

2.2 Objetivos Específicos

- Modelar a sub-bacia considerando sua total urbanização;
- Traçar um mapa de cheias do bairro Mirandão;
- Modelar a sub-bacia após a urbanização utilizando um sistema de baixo impacto com trincheiras de infiltração;
- Traçar um mapa de cheias do bairro Mirandão com as trincheiras instaladas;
- Verificar a eficiência do método em diversos pontos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Urbanização e os problemas dela decorrentes

Dada a importância da água para a sobrevivência do homem, grande parte das civilizações iniciaram suas primeiras aglomerações urbanas preferencialmente junto aos corpos d'água, buscando não somente o consumo, mas também a manutenção agrícola e com o passar dos anos a eliminação dos dejetos.

O processo de desenvolvimento das cidades, observado ao longo dos séculos, vem sendo realizado sem muitas vezes considerar as condições naturais do meio físico, alterando assim as características de volume e qualidade do ciclo hidrológico. Como resultado disso tem-se verificado aumento nos volumes escoados, reduções na capacidade de infiltração da água no solo e aceleração do escoamento superficial, fazendo com que surjam problemas de excedentes de água e conseqüentemente diversas inundações.

Tais alterações provocaram modificações na frequência e na magnitude das cheias dos rios, onde não é raro encontrar relatos sobre enchentes nas principais cidades do país e os problemas dela decorrentes.

Após a revolução industrial, no início do século 19, onde apenas 1% das pessoas viviam nas grandes cidades, houve uma grande migração da população rural para as zonas urbanas, em ritmo cada vez mais acelerado (TUCCI, 2003). Exemplo disso pode ser verificado no estado do Ceará onde, segundo o IBGE (tabela 1), nos últimos cinquenta anos, em termos percentuais, a população urbana é mais que o dobro daquela dos anos 1960.

Tabela 1- Distribuição da população urbana e rural no Ceará

Tipo de População	Ano do censo					
	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Urbana	33,70%	40,32%	53,48%	65,35%	71,50%	75,09%
Rural	66,30%	59,68%	49,52%	34,65%	28,50%	24,91%

Fonte: IBGE (2010)

Tucci (2001) classificou as inundações como sendo de dois tipos: as decorrentes de ocupação das áreas ribeirinhas, onde a população ocupa a parte do leito dos rios que seca durante as estiagens; e aquelas decorrentes do processo de

urbanização, em que sua origem ocorre devido ao aumento de áreas impermeáveis do solo, fazendo com que haja um aumento no volume e velocidade do escoamento superficial, ocasionando assim um aumento na frequência e na magnitude das enchentes.

Segundo Tucci *et al.* (1995), as cheias urbanas ampliadas pela urbanização, ocorrem na maioria das vezes, em bacias de pequeno porte, contudo podem ocorrer em bacias maiores como a da cidade de São Paulo que possui cerca de 800km². O que se vê nas grandes bacias é a combinação e o acúmulo da drenagem de vários pontos a jusante, que são influenciados pela distribuição temporal e espacial das precipitações máximas.

Como se não bastassem as inundações causadas pela urbanização, há também uma deterioração da qualidade da água nos corpos receptores, pois durante o escoamento superficial há uma lavagem de diversas superfícies carregadas de poluentes (metais pesados, óleos, graxas, além de sedimentos e carga orgânica) e que são, em grande parte, evacuadas para os rios.

Segundo Martins (2012), grandes eventos de cheia como os desastres em New Orleans (USA) em 2005 e no Rio de Janeiro em 2011 mostraram que os termos como “*combater cheias*” ou “*acabar com as inundações*” devem ser substituídos pelo conceito de redução de riscos por padrões aceitáveis tendo em vista que estas irão sempre ocorrer devido às ocupações ribeirinhas, à má administração dos gestores urbanos em drenagem, bem como imprevisibilidade de alguns eventos.

3.2 Medidas de Controle

Para Tucci (1995) as cheias urbanas são um problema crônico no Brasil, sendo devido, em grande parte, à ingerência no planejamento dos projetos de drenagem urbana, utilizando uma filosofia errônea de retirar as águas escoadas o mais rápido possível de determinada região, somadas aos diversos casos de ocupação desordenada das áreas ribeirinhas e outras áreas de risco. Problemas na manutenção dos sistemas existentes, como limpeza dos canais e calhas, além da retirada da cobertura vegetal do solo, também tem causado problemas com o assoreamento dos canais. Contudo, algumas medidas podem minimizar os danos decorrentes das inundações e que podem ser classificadas, conforme sua natureza, em medidas estruturais e não estruturais (Canholli, 2005).

3.2.1 Medidas Não Estruturais

As medidas não estruturais procuram reduzir os danos dos problemas decorrentes das inundações através da criação de regulamentos, leis e programas que disciplinem o uso do solo e criem sistemas que alertem a população dos riscos de enchentes e inundações.

As principais medidas não estruturais adotadas na atualidade, segundo Canholi, (2005) são:

- Ações de regulamentação do uso e ocupação do solo – Delimitando áreas sujeitas a inundação e destinando-as a praças, parques e estacionamentos;
- Educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa – Evitam a erosão de determinadas áreas e a obstrução dos sistemas através do lixo urbano;
- Sistemas de alerta e previsão de inundações – Facilitam ações de isolamento de áreas, desviando o tráfego e retirando pessoas;
- Recuperação de matas ciliares – Agem na captação de parte de água precipitada e diminuem a velocidade de escoamento.

3.2.2 Medidas Estruturais

3.2.2.1 Sistemas Clássicos de Drenagem Urbana

São as obras de engenharia mais conhecidas, normalmente formada por dispositivos de microdrenagem que fazem o transporte das águas superficiais nas ruas, através de sarjetas, destinando-as para bocas-lobo que fazem a sua condução para tubos e galerias até outro ponto final a jusante, que poderá ser outra rede de drenagem ou algum curso d'água.

Este tipo de solução, em que as águas são retiradas de forma rápida dos pontos de cheia transferindo-os para jusante, mesmo sendo a única solução possível em alguns casos, em um futuro próximo poderá transferir também os problemas de inundação, resultando assim em novas obras de drenagem para complementar ou modificar o sistema de drenagem existente. Desta forma verifica-se que antigas áreas

urbanizadas tendem a sofrer novas inundações causadas por áreas que foram urbanizadas depois (BAPTISTA, 2005).

3.2.2.2 Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana

Até bem pouco tempo atrás apenas as técnicas clássicas eram conhecidas, contudo desde os anos 1970 começou-se a pensar na drenagem através de técnicas que buscassem neutralizar os efeitos da urbanização do homem sobre os processos hidrológicos; esta nova metodologia ficou conhecida na América do Norte como Best Management Practices (BMP). A tabela 2 mostra sua aplicação em diversas partes do mundo.

Tabela 2 - Uso de BMP em diversas partes do mundo.

Local	Descrição	Resumo das técnicas
Estados Unidos	Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID)	Procura aproximar a drenagem urbana do sistema natural, incentivando práticas de reuso e infiltração. Através de técnicas como implantação de telhados verdes, valas de infiltração, faixas gramadas e reeducação da população, conseguiu-se em 1996 uma redução de 35% do escoamento superficial nas ruas da cidade de Portland.
Inglaterra	Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (Sustainable Urban Drainage Systems –SUDS)	Um dos países que mais se tem desenvolvido estudos e aplicações dos sistemas sustentáveis de drenagem, onde universidades e empresas trabalham juntos para o melhor desenvolvimento de técnicas sustentáveis.
Austrália	Projeto Urbano Hidricamente Sensível (Water Sensitive Urban Design – WSUD)	Procuram usar técnicas que o fluxo das águas se aproximem o máximo possível de seu curso natural. Seus estudos são de grande importância para o Brasil, por ambos países possuírem climas semelhantes, diminuindo o número de adaptações para que as técnicas sejam aplicadas no Brasil.
Nova Zelândia	Projeto e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (Low Impact Urban Design and Development – LIUDD)	Tem como objetivo principal otimizar o desempenho e a competitividade das cidades, melhorando a integração entre as atividades humanas e processos naturais.

Forte: Poletto, (2011)

Neste tipo de solução busca-se fazer o oposto proposto pelo método clássico, ou seja, procura-se considerar os impactos da urbanização de forma global, tendo como base de estudo a própria bacia hidrográfica, compensando de forma

sistemática os efeitos da urbanização e efetuando o controle do escoamento produzido através das áreas impermeabilizadas, evitando assim a rápida transferência para jusante (BAPTISTA, 2005).

Quando estas técnicas trabalham a infiltração das águas pluviais, além proporcionarem melhorias quanto ao escoamento, ainda trabalham desempenhando um importante papel na recarga das águas subterrâneas que naturalmente seriam perdidas no processo de impermeabilização advindo da urbanização.

Dentre as várias técnicas existentes, segue um breve relato de algumas delas.

3.2.2.2.1 Telhados verdes

Bastante utilizado nos países europeus, a cobertura verde ou telhados verdes são dispositivos em que sobre uma camada impermeável de cobertura, é plantada uma vegetação de crescimento médio, podendo ser incluído no sistema barreira de raízes, sistemas de irrigação e de drenagem.

Segundo Costa et al (2011) os telhados verdes além de reduzirem o escoamento que daria origem as enxurradas trazem benefícios à fauna e amenizam o calor nas edificações.

Os dois principais tipos de telhados verdes utilizados são:

O sistema alveolar (figura 1) onde há uma maior retenção de água e permite uma maior variedade de plantas incluindo espécies nativas e gramas. A vegetação para este tipo de telhado, segundo Rosseti et al (2013), requer maiores cuidados, tais como rega, poda, uso de fertilizantes, dentre outros. Além disto, há a necessidade de uma maior espessura de solo que varia conforme o tipo de planta e que aumentam consideravelmente a sobrecarga da cobertura, podendo chegar a valores em torno de 400 kg/cm².

No sistema laminar (figura 2) há uma lâmina de água sob um piso elevado que também permite uma redução do calor da edificação e retenção das águas pluviais, porém há uma adaptabilidade da vegetação. Possui uma camada do substrato, em torno de 10cm, aceitam plantas rasteiras como as gramíneas, que não necessitam de cuidados especiais ou constantes após terem sido consolidadas. Neste tipo de cobertura há uma menor sobrecarga da cobertura variando de 73 a 160kg/cm² para camadas de solo saturado de 5 a 15 cm (ROSSETI et al, 2013).

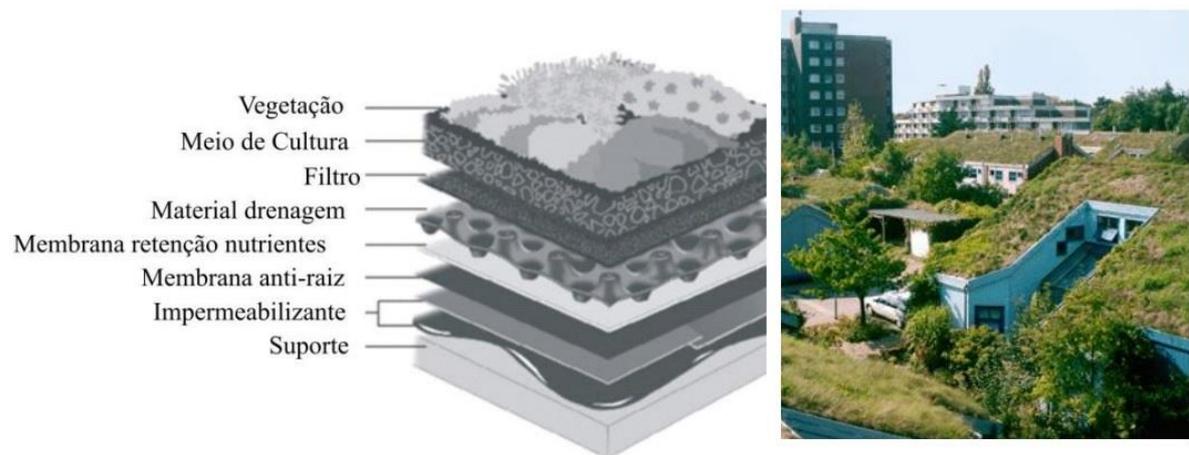


Figura 1 - Detalhe das Camadas da cobertura com sistema alveolar e exemplo de cobertura na Austrália
Fonte: Prowell (2006 *apud* Rosseti, 2013)

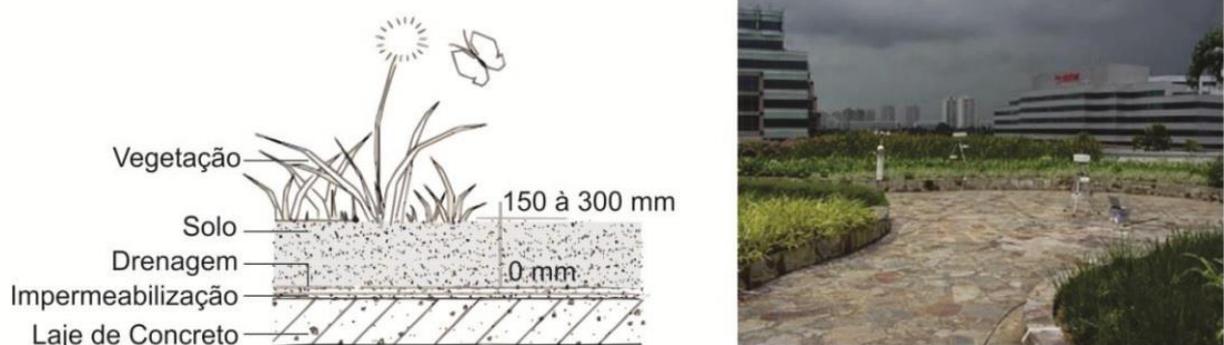


Figura 2 - Camadas de sistema laminar e exemplo de uma cobertura
Fonte: Chen (2006 *apud* Rosseti, 2013)

Vanuytrecht et al (2014) avaliaram, com auxílio do GreenRoof Model o escoamento de dois tipos de telhados verdes, ambos com 100 m² de superfície, com 5 cm de substrato e sem inclinação, onde cada um recebeu um tipo de vegetação diferente e comparando-os com um telhado de betume padrão na Região de Flandres na Bélgica. Os resultados mostraram que as coberturas verdes foram ferramentas eficientes para diminuir de 61% a 75% do escoamento das águas pluviais em relação ao telhado padrão de betume, durante o verão, e de 6% a de 18% no inverno.

3.2.2.2.2 Pavimentos permeáveis e semipermeáveis

Trata-se de um dispositivo de infiltração onde o escoamento é desviado para uma área de reservação localizada sob a superfície do terreno, normalmente

constituída de pedra britada de granulometria diferenciada, que deve ser adequadamente protegida por membranas geotêxteis contra a colmatção.

Segundo Urbonas e Stahre (1993) os pavimentos permeáveis podem ser classificados em pavimento asfalto poroso, pavimento concreto poroso e o pavimento semipermeável.

O asfalto poroso (figura 3) é construído de forma semelhante aos asfaltos convencionais, tendo uma pequena modificação em sua constituição, onde é retirado parte do agregado mais fino, aumentando assim a sua porosidade, de forma semelhante o concreto poroso também possui uma fração da areia retirada dos concretos convencionais para aumentar a sua permeabilidade.

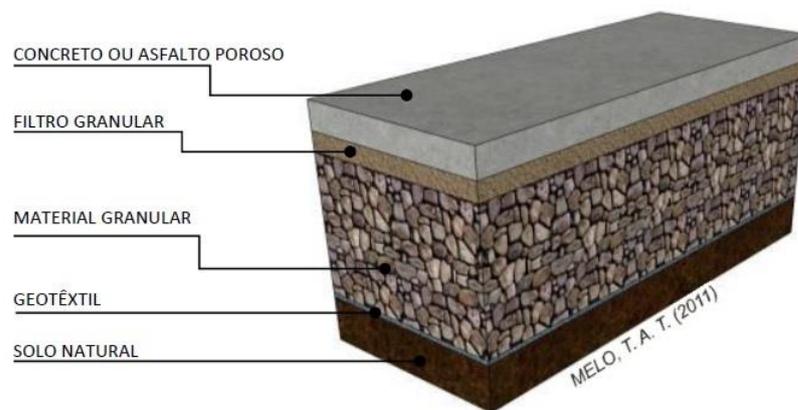


Figura 3 - Esquema construtivo de um pavimento poroso
Fonte: Melo, (2011)

Tais pavimentos agem no controle da poluição difusa, do volume e pico do escoamento superficial e através da infiltração ajudam na recarga do aquífero. Sua utilização está restrita para vias de tráfego leve, praças, passeios, quadras de esporte e estacionamentos.

Os pavimentos semipermeáveis (figura 4) são blocos vazados de concreto, preenchidos com material granular ou grama, assentados sob uma camada de material granular, coberta de um filtro geotêxtil para evitar que esta se desloque para as camadas mais baixas.

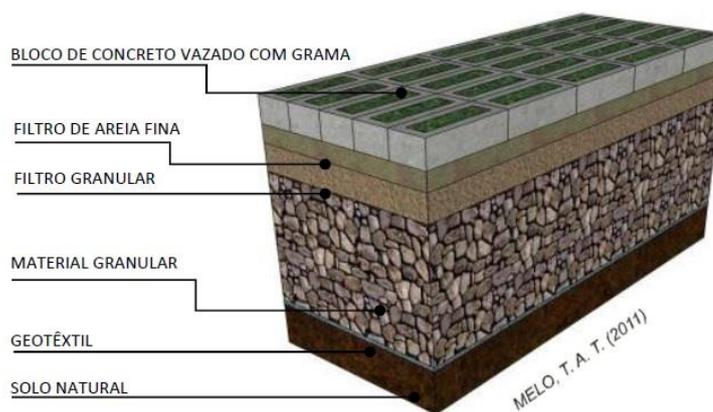


Figura 4 - Esquema construtivo de um pavimento semi-permeáveis
Fonte: Melo, (2011)

Em experimentos realizados por Al-Rubaei et al (2013), verificou-se que os blocos de concreto preenchidos com grama possuem maior permeabilidade que aqueles preenchidos com cascalho.

Como tais pavimentos agem diminuindo o tempo de recarga da bacia e o volume escoado, não há necessidade de caixas de captação ou a condução através de tubos, contudo sua eficiência depende diretamente dos cuidados na sua manutenção para evitar a colmatação do solo.

Brattebo & Booth (2003) avaliaram, durante seis anos, a eficácia de quatro sistemas de pavimentos permeáveis em uma área de estacionamento, como alternativas ao asfalto tradicional, e verificaram mesmo com o uso diário, os sistemas não mostraram grandes desgastes na capacidade de água infiltrada ou mesmo na sua estrutura. Além disso, os autores verificaram que as águas do escoamento superficial apresentaram índices de contaminação significativamente maiores que o das águas infiltradas, através dos sistemas de pavimentos permeáveis.

Em casos de alto nível de impermeabilidade do solo, cotas elevadas do lençol freático e baixa permeabilidade do solo, esta técnica não é viável, entretanto poderá ser utilizada como reservatório de detenção sendo instalados tubos perfurados na camada drenante para o escoamento das águas.

3.2.2.2.3 Bioretenção

São reservatórios que buscam gerenciar e tratar o escoamento das águas pluviais, onde em uma área escavada, há o preenchimento com material granular de alta permeabilidade e material orgânico, que trazem benefícios para as diversas

funções do sistema (retenção, filtração e infiltração). Além disto, é prevista uma faixa de grama, em volta do dispositivo, com o propósito de frear a velocidade das águas e filtrar elementos prejudiciais ao sistema. Em seu interior, há uma área alagável na qual a vegetação e o solo são capazes de acumular água, além de auxiliar na infiltração, evapotranspiração e prevenção de erosões.

Os sistemas de bioretenção valorizam a desconexão de áreas impermeáveis, dirigindo as águas escoadas para seu interior, de forma a contribuir no manejo das águas pluviais, proporcionando benefícios ambientais, paisagísticos e econômicos. Segundo Mello *et al.* (2014), atualmente os sistemas de bioretenção mais conhecidos são os jardins de chuva (figura 5).

Melo *et al.* (2014) realizaram um estudo experimental de um jardim de chuva na cidade de Recife, avaliando as funções de retenção, armazenamento e infiltração da água da chuva proveniente de um telhado. Devido a elevada taxa de infiltração na superfície do jardim de chuva (312 mm/h), não foi observado extravasamento da estrutura, tendo o sistema se mostrado eficiente no processo de detenção temporária com posterior infiltração, permanecendo assim mesmo para os casos de grandes volumes de precipitação.



Figura 5 - Exemplo de um jardim de chuva aplicado em Recife-PE
Fonte: Melo *et al.* (2014)

3.2.2.2.4 Valas de infiltração

As valas de infiltração (figura 6) são medidas de controle formadas de pequenas depressões lineares escavadas em solo, tendo sua superfície geralmente

preenchida com algum tipo de vegetação. Seu objetivo é de armazenar parte das águas durante as chuvas liberando-as através de infiltração.

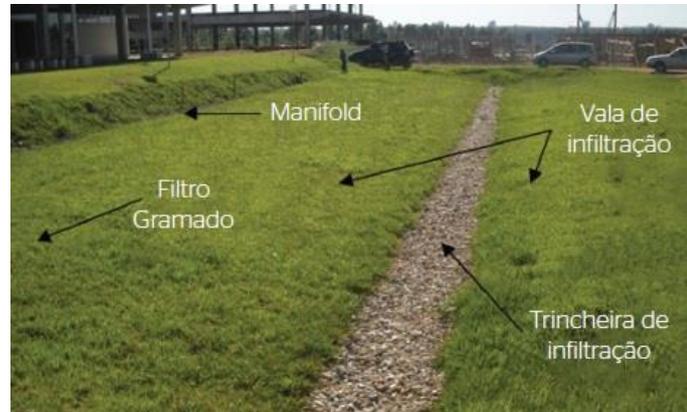


Figura 6 - Exemplo de uma vala de infiltração associada a uma trincheira de infiltração
Fonte: Guitierrez *et al.* (2010)

De acordo com suas dimensões elas também podem ser chamadas de:

- Valetas de infiltração, quando possuem pequena seção transversal;
- Planos de infiltração, quando suas dimensões longitudinais não são muito maiores que as transversais além de possuírem profundidades reduzidas.

De acordo com Baptista *et al.* (2005) existem relatos de sua utilização desde os anos 1970 em diversos países, sendo comumente utilizada junto ao sistema viário, principalmente em zonas rurais. Seu uso em estacionamentos é também bastante viável, uma vez que os espaços para a sua implementação podem ser utilizados como vagas de estacionamento, sem que as áreas de alagamento impeçam o trânsito de pedestres ou resultem em danos aos veículos.

A grande desvantagem desta técnica é a grande possibilidade de colmatação precoce do sistema, podendo haver estagnação da água e necessitar de frequente manutenção

O funcionamento das valas é bastante semelhante ao das trincheiras, onde o escoamento superficial é introduzido diretamente em sua estrutura através da ação da gravidade, ficando assim armazenado à superfície livre em seu interior. Sua evacuação pode ser tanto por infiltração como por deságue superficial no corpo receptor. Em alguns casos podem ser utilizados drenos em seu interior.

Por se tratarem, normalmente, apenas de uma depressão com um direcionamento para o escoamento dos volumes armazenados, este tipo de técnica chama bastante a atenção dado ao baixo custo de construção. Apresentando também entre suas vantagens, uma diminuição das vazões efluentes e rearranjo temporal dos hidrogramas.

Uma vez que o seu interior recebe diretamente o escoamento superficial, inclusive sólidos e resíduos em suspensão, este tipo de sistema deve passar por periódicas manutenções, para evitar possíveis estagnações de água e causar severas implicações sanitárias.

Em caso de o sistema utilizar-se de infiltração, deve-se também proceder uma distância de pelo menos um metro de profundidade em zona não saturada em relação ao lençol freático a fim de evitar possíveis contaminações.

A viabilidade de execução das valas de infiltração deve seguir os mesmos critérios observados nas trincheiras, exceto quanto a limitações dos espaços e quanto às inclinações, pois em casos de fortes declividades poderá haver perda do potencial de deposição dos sedimentos, perda do volume de detenção (sendo aceitável a compartimentação) e possibilidade de erosão das estruturas causadas por grandes velocidades de escoamento.

3.2.2.2.5 Poços de infiltração

São técnicas compensatórias pontuais de pequena ocupação, em que permitem a infiltração direta do escoamento superficial para dentro do solo. Ao contrário das trincheiras e valas de infiltração, em que é necessário que o solo possua boa permeabilidade próxima a superfície, os poços de infiltração permitem que se alcancem camadas permeáveis mais profundas, ampliando seu uso para os locais que possuem baixa permeabilidade nas áreas superficiais.

Possui uma integração com o ambiente urbano bastante harmoniosa, uma vez que por se tratar de um elemento pontual, sua presença é pouco perceptível.

Sua construção constitui-se basicamente de um poço escavado em solo, preenchido com brita ou outro material granular (figura 7), além de também serem utilizados tubos de concreto perfurado ou tijolos assentados a crivos. Preferencialmente deve-se utilizar uma membrana geotêxtil para fazer a interligação do poço como o solo.

Como quase todas as medidas de controle na fonte, deverá ser verificado nível do lençol freático e possibilidade de contaminação deste.

As restrições para a instalação dos poços de infiltração são:

- Não devem ser instalados em locais onde as águas escoadas são fortemente poluidoras;
- Não implantar poços muito profundos ou em regiões pouco permeáveis;
- Não devem ser instalados em locais com infiltração regulamentada visando a proteção do lençol freático.
- Deve-se tomar o cuidado com as fundações de edificações próximas de forma que a infiltração ou migração de finos para o interior dos poços, não modifique significativamente as condições do solo destas.

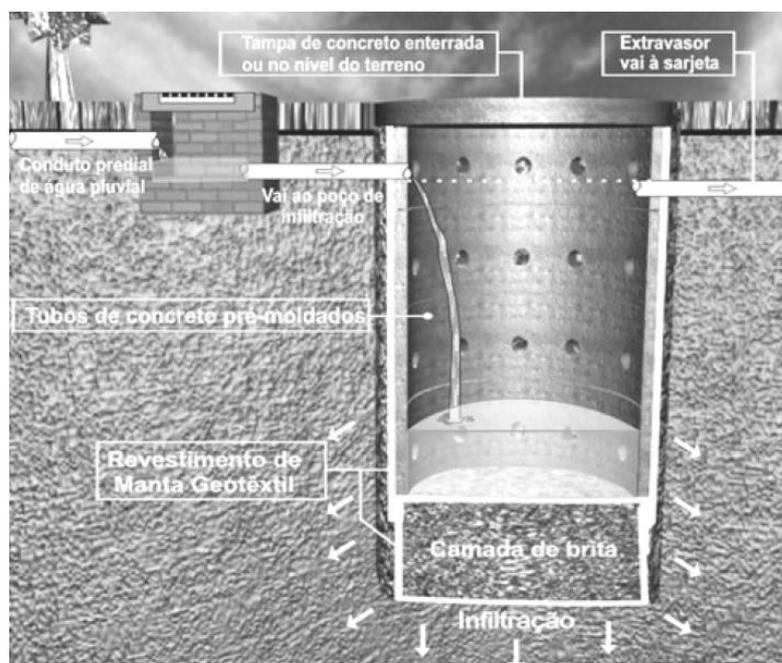


Figura 7 - Esquema de um poço de infiltração
Fonte: Reis et al, (2008)

Segundo Baptista *et al.* (2005), a manutenção dos poços deve ser feita semestralmente, contudo deve haver verificações constantes das câmaras de decantação e dos dispositivos filtrantes, principalmente após grandes precipitações, no intuito de constatar o seu funcionamento, devendo haver intervenções nos casos em que for detectada água estagnada por mais de 24 horas. Deverá ser feita uma substituição dos geotêxteis ou do material de enchimento quando for verificado que este já não funciona mais adequadamente.

Reis et al (2008) avaliaram, durante dez meses, o desempenho de um poço de infiltração experimental, com 1,10m de diâmetro interno e 1,30m de profundidade e um fundo preenchido com 30cm de brita nº1, construído na área do Laboratório de Sistemas Prediais da Universidade Federal de Goiás (UFG) com o intuito de obter parâmetros de projeto necessários para sua concepção. Observou-se que após enchimentos consecutivos, o poço foi capaz de infiltrar 1,70m³ em intervalos de 50 minutos a partir do quarto enchimento. Observou-se também que o geotêxtil utilizado no revestimento do fundo sofreu um processo de colmatação, perdendo 31,47% de sua capacidade de vazão, contudo o desempenho do poço não foi afetado pois a capacidade de vazão ainda continuou sendo superior a capacidade de infiltração do solo na região de instalação do poço.

3.2.2.2.6 Reservatórios de retenção e detenção

Trata-se de um dispositivo em que se armazenam as águas pluviais durante um certo tempo, diminuindo assim os problemas decorrentes durante a chuva (figura 8). Ao contrário dos reservatórios de retenção, os reservatórios de detenção possuem uma lâmina de água tendo sua qualidade mantida sob controle. Apesar de terem custos bem mais elevados, cerca de sete vezes maior, os reservatórios de detenção também podem ser do tipo fechado (PARKINSON et al, 2003).

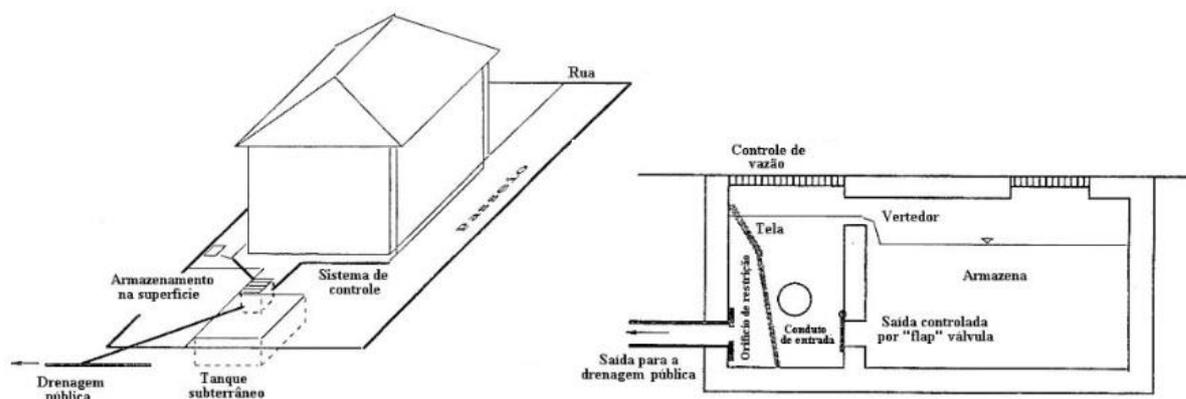


Figura 8 - Exemplo de um reservatório de detenção
Fonte: Tucci, (2001)

Uma outra alternativa destes sistemas são os reservatórios do tipo off-line, onde parte da vazão inunda lateralmente, retornam ao reservatório ou curso d'água. Este dispositivo apresenta como desvantagem o alto custo de manutenção, uma vez que de forma a permanecer com a mesma capacidade de reserva e/ou infiltração

deve-se promover limpezas periódicas, uma vez que durante as chuvas há um direcionamento de diversos tipos de resíduos sólidos e sedimentos disponíveis na bacia para seu interior.

3.2.2.2.7 Trincheiras de infiltração

São dispositivos lineares onde têm como princípio de funcionamento o armazenamento temporário das águas para serem posteriormente liberadas através da infiltração.

Constitui-se basicamente de uma vala escavada em solo e preenchida com material granular (figura 9), de porosidade em torno de 30% a 50%, geralmente pedra de mão, seixos ou brita, envoltos em uma membrana geotêxtil, para evitar a migração de partículas mais finas para o interior do sistema ou a sua precoce colmatagem, e que também trabalha como filtro anticontaminante.

Segundo Baptista *et al.* (2005), outros materiais podem ser utilizados para o enchimento das trincheiras, a exemplo de materiais sintéticos, como plásticos, com porosidade superior a 90%, porém devido ao seu alto custo, são utilizados apenas quando há pouca disponibilidade de espaço.

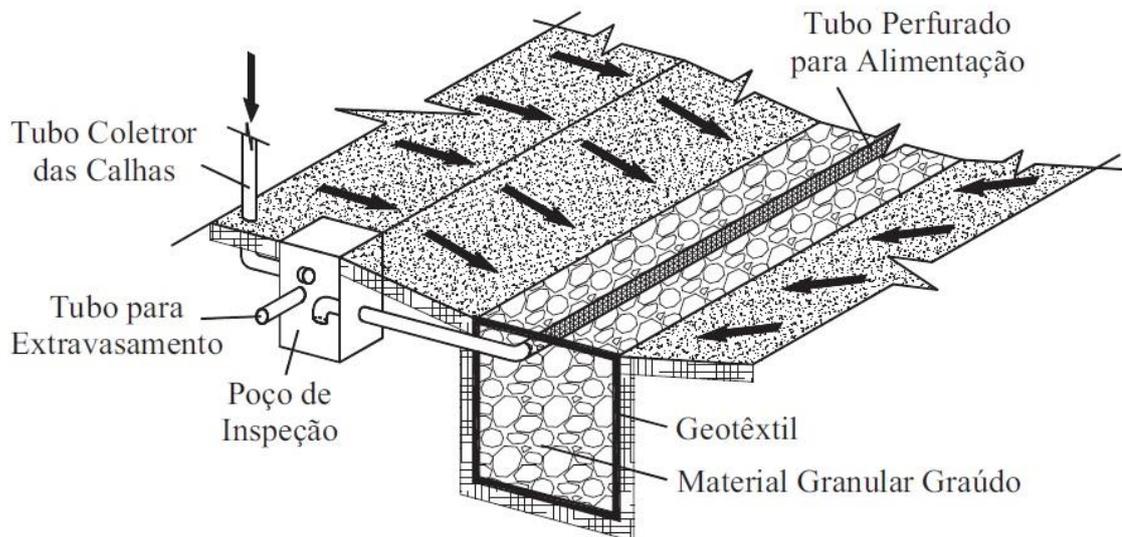


Figura 9 - Esquematização de uma trincheira de infiltração
Fonte: Peixoto, (2011)

Silva (2007) investigou a possibilidade de substituir parte do material de enchimento de trincheiras de infiltração por garrafas PET recicladas por ser um material abundante, barato e reciclável. Na investigação, as garrafas foram cortadas

ao meio e com a parte superior inserida na parte inferior e com furos na parte inferior. Cada uma das trincheiras recebeu um percentual diferente de garrafas PET (0%, 21%, 40% e 73%) sendo o restante preenchido com brita 2. O estudo constatou que para os modelos adotados, a substituição dos agregados por garrafas PET, houve uma redução de 4,4% até 2 % na sobrecarga e colapso do solo, porém houve um aumento de até 154% nos custos de construção das trincheiras, relacionando-o com o processamento manual das garrafas.

As trincheiras de infiltração ajudam na recarga do aquífero, reduzem o risco de inundação, e de poluição das águas superficiais, podendo eliminar o uso de redes de macrodrenagem no local.

Segundo Baptista *et al.* (2005), as trincheiras já são usadas há muitos anos em todo o mundo, tendo sido adotadas no Japão para a evacuação de águas provenientes de castelos e templos antigos. Seu uso é comum em lugares como os Estados Unidos, Austrália e diversos países europeus.

No seu funcionamento as águas entram no sistema através de sua superfície, ou através de um sistema de drenagem local e evacua através do processo de infiltração no solo pelas paredes laterais ou do fundo, neste caso ela será considerada trincheira de infiltração; Caso não exista infiltração, ela será considerada trincheira de detenção, onde as águas do seu interior são liberadas para o meio natural a jusante através de uma tubulação no fundo da mesma, ou por meio de um dispositivo de deságue no sistema de drenagem. Pode possuir alimentação direta, quando o acesso das águas superficiais ao dispositivo é através de sua superfície, ou indireta quando este se dá por meio de um sistema convencional de drenagem, que conduz as águas diretamente para o seu interior.

Para Baptista *et al.* (2005), o uso de trincheiras de infiltração proporciona diversos benefícios hidrológicos e ambientais, como:

- Alívio no sistema de drenagem, com a redução do escoamento superficial;
- Rearranjo do hidrograma temporal, melhorando as condições do escoamento a jusante;
- Redução dos custos dos sistemas de drenagem convencionais, ou a sua total eliminação;
- Recarga do lençol freático;

- Melhoria da qualidade das águas de origem pluvial.

O uso de mantas geotêxteis contribui para a melhoria de qualidade das águas, uma vez que boa parte dos poluentes difusos de origem pluvial ficam usualmente retidos na manta. Porém, como forma de evitar o risco de poluição do lençol recomenda-se que se mantenha uma distância vertical mínima de um metro de profundidade em zona não saturada em relação ao lençol freático (BAPTISTA et al, 2005).

Especial atenção deve ser dada a declividade do terreno na implantação das trincheiras, pois em caso de declividades altas haverá uma limitação do volume útil de armazenamento (figura 10), contudo isto não constitui impedimentos para a sua implantação, pois podem ser implantadas barreiras internas ou divisórias para aumentar sua capacidade de armazenamento (figura 11). Uma forma de evitar-se grandes inclinações em trincheiras é que esta se posicione preferencialmente perpendicularmente ao sentido do escoamento da água sobre a superfície drenada, paralelas às curvas de nível.

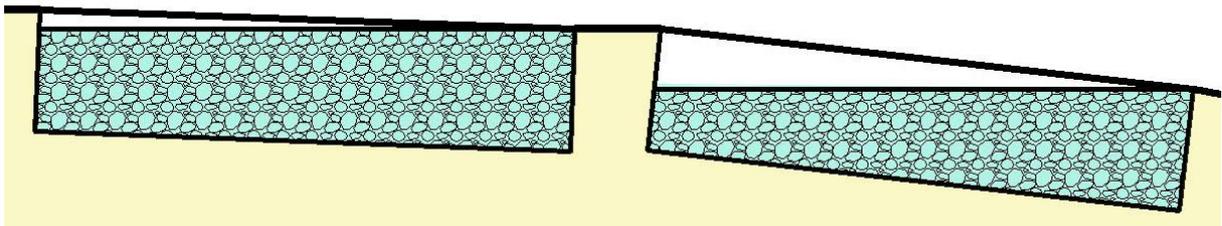


Figura 10 - Redução do volume útil em grandes inclinações
Fonte: Elaborada pelo autor

Baptista *et al.* (2005) relatam que alguns cuidados devem ser tomados na aplicação deste sistema, dentre eles:

- Distância do lençol freático de pelo menos 1,00m, para não diminuir sua capacidade no caso de as águas invadirem parte da estrutura ou para proteger o lençol de uma poluição em potencial;
- A composição geológica do solo ou características geotécnicas não apresentem nenhuma contraindicação que poderia danificar obras próximas;
- As trincheiras não devem estar próximas de áreas de captação de água potável;

- Não devem ser instalados em aterros ou terrenos com grande declividade;
- Evitar seu uso em zonas próximas a fontes potenciais de poluentes (postos de combustíveis, armazenamento de produtos químicos e outros). Também se desaconselha o uso em locais que no passado tenha abrigado alguma atividade muito poluente.
- As águas escoadas não devem possuir grande quantidade de materiais finos para não comprometer o funcionamento hidráulico da estrutura com a colmatação do sistema.
- A taxa de infiltração do solo saturado deve ser superior a 8mm/h.

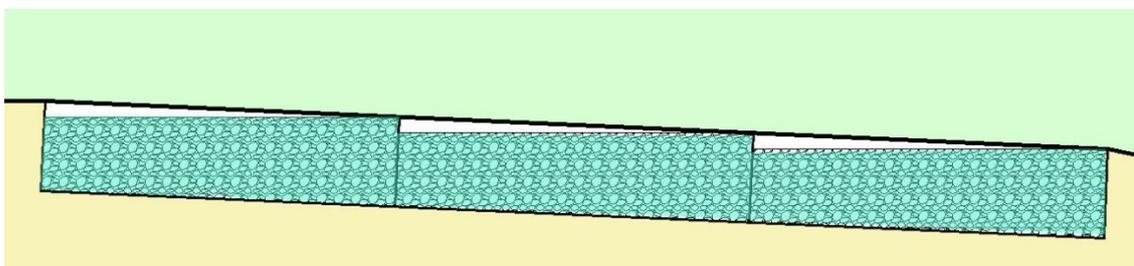


Figura 11 - Trincheiras em declive com divisórias
Fonte: Elaborada pelo autor

Em sua manutenção devem ser tomadas medidas para que se evite a colmatação da estrutura, onde a interface obra-solo sofre modificações devido ao depósito no fundo do dispositivo de materiais em suspensão nas águas pluviais, ou mesmo a penetração nas faces laterais, reduzindo a condutividade hidráulica devido a obstrução das faces de infiltração e conseqüentemente o colapso do funcionamento hidráulico do sistema. Além disso, deve-se tomar cuidados no entorno das trincheiras, através da limpeza dos poços de entrada, dos filtros, dos elementos de descarga (caso existam), conservando áreas verdes de forma a evitar a invasão de raízes para seu interior ou que restos de vegetação entrem na trincheira.

Moura (2004), realizou uma pesquisa buscando definir indicadores econômicos financeiros para avaliação, a priori, de sistemas de drenagem urbana e a integração destes indicadores com indicadores de desempenho. Em sua análise foram construídas composições de custos de trincheiras de infiltração com 0,60m de largura, 1,15m de profundidade que se encontram apresentados na tabela 3

Tabela 3 - Composição de custos de um metro linear de uma trincheira

Tipo de serviço	Unidade	Custo unitário (R\$)	Quantidade	Custo total (R\$)
escavação e carga mecanizada	m ³	3,84	0,78	3,00
transporte de material escavado	m ³ x km	0,60	10,14	6,08
reaterro	m ³	14,01	0,78	10,93
material de preenchimento	m ²	40,92	0,78	31,92
geotêxtil	m ²	4,72	3,7	17,46
grama	m ²	17,12	2	34,24
dreno	m	11,08	1	11,08
Total	m			114,71

Fonte: Moura (2004) com valores atualizados

Dimensionamento

Para não tornar complexo um estudo de alternativas de projeto, que podem envolver arranjo com várias medidas de controle na fonte, a sua prática em obras pluviais de pequeno porte exige métodos simples e confiáveis de dimensionamento (SILVEIRA e GOLDENFUM, 2007).

Um dos métodos mais utilizados para o dimensionamento de estruturas de armazenamento e percolação é o método “*rain envelope method*” ou “método envelope de chuva” que se baseia na determinação da máxima diferença entre o volume afluente e efluente de uma trincheira. O volume da trincheira deverá ser suficiente para armazenar a máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e de saída do dispositivo, levando-se em conta a porosidade do material de enchimento.

Este método, segundo Lima (2009), apresenta algumas desvantagens, onde para Graciosa *et al.* (2008), o volume infiltrado é estimado de acordo com a formulação de Darcy para solo saturado, subestimando assim a sua capacidade de infiltração, pois considera a taxa de infiltração do solo como sendo constante e igual a taxa de infiltração na situação limite.

A curva de volumes de entrada é construída com base na curva IDF da área de estudo e os volumes de saída são encontrados através das características de infiltração e percolação do solo e da área disponível do dispositivo para infiltração e percolação.

O cálculo do escoamento pode ser realizado através do método Racional uma vez que as estruturas de infiltração são utilizadas principalmente em pequenas

bacias. Sendo assim, o volume afluente no dispositivo será obtido através da multiplicação da vazão pelo tempo (equação 1).

$$V_T = 3600. C. \left(\frac{I_T}{100} \right) . t. A \quad (1)$$

Em que:

V_T =Volume total escoado no tempo t para uma precipitação de T anos de retorno (m^3);

C =coeficiente de escoamento

I_T =intensidade da precipitação de T anos de retorno (L/s/ha);

t =duração da precipitação (h);

A =área da bacia de contribuição (ha)

Em estudos realizados por Sjoberg e Martensson (1982 *apud* Urbonas e Stahe, 1993) verificou-se que um acréscimo de 25% ao volume calculado pelo método racional pode obter valores mais precisos. Este acréscimo deve-se ao fato de que durante seus estudos notou-se que o escoamento dos blocos únicos de precipitação diferia dos resultados obtidos utilizando simulação contínua com registros cronológicos de precipitação. Assim a equação 1 pode ser reescrita conforme a equação 2.

$$V_T = 1,25. \left[3600. C. \left(\frac{I_T}{100} \right) . t. A \right] \quad (2)$$

Na obtenção do volume de saída da trincheira a lei de Darcy será considerada para estimar a taxa de água percolada. Considerando o tempo que a estrutura leva para encher e esvaziar, pode-se aproximar a taxa média da saída da água como sendo a média dos volumes de saída para o enchimento e o esvaziamento do dispositivo. Considerando a situação mais crítica para funcionamento da estrutura, como sendo a de solo totalmente saturado, obtém-se o gradiente hidráulico unitário e a Lei de Darcy resulta na equação 3 para a determinação da vazão de saída da estrutura:

$$V_{perc}(t) = k. \nabla \phi. \frac{A_{perc}}{2} . 3600. t_p \quad (3)$$

Em que:

$V_{perc}(t)$ = volume de água percolado no solo (m^3);

k = condutividade hidráulica do solo (m/s);

$\nabla\phi$ = gradiente hidráulico na direção vertical;

A_{perc} = área total dos lados da estrutura de percolação (m^2);

t_p = tempo de percolação (h)

Segundo Souza (2002), os dispositivos de infiltração devem ser dimensionados com uma considerável margem de segurança, dada a grande dificuldade em se determinar a condutividade hidráulica (k), bem como sua variabilidade no espaço, o risco de colmatção e a incerteza nos métodos de dimensionamento. Urbonas e Stahre (1993) recomendam que se reduza a condutividade hidráulica, através de um fator de segurança, uma vez que os solos tendem a se tornar gradualmente colmatados com o tempo, o que reduz a condutividade disponível.

De acordo com Mikkelsen (1978 *apud* Souza, 1991) o volume do dispositivo será obtido pela máxima diferença entre o volume afluyente e o volume de saída da trincheira (equação 5).

$$V = \text{máx}[V_T(t) - V_{perc}(t)] \quad (4)$$

$$V = \text{máx}\left[1,25 \cdot 3600 \cdot C \cdot \left(\frac{I_T}{100}\right) \cdot t \cdot A - k \cdot \nabla\phi \cdot \frac{A_{perc}}{2} \cdot 3600 \cdot t_p\right] \quad (5)$$

Dividindo ambos os lados da equação 5 por $C \cdot A$, obtém-se a equação 6:

$$D = \text{máx}\left[4,5 \cdot I_T \cdot t - 3,6 \cdot E \cdot t\right] \quad (6)$$

Em que:

$$D = \frac{V}{C \cdot A} \quad (7)$$

$$E = 1000 \cdot k \cdot \frac{\frac{A_{perc}}{2}}{C \cdot A}$$

(8)

O parâmetro D é o volume específico de percolação e que representa o volume de armazenamento em m^3 por cada hectare de área impermeável de

contribuição e o parâmetro E representa a vazão específica de saída da bacia, em l/s por hectare de área impermeável de contribuição.

Através da derivação da equação 5 com relação ao tempo, pode-se obter o volume e a duração crítica da chuva para o dispositivo de acordo com a curva IDF da área em estudo:

$$V_d = \text{máx}[V_e - V_s] \quad (9)$$

$$\Rightarrow V_d = V_e - V_s \quad (10)$$

$$\text{Se } \frac{d(V_e - V_s)}{dt} = 0 \quad (11)$$

Em que:

V_d =Volume de dimensionamento;

V_e =Volume acumulado de entrada;

V_s =volume acumulado de saída.

No dimensionamento das trincheiras de infiltração, a escolha das dimensões do dispositivo é feita de modo a fixar um comprimento, conforme limitações e dimensões do terreno, e uma largura, normalmente entre 60cm e 100cm. restando apenas a profundidade a ser calculada conforme a área disponível. Em todo o mundo, considera-se diferentes situações para a área efetiva de infiltração (tabela 4), contudo aqui no Brasil, desconsidera-se o fundo pois este sofre rápida colmatação, assim, na escolha das dimensões, a trincheira deve ter maior profundidade que largura, devido a colmatação do fundo.

Tabela 4 - Hipóteses para colmatção da superfície em diversos países.

País	Hipótese
Dinamarca, EUA e Suécia	Não há infiltração no fundo e nas laterais ocorre em apenas 1/2 altura.
Alemanha e Suíça	Há infiltração no fundo e nas laterais ocorre apenas em 1/2 altura.
Holanda	Se não houver pré-tratamento, o fundo é suposto colmatado e há infiltração em 1/2 altura, caso contrário considera-se toda a altura.
Japão	Todas as superfícies infiltram

Fonte: Baptista et al. (2005)

3.3 Modelos hidrológicos

Os modelos apresentam-se com ferramenta de representação simplificada de uma realidade com o propósito de auxiliar o entendimento dos processos que a envolvem, permitindo assim a sua previsão. Através deles são realizados diversos estudos ambientais que ajudam a compreender os diversos impactos causados pelo uso e ocupação do solo e prever futuras alterações nos ecossistemas.

Desde o início da utilização de computadores nos anos de 1960, os primeiros modelos hidrológicos computacionais começaram a ser utilizados, e de lá para cá inúmeros modelos foram propostos para a simulação da água nas diversas fases do ciclo hidrológico. Para Belling (2013) a integração do uso de computadores nos modelos hidrológicos com os sistemas de informações geográficas e com os dados de monitoramento ambiental representam uma poderosa ferramenta para a gestão integrada da paisagem urbana.

Um modelo hidrológico trabalha relacionando diversos processos físicos observados no meio ambiente (precipitação, infiltração, escoamento superficial e armazenamentos, por exemplo), onde com base no conhecimento de algumas variáveis (entradas) envolvidas neste processo, é possível a obtenção de outras de interesse (saídas) no estudo (BELLING, 2013).

3.3.1 SWMM

O Storm Water Management Model – SWMM é um modelo dinâmico chuva-vazão, produzido pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial.

Desde que foi desenvolvido em 1971 por Metcalf & Eddy, pela Universidade da Florida e pela Water Resource Engineers (WRE) com o patrocínio da United States

Environmental Protection Agency (US EPA) o modelo já passou por várias modificações com uma segunda versão em 1975 e uma terceira em 1981. A quarta versão foi desenvolvida em linguagem FORTRAN e era dividida em módulos de simulação: Runoff que gerava o escoamento superficial, Transport que responsável pela propagação do escoamento através da rede de drenagem pelo método da onda cinemática, Extran, que realizava a simulação hidráulica através de método hidrodinâmico e Storage/Treatment que era responsável pela simulação de processos de tratamento e armazenamento. Esta versão foi lançada em 1988, e mesmo após o lançamento da versão 5 em 2004, continuou sendo utilizada em alguns trabalhos recentes como os de Chow *et al.* (2012) e Wang e Altunkaynak (2012) (BELING, 2013). Hoje encontra-se na quinta versão do programa, funcionando sob a plataforma Windows®, proporcionando um ambiente integrado que permite a entrada de dados da área de estudo.

Esta última versão foi totalmente reescrita em linguagem C onde houve a eliminação da compartimentação que exigia a execução dos blocos de simulação. Ao contrário das versões anteriores o modelo que é executado em uma interface gráfica conta com uma versão que roda em linha de comando e trabalha com entradas e saídas em formato texto (BELING, 2013).

Por possuir um código fonte aberto, é possível encontrar diversos programas que realizaram modificações no algoritmo do SWMM ou que integrem com interfaces GIS ou CAD. Dentre eles, há o software UFC-8, para cálculos de redes de microdrenagem, desenvolvido sob a coordenação do Prof. Marco Aurélio de Holanda e Castro no Laboratório de Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Ceará. Além deste, há versões comerciais tais com o PCSWMM desenvolvido pela canadense CHI Water e que traz consigo uma grande variedade de ferramentas que facilitam a entrada de dados e conferência dos resultados.

Nesta última versão, também foram incluídas algumas ferramentas no SWMM, que permitem modelar o desempenho hidrológico de alguns tipos específicos de Medidas de controle de baixo impacto (LID):

- Bacia de infiltração;
- Trincheira de infiltração;
- Pavimento Poroso;
- Cisterna;

- Valas de infiltração.

Através dele é possível realizar simulações dos comportamentos hidrológicos e hidráulicos, além de estimar a qualidade da água e visualizar os devidos resultados em uma variedade de formatos. É um modelo amplamente utilizado em todo o mundo para o planejamento, análise e projeto relacionado ao escoamento de águas pluviais, esgotos sanitários, e outros sistemas de drenagem nas áreas urbanas. Apesar de suas limitações ele também tem sido usado para modelar as áreas não-urbanas.

Segundo Rossman (2010), o modelo é capaz de representar diversos processos hidrológicos, tais como:

- Precipitações variáveis no tempo;
- Evaporação de águas empoçadas;
- Acumulação e degelo da neve;
- Interceptação de chuvas causadas pelo armazenamento em depressões;
- Percolação e infiltração da água em aquíferos;
- Troca entre o fluxo da água subterrânea e o sistema de drenagem;
- Infiltração das precipitações em solos não saturados;
- Propagação do escoamento superficial via modelo do reservatório não linear.

Na parte hidráulica, apresenta diversas ferramentas de modelagem utilizadas para a condução do fluxo decorrente de escoamento superficial através de redes de tamanho ilimitado, utilizando uma grande variedade de condutos, abertos ou fechados, além de ser capaz de modelar elementos especiais como unidades de armazenamento e tratamento.

O SWMM considera o escoamento superficial como se cada subbacia fosse um reservatório (figura 12) não linear de largura W e capacidade d_p , que representa as perdas que a água precipitada sofre antes de escoar superficialmente, incluindo as perdas superficiais do armazenamento, umedecimento e interceptação. Caso o total precipitado exceda a capacidade d_p , haverá então o escoamento superficial Q . Desta forma, pode-se obter a profundidade da água no reservatório para cada passo de tempo do algoritmo, combinando a equação de Manning com a equação da

continuidade e resolvendo a equação diferencial não linear através de processo iterativo de Newton Raphson (equação 12).

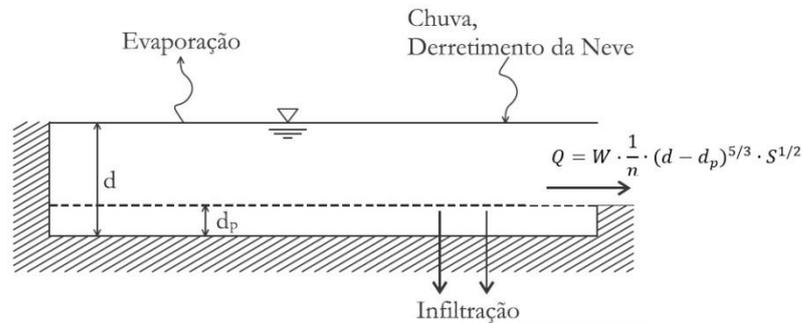


Figura 12- Visão Conceitual do Fenômeno do Escoamento no SWMM
Fonte: ROSSMAN (2010)

$$\frac{dd}{dt} = i_e - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (12)$$

Em que:

W é a largura representativa da sub-bacia em metros;

n é o coeficiente de rugosidade de Manning em $m \cdot s^{-1/3}$;

A é a área da sub-bacia em metros quadrados;

d_p é a altura de armazenamento por depressão em metros;

i_e é a precipitação efetiva (medida da altura da parcela da chuva caída que provoca o escoamento superficial) em metros por segundo;

d é a profundidade da água no reservatório em metros;

t é a duração da precipitação;

S é a declividade em metros por metros.

A infiltração, o processo pelo qual a água da chuva penetra nas camadas do solo até as regiões não saturadas das subbacias permeáveis, preenchendo seus vazios sob a ação da gravidade, pode ser trabalhada no SWMM através dos modelos de Green-Ampt, Horton e pelo método da curva número. Abaixo segue uma breve exposição de cada um deles.

Equação de Horton. Método que se baseia em observações empíricas onde a infiltração decresce exponencialmente de um valor máximo inicial até um valor mínimo durante um evento de chuva. A expressão apresentada por Horton (1945) é descrita conforme a equação 8.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k_f t} \quad (13)$$

Em que:

f é a capacidade de infiltração no tempo em metros por segundo;

f_c a capacidade mínima de infiltração em metros por segundo;

f_0 a capacidade de infiltração inicial em metros por segundo;

t_s o tempo decorrido desde a saturação superficial do solo (s);

k_f o coeficiente experimental de caída exponencial.

Conforme Horton (1945 *apud* Lucas 2011) apenas quando a intensidade de chuva (ou outra forma de alimentação de água) for superior a taxa de infiltração será determinada a capacidade máxima de infiltração de água pelo solo. Porém a curva de decaimento da capacidade de infiltração (figura 13) pode não ocorrer em situações em que o solo já tenha atingido sua capacidade mínima de infiltração.

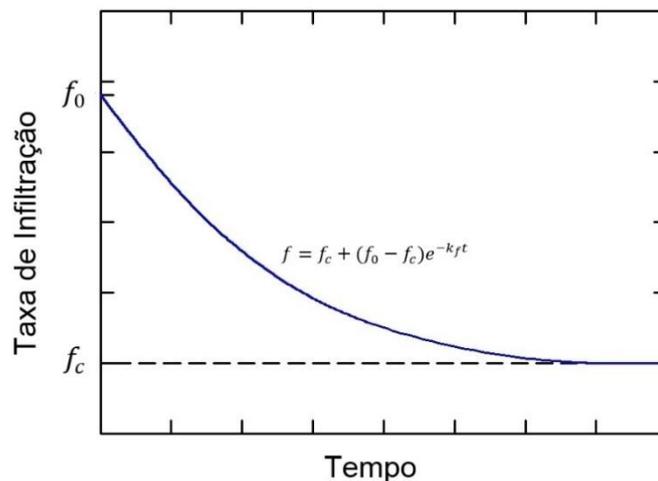


Figura 13 - Curva de infiltração
Fonte: Lucas, 2011 - Adaptado

Os parâmetros de entrada no SWMM para este método são as taxas de infiltração máxima e mínima, o coeficiente de decaimento e tempo que o solo leva para ir de completamente saturado para completamente seco.

Método de Greem-Ampt. Este método foi inicialmente proposto em 1911, baseado na Lei de Darcy, onde considera-se o solo homogêneo, com teor de umidade inicial que permanece constante. Segundo Lucas (2011), neste modelo o solo é

considerado saturado da superfície à profundidade da frente de molhamento e a permeabilidade é constante assumindo o escoamento vertical, onde à medida que a frente de umidade se aprofunda estas condições permanecem. A equação de Green e Ampt é apresentada na equação 14.

$$f = K \left(\frac{h + L_u - \phi_m}{L_u} \right) \quad (14)$$

Em que:

f é a capacidade de infiltração em metros por segundo;

K é o coeficiente e permeabilidade em metros por segundo;

ϕ_m é o potencial matricial da frente de molhamento em metros;

h é a carga hidráulica em metros;

L_u é a distância entre a superfície e a frente de umidade em metros.

No SWMM os parâmetros de entrada são: a capacidade de sucção por capilaridade na camada úmida, déficit inicial de umidade no solo e condutividade hidráulica do solo.

Curve Number. Trata-se de uma aproximação do método do NRCS, onde assume-se que a capacidade de infiltração total pode ser estimada com o CN tabelado. Tal capacidade é reduzida em função da precipitação acumulada e capacidade remanescente. Os parâmetros necessários para o uso desse método no SWMM são: o CN e o tempo que leva um solo saturado para secar completamente.

O fluxo do escoamento gerado nas subbacias é direcionado para outras sub-bacias ou para canais e condutos, os quais são regidos pelas equações de massa e da quantidade de movimento e para fluxo gradualmente variado não permanente (equações de Saint Venant). Desta forma, no SWMM o usuário pode escolher três métodos de propagação de vazão.

- Método da onda dinâmica – Por resolver as equações completas unidimensionais de Saint Venant, este método deve, pelo menos teoricamente, produzir os resultados mais precisos. Nela há uma aplicação da equação da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos e da continuidade de volume nos nós.

As equações de Saint Venant são obtidas pelas equações do momentum (equação 15) e da continuidade (equação 16).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot A \cdot S_0 - g \cdot A \cdot S_f \quad (15)$$

Em que :

Q é a vazão [$L^3.T^{-1}$];

A é a área [L^2];

t é o tempo [T];

g é a aceleração da gravidade [$L.T^{-2}$];

S_0 é a inclinação do canal [$L.L^{-1}$];

S_f é a inclinação da linha de energia [$L.L^{-1}$];

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = q_L \quad (16)$$

Em que:

A_w é a área molhada [L^2];

Q é a vazão [$L^3.T^{-1}$];

t é o tempo [T];

l é a distância longitudinal [L];

q_L é a contribuição lateral por largura [$L^3.T^{-1}.L^{-1}$].

Neste modelo pode-se levar em conta o armazenamento nos condutos, o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas dos condutos, o remanso e fluxo sob pressão. É o método de resolução ideal para sistemas onde há importância dos fenômenos de ressalto hidráulico e remanso, causados por controles a jusante ou por elementos de regulação.

- Método da onda cinemática – este modelo de transporte hidráulico resolve a equação da continuidade juntamente com a equação de movimento simplificada da equação da quantidade de movimento para cada um dos condutos, desprezando os termos de inércia e de pressão. Permite que a vazão e a área variem no tempo e espaço no interior do conduto, com isto podem ocorrer amortecimento e defasagem nos hidrogramas de saída em relação aos hidrogramas de entrada nos condutos. Contudo, não se pode simular efeitos como ressalto

hidráulico, perdas nas entradas e saídas, o efeito do remanso ou o fluxo pressurizado.

- Método de fluxo constante – Representa a forma mais simples de transporte de água, assumindo que dentro de cada passo de tempo o escoamento é uniforme e constante. O hidrograma de entrada no nó de montante do conduto é apenas transferido para o nó de jusante, sem atraso ou mudança na sua forma. Dada a sua simplicidade é um método indicado apenas para análises preliminares.

Todos estes métodos de transporte hidráulico, utilizam a equação de Manning, exceto o caso dos escoamentos pressurizados em condutos circulares que utilizam as equações de Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach.

Pode-se encontrar na literatura diversos estudos realizados aplicando o SWMM, dos quais alguns são sucintamente comentados.

Warwick e Tadepalli (1991) investigaram a capacidade do SWMM em prever hidrogramas para uma bacia em Dallas no Texas com área de drenagem de 25,9 km² e 30% de áreas impermeáveis, tendo como principal objetivo analisar a habilidade do modelo em realizar uma simulação hidrológica ajustando apenas dois parâmetros separadamente (armazenamento em depressões permeáveis e a porcentagem de superfícies impermeáveis). A calibração dos parâmetros foi realizada manualmente e observou-se que os hidrogramas de resposta apresentaram desvios consideráveis quando comparados aos hidrogramas observados. É importante ressaltar que neste estudo a bacia hidrográfica foi representada de forma simplificada para os três níveis de discretização da bacia propostos e apenas dois parâmetros foram devidamente ajustados.

Hsu *et al.* (2000) simularam uma inundação devido à sobrecarga de vazão em Taipei, Taiwan, combinando o SWMM a um modelo bidimensional. Utilizou-se uma inundação ocorrida em 1998, que ocasionou diversos problemas à cidade, adotando o SWMM para calcular o escoamento através do sistema de águas pluviais e os hidrogramas das bocas-de-lobo afetadas pela vazão excedente à capacidade dos sistemas. Seus resultados mostraram que grande parte das regiões inundadas pode ser prevista e podem auxiliar órgãos governamentais a prevenir os problemas decorrentes das inundações nestas áreas.

Jang et al (2007) avaliaram o impacto hidrológico causado pelos efeitos da urbanização, utilizando o SWMM. Para realizarem o trabalho, os autores fizeram uma

modelagem para duas condições: pré e pós desenvolvimento, em três diferentes bacias na Coréia (Seolmacheon com 8,51km², Weecheon com 33,63km² e Pyungchag River com 55,93km²). Seus resultados para os picos de vazão foram considerados favoráveis, muito próximo dos observados. Para o trabalho foram utilizados parâmetros estimados disponíveis e valores sugeridos pela literatura.

4 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa, sendo descritos nas subseções seguintes, de forma pormenorizada, os procedimentos adotados desde as atividades iniciais até o resultado final do modelo, para os dois cenários de estudo.

Esta pesquisa trata-se de um trabalho de natureza computacional em que foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- SWMM 5.1.009 – Storm Water Management Model, modelo de simulação chuva-vazão;
- Autocad 2012 – Software do tipo CAD, desenho assistido por computador;
- UFC8 – Aplicativo Autocad para dimensionamento de redes de drenagem.

4.1 Local do estudo

O município de Crato encontra-se localizado ao sul do estado do Ceará, a uma distância de 569 km da capital do estado, possuindo segundo o IBGE uma área territorial de 1.176 km², para uma população de 121.428 pessoas. Segundo Moreira (2013), o município do Crato é considerado uma área de grande relevância econômica no estado, tendo destaque as áreas de comércio e turismo. Teve sua origem num núcleo dos silvícolas fundado pelo frei Carlos Maria Ferrara localizado às margens do rio Itaitera.

Em março de 1762 criou-se uma Paróquia na aldeia Miranda, sob invocação de Nossa Senhora da Penha, e em agosto do ano seguinte, foi criada a vila, sendo inaugurada em 1794 com a denominação de Crato (7ª vila do Ceará) (MOREIRA, 2013).



Figura 14 - Bairro Mirandão em Crato-CE
 Fonte: Google Earth com adaptações (2015)

Escolheu-se o bairro Mirandão (figura 14) por este vir passando por urbanizações recentes (figuras 15a, 17b, 16a e 16b) e encontrar-se distante de outras áreas urbanizadas, minimizando assim as influências do escoamento superficial das localidades a montante deste. O bairro iniciou-se nos anos de 1980 com a construção de um conjunto habitacional (figura 15a) nas proximidades do estádio de futebol da cidade, o Mirandão, ficando assim por anos até que em 2009 um terreno por trás da área existente sofreu o parcelamento de solo com a criação de um empreendimento imobiliário que vem sendo ocupado cada vez mais, ano após ano.

A cidade de Crato-CE através da sua Lei Nº 2.590, de 22 de dezembro de 2009, que trata do Zoneamento Urbano estabelece que o Bairro do Mirandão, região de estudo com 29,31ha, se encontra situada na Zona Residencial ZR9, caracterizando-a como sendo uma área de baixa densidade habitacional, com 100

hab./ha, em que estabelece diversos critérios para novas construções, sendo de interesse neste estudo apenas o percentual permeável mínimo permitido por lote como sendo de 30%, por ter influência direta no escoamento superficial.



a) b)
Figura 15 - Bairro Mirandão em a) 22/11/2005 b) 21/08/2009
Fonte: Google Earth (2015)



a) b)
Figura 16 - Bairro Mirandão a) 09/02/2013 b) 01/01/2014
Fonte: Google Earth (2015)

4.2 Modelagem no SWMM

Um exemplo de uma simulação de uma drenagem urbana com os principais objetos físicos deste estudo, pode ser visto através da figura 17, em que uma tormenta de projeto (CH1) cai sobre determinadas subbacias (SB1, SB2 e SB3), gerando um escoamento superficial que é conduzido através de condutos (C1, C2 e C3), ligados por nós (NO1, NO2 e NO3), até um exutório final (EX1). Cada um destes elementos físicos possui uma quantidade mínima de parâmetros que devem ser informados através de interfaces visuais, para que a simulação possa ser realizada.

Apesar das informações relativas às dimensões, áreas das sub-bacias e comprimento dos condutos, poderem ser obtidas automaticamente através do uso de uma imagem de fundo, não se utilizou deste procedimento, pois dependendo da habilidade do operador e da imagem de fundo, o seu uso pode gerar alguns erros.

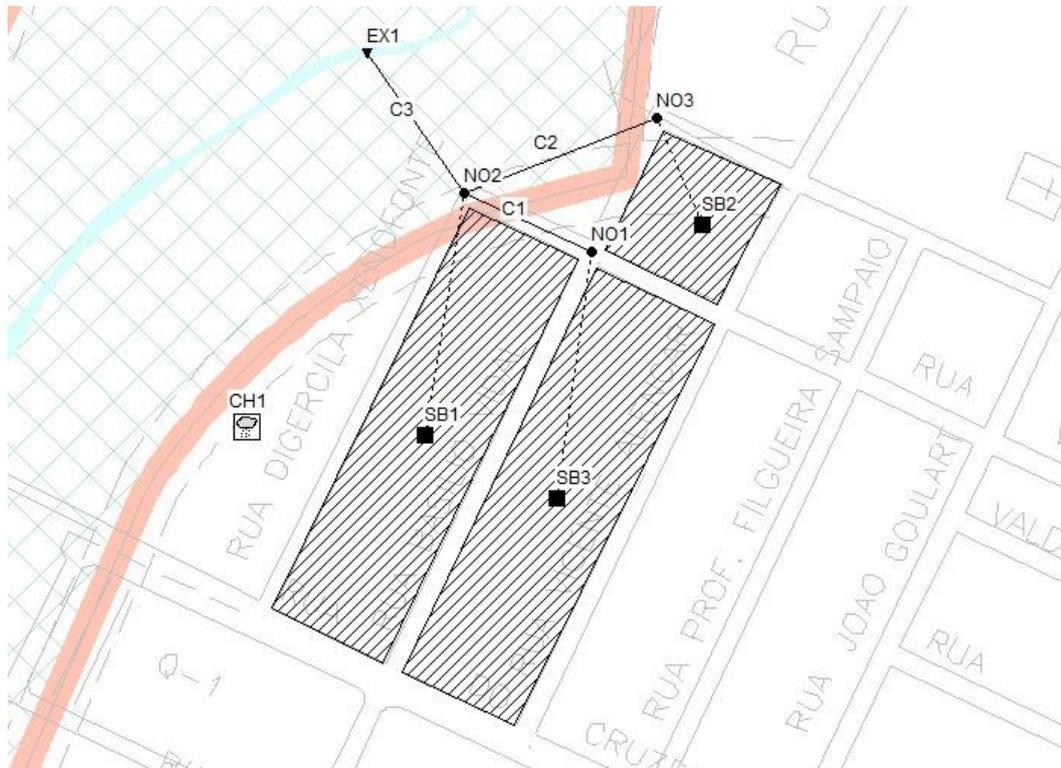


Figura 17 - Exemplo de drenagem SWMM
Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.1 Sistema UFC8

No SWMM, utilizando uma imagem de fundo, é possível que os dados físicos de entrada sejam retirados automaticamente, contudo este recurso deve ser utilizado com cautela, pois por ele não dispor de um dispositivo que fixe os vértices das subáreas como sendo os mesmo do mapa de fundo, tal qual o AutoCAD faz com o uso dos objetos OSNAP, pode-se cometer alguns erros de precisão nestes dados e que irão interferir nos resultados. Por este motivo, utilizou-se o sistema UFC8, que funciona através de um aplicativo do AutoCAD, para dimensionamento de redes de drenagem e que também faz a integração com o SWMM.

Desenvolvido no Laboratório de Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Ceará, o sistema UFC8 foi escrito quase que totalmente na linguagem interna do AutoCAD, a AutoLISP, sendo também utilizado o VBA (Visual Basic Applications) para planilhas de dimensionamento e quantitativos do software (BEZERRA e CASTRO, 2009).

Com a sua instalação o software gera uma palheta com uma série de acessórios utilizados em drenagem, auxiliando o usuário na elaboração de projetos. A figura 18 mostra a metodologia utilizada pelo software para elaborar um projeto, onde o projetista, conforme o sentido do escoamento, insere bocas-de-lobo e bacias de contribuição, fazendo as suas respectivas associações, tomando o cuidado de verificar se as sarjetas comportam cada uma dessas bacias, devendo ser modificada a boca de lobo por outra de maior vazão, caso não seja suportada. Por fim, é traçado o restante da rede, como tubulações, poços de visita ou reservatórios de armazenamento que serão dimensionados até traçar os perfis dos coletores e o cálculo dos quantitativos da rede, conforme figura 19 (BEZERRA e CASTRO, 2009).

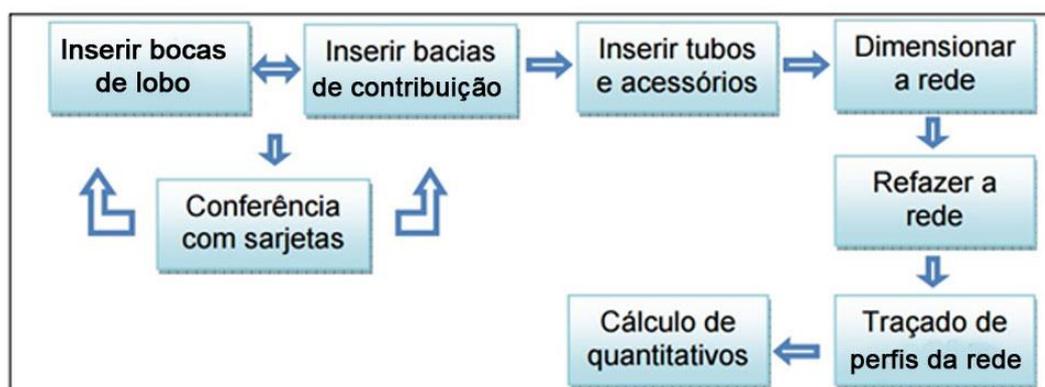


Figura 18 - Metodologia de utilização do UFC8 –
Fonte Bezerra e Castro (2009) com modificações

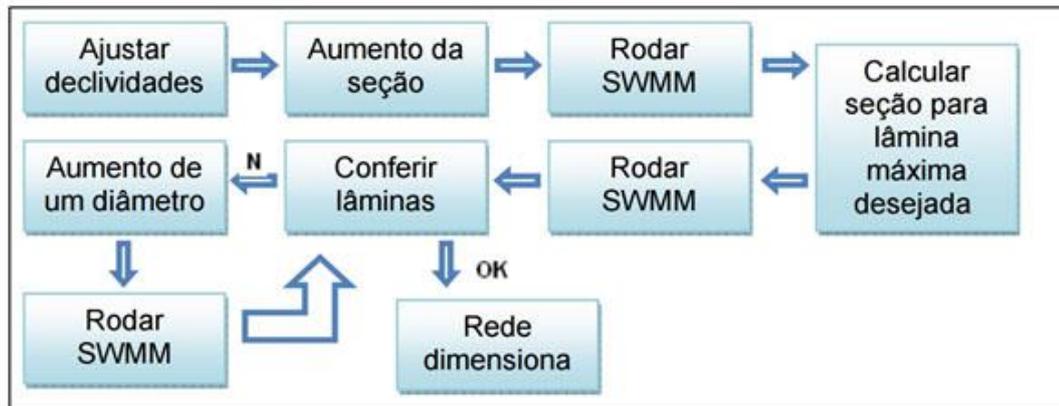


Figura 19 - Processo de dimensionamento no UFC8
Fonte: Bezerra e Castro (2009)

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar o UFC8 pois este calcula alguns parâmetros necessários na entrada de dados no SWMM, utilizando um mapa de fundo com o arruamento do local de estudo e suas respectivas curvas de nível. Seu uso auxilia na delimitação de cada subárea, calculando sua área, a largura característica e a declividade de todas as sub-bacias, otimizando o trabalho inicial de traçar e calcular os dados de cada subárea.

4.2.2 Precipitação de projeto

Para a entrada dos dados da precipitação de projeto foram geradas séries temporais com base na equação de chuva IDF, equação 17 desenvolvida por Fechini Sobrinho (2011) para o município de Crato-CE. Neste trabalho, utilizou-se um tempo de duração da precipitação como sendo igual ao tempo de concentração da área de contribuição, calculado através da equação 18 desenvolvida por Kirpich em 1940, que serve para pequenas bacias de até 0,50 km².

$$I = \frac{20,24 \cdot (T - 2,98)^{0,0769}}{(t + 5,45)^{0,728}} \quad (17)$$

Em que:

I é a intensidade máxima de chuva em mm/min;

T é o período de retorno em anos;

t é a duração da chuva em minutos;

$$t_c = \frac{0,019 \cdot L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (18)$$

Em que:

t_c é o tempo de concentração da bacia em minutos;

L é o comprimento do talvegue em metros;

S é a declividade do talvegue em m/m;

Apesar da literatura orientar a utilização de períodos de retorno de dois anos para projetos de microdrenagem de áreas residenciais (tabela 5), optou-se por um período de três anos, por ser o primeiro valor possível para a equação IDF desenvolvida para o município. No intuito de analisar o escoamento superficial, no caso de o padrão de ocupação ser modificado com o passar dos anos, também foram feitas simulações para períodos de retorno de cinco e dez anos.

Tabela 5 - Períodos de Retorno para diferentes ocupações

Tipo de obra	Tipo de ocupação de área	Período de retorno (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Área com Edifícios de serviço Público	5
	Aeroportos	2 - 5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5 - 10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50 - 100
	Áreas com importâncias específicas	500

Fonte: DAEE/CETESB, (1980)

4.2.3 Discretização das Sub-áreas

Foi feita a discretização da área do modelo de acordo com sua ocupação, na tentativa de representar da melhor maneira possível a área estudada, de forma que toda subárea receba precipitações e produza um escoamento superficial. Assim todas as quadras foram divididas em duas subáreas, onde cada uma delas direciona os respectivos escoamentos para a rua onde os lotes estão situados (figura 20).

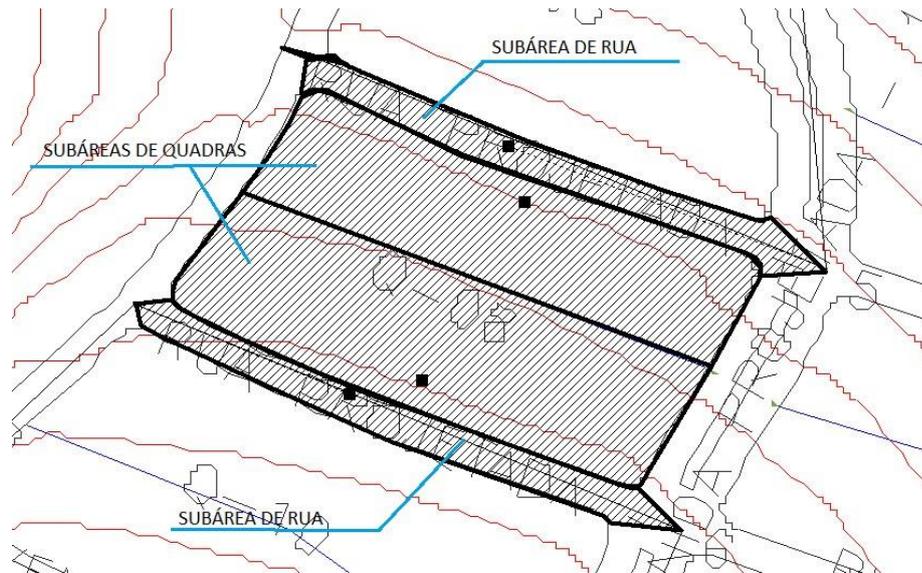


Figura 20 - Discretização das subáreas
Fonte: Elaborada pelo autor

Nas ruas, para discretização, considerou-se cada subárea a menor área possível entre duas quadras opostas da mesma rua, sendo nesta já inclusos os cruzamentos delas.

Os principais parâmetros necessários para cada uma dessas subáreas são:

- A área da sub-bacia;
- Percentual permeável de cada área;
- A precipitação de projeto;
- O percentual de área impermeável;
- Declividade da sub-bacia;
- A largura característica do fluxo superficial;
- O coeficiente de Manning e o armazenamento em depressões para as áreas permeáveis e impermeáveis.

4.2.4 Condução do escoamento

Como na localidade o principal caminho percorrido pelas águas se dá através das sarjetas das ruas, estas foram representadas no modelo como sendo canais de seção triangular, e que no SWMM necessitam dos seguintes parâmetros:

- Os nós de entrada e de saída;
- O comprimento do conduto;
- Coeficiente de Manning;

- Geometria da seção.

Para o coeficiente de rugosidade de Manning adotado para as sarjetas, levou-se em consideração os valores disponíveis na literatura para canais em concreto, adotando-se como sendo igual $0,016 \text{ m.s}^{-1/3}$.

4.3 Cenários Estudados

4.3.1 Situação Urbanizada

O primeiro cenário implantado no SWMM considerou a área de estudo totalmente urbanizada, com todos os lotes ocupados na forma máxima permitida pela legislação municipal. Considerou-se que apenas 30% da precipitação seria infiltrado no terreno e o restante seria direcionado para a sarjeta.

Através do aplicativo UFC8 traçou-se uma pequena rede de drenagem composta pelas bacias de contribuição (quadras e ruas), discretizadas conforme explicado em 4.2.3, com uma boca de lobo para todas estas bacias e uma rede de tubos para receber todo o escoamento para um ponto exutório. Como o propósito deste traçado não era o dimensionamento de uma rede, e sim a transferência rápida dos principais dados de cada subbacia para o SWMM, não foi dada atenção às dimensões de alguns elementos de drenagem, como bocas de lobo e tubos, que foram modificados no SWMM nas etapas seguintes do traçado.

O coeficiente de escoamento superficial do solo foi definido com o auxílio de imagens de satélite da região, através do Google Earth e visitas ao local, onde através delas foram definidos o percentual de área permeável de cada subárea. Conforme dados de Tucci (1995), os valores utilizados no estudo encontram-se apresentados na tabela 6:

Tabela 6 - Coeficiente de Escoamento Superficial do modelo

Subáreas	Coeficiente de escoamento Superficial
Área verdes	10%
Ruas pavimentadas com pedra tosca	85%
Ruas asfaltadas	95%
Quadras Residenciais	70%

Fonte: DAEE/CETESB, (1980)

Considerou-se como área verde a rotatória localizada entre as avenidas Teodorico Teles Neto e Valdemiro Paz de Souza.

Uma vez que um esboço do modelo foi traçado, utilizou-se o UFC8 para exportar esta rede de drenagem para o SWMM onde foram feitos os demais ajustes.

No SWMM foi feita uma análise preliminar do arquivo gerado pelo UFC8 de forma a saber quais etapas do modelo já haviam sido criadas e quais deveriam ser modificadas. Em um segundo momento, com auxílio de um editor de textos (Microsoft Word 2013), foram realizadas algumas alterações no arquivo pois caso fossem realizadas no SWMM estas alterações deveriam ser feitas objeto a objeto, o que aumentariam as tarefas a serem realizadas. As principais alterações realizadas nos diversos elementos foram:

- A inclusão de três séries temporais criadas na etapa 4.2.2 ($Tr=3$, $Tr=5$ e $Tr=10$ anos).
- Criação de dois padrões de chuva (hietogramas), sendo um associado às subáreas das ruas e outro para as subáreas das quadras;
- Modificação dos coeficientes de escoamento de cada subárea;
- Modificação dos coeficientes de Manning e do armazenamento em depressões para as áreas permeáveis e impermeáveis;
- Modificação das geometrias e características dos tubos da rede criados no UFC8 de forma que funcionem como sarjetas, com o intuito de deixar a situação de escoamento mais próximo do existente no bairro;
- Exclusão dos demais dados não necessários ao modelo (demais hietógrafos, séries temporais e bocas de lobo).

Por fim, após todas as modificações realizadas, foram feitas as últimas alterações no SWMM, em que se associou cada subárea ao respectivo nó exutório e criados os exutórios finais do modelo, conforme as saídas do escoamento superficial existente atualmente na localidade. O modelo final encontra-se representado na figura 21.

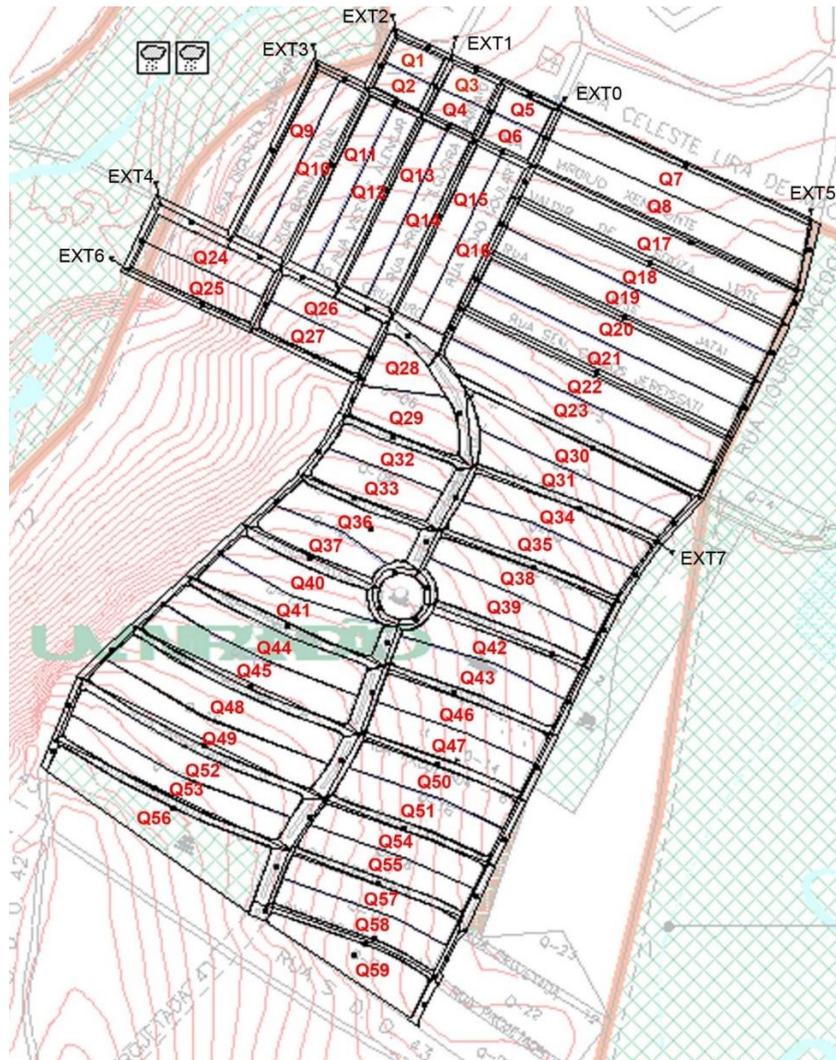


Figura 21 - Modelo Urbanizado
Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.2 Situação Urbanizada com LID: uso de trincheiras de infiltração

O outro cenário estudado trata-se da área totalmente urbanizada com a inclusão de um sistema de drenagem que utiliza trincheiras de infiltração do tipo fechadas de seção de 1,00x1,00m (figura 22), instaladas no passeio público. Considerou-se que as trincheiras receberão contribuições apenas de forma indireta que após excederem a sua capacidade, escoarão o restante das águas para as sarjetas.

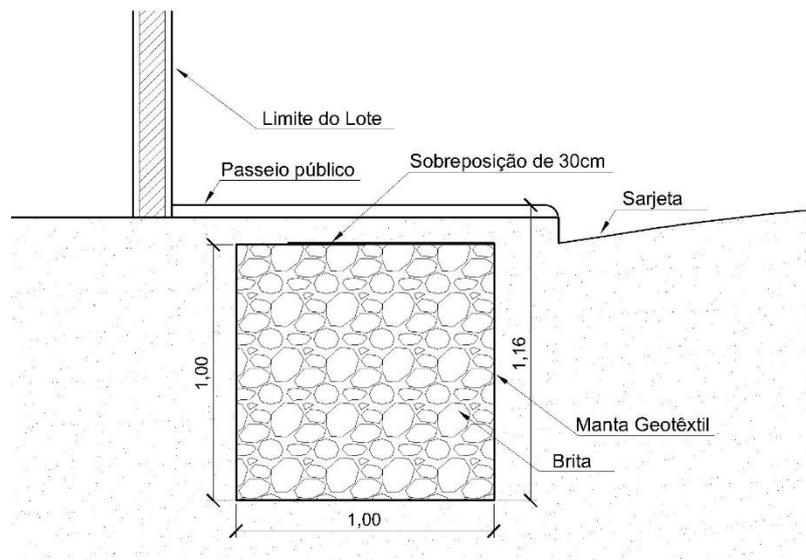


Figura 22 - Detalhe típico de uma trincheira do modelo
Fonte: Elaborada pelo autor

No modelo considerou-se que estas trincheiras receberão apenas as águas advindas das cobertas das edificações instaladas nos lotes (figura 23), de forma a recolher as águas com a menor quantidade possível de partículas sólidas e poluentes difusos que possam interferir na qualidade da água no lençol freático ou favorecer uma precoce colmatação do sistema. Neste sistema, é previsto um poço de inspeção que faz a coleta e filtragem de uma parte do material sólido que pode ser direcionado para o dispositivo.

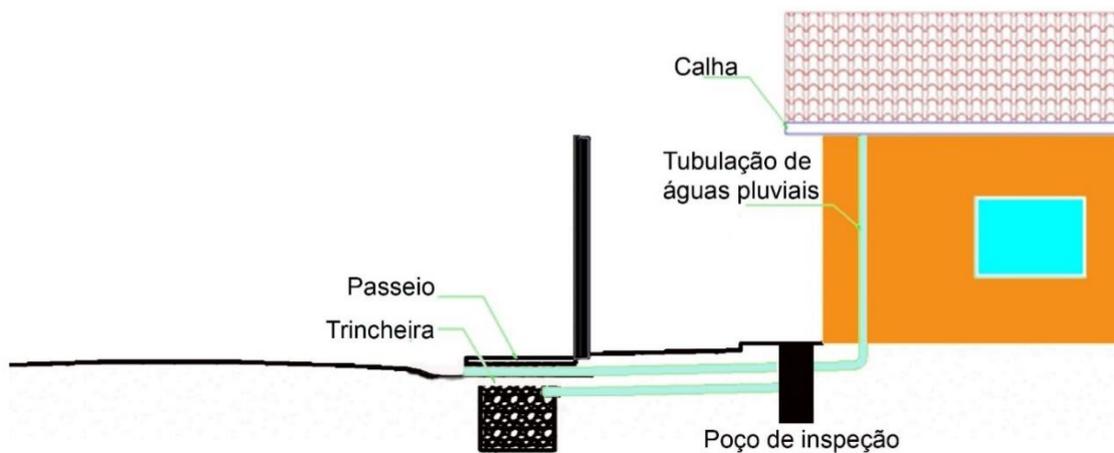


Figura 23 - Situação das Trincheiras de Infiltração no Modelo
Fonte: Elaborada pelo autor

Este segundo modelo foi montado com base no do modelo anterior, sendo incluídas as trincheiras de infiltração situadas no passeio, distribuídas conforme a figura 24. A construção deste dispositivo no sistema foi feita através da criação de áreas permeáveis situadas nas subáreas das ruas, tendo cada uma destas subáreas uma capacidade de armazenamento em depressões equivalente ao volume útil da trincheira.

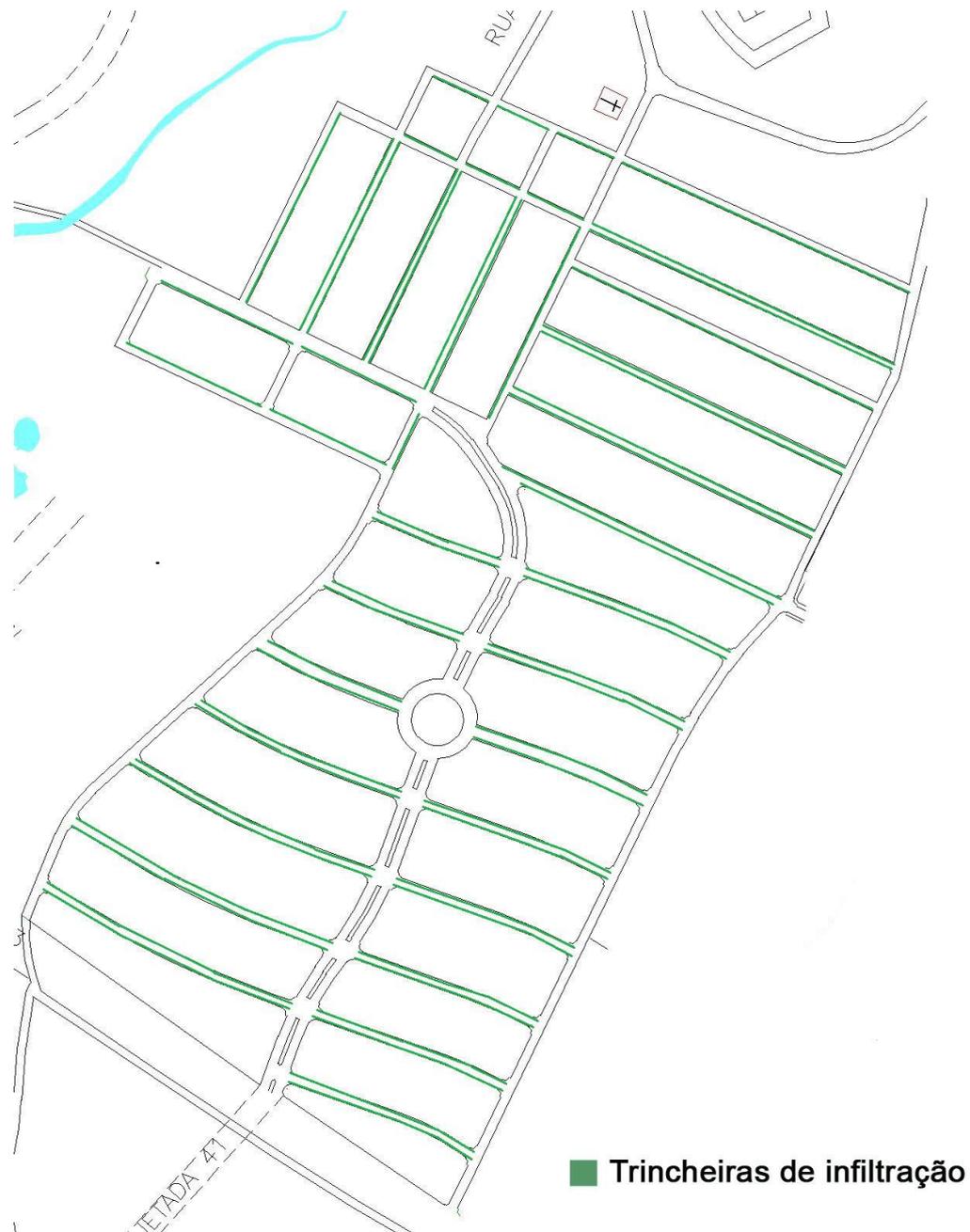


Figura 24 - Distribuição das trincheiras no bairro
Fonte: Elaborada pelo autor

A instalação da trincheira no passeio deve-se à disponibilidade de espaço que faz com que este se torne um dos principais fatores limitantes dos métodos de controle na fonte, não sendo indicada a sua instalação na via pública devido a possibilidade de tráfego pesado danificar o sistema. Outro fator impeditivo de sua instalação na via pública é a existência de esgoto a céu aberto, que ainda é muito comum na região, podendo favorecer a contaminação do dispositivo e possivelmente do lençol freático.

Com a criação de novas subáreas para a representação das trincheiras, criou-se também um novo padrão de chuva com precipitação nula, de forma que as trincheiras não gerem escoamento senão aqueles advindos dos lotes.

Para as inclinações destas novas subáreas, uma vez que estas se encontram instaladas nas subáreas das ruas, adotou-se para as trincheiras a mesma inclinação das subáreas destas, até o valor máximo de 5%. Nos casos de grande declividade considerou-se como se fossem instaladas com inclinação máxima de 5% e divisórias entre as trincheiras.

Como material de enchimento do dispositivo adotou-se uma brita grossa com porosidade de 30% (tabela 7) por ser um material possível de ser encontrado na região, resultando em uma profundidade eficaz de armazenamento de 30cm.

Tabela 7 - Porosidade Efetiva de alguns materiais de enchimento

Material	Porosidade Efetiva (%)
Brita grossa	30
Cascalho de granulometria uniforme	40
Brita graduada	30
Areia	25
Seixo rolado	15-25

Fonte: Urbonas e Stahre (1993)

Os dados de infiltração do solo também foram retirados da literatura (tabela 8), adotando-se neste caso os parâmetros de infiltração sugeridos por Akan (1993 *apud* Tomaz, 2002) para solos arenosos argilosos.

A última etapa realizada para este cenário foi a modificação dos exutórios de cada subáreas das quadras no SWMM, pois neste caso o escoamento gerado não mais seria direcionado para as sarjetas e sim para as trincheiras, tendo estas como ponto exutório as sarjetas das ruas.

Tabela 8 - Estimativa da capacidade mínima de infiltração

Tipo de solo	f_c (mm/h)
Solo argiloso com areia, silte e húmus	0 a 1,27mm/h
Solo arenoso argiloso	1,27mm/h a 3,81mm/h
Solo siltoso com areia, silte e húmus	3,81mm/h a 7,62mm/h
Solo arenoso	7,62mm/h a 11,43mm/h

Fonte: Akan (1993 *apud* Tomaz, 2002)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulação sem as trincheiras de infiltração

Após a simulação do escoamento, verificou-se que a situação mais crítica, com uma lâmina de água escoando de 30cm, ocorreu após 12 minutos do início da precipitação. Desta forma, foi construído um mapa de cheias da área em estudo com período de retorno de 3 anos, (figura 25). Observa-se que as águas superficiais tendem a se acumular nas áreas próximas ao exutório 7, com a situação de maior altura de escoamento à direita da rotatória.

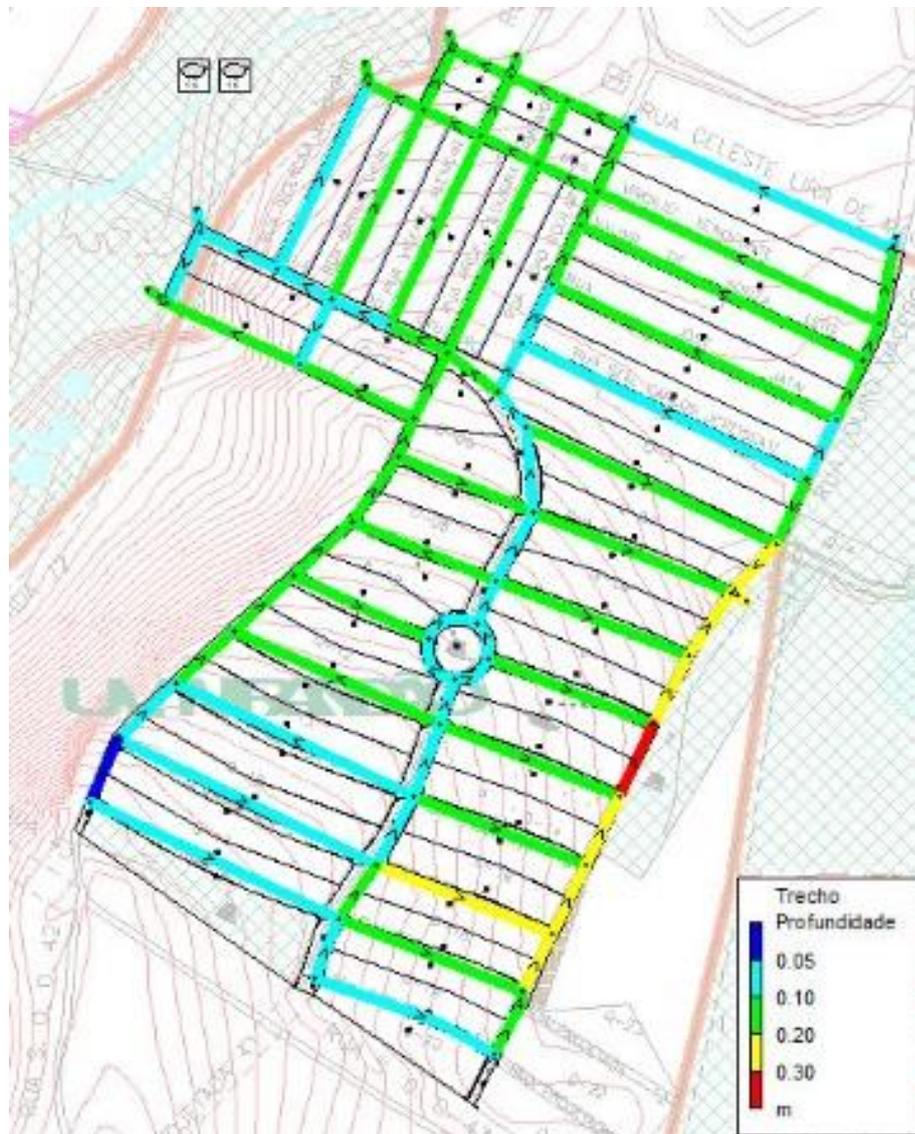


Figura 25 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado com Tr=3 anos
Fonte: Elaborada pelo autor

Foram elaborados mapas de cheia para o mesmo cenário urbanizado com períodos de retorno 5 e 10 anos e que estão apresentados nas figuras 26 e 27. Observa-se que entre eles existem poucas modificações na altura do escoamento. Porém, verificou-se que o ponto mais crítico destes, se comparados ao com período de retorno de 3 anos, apresenta-se agravado com uma lâmina de escoamento chegando a picos de 36cm e 37cm, para os períodos de retorno de 5 e 10 anos, respectivamente, sendo prolongado o trecho mais crítico indo da lateral da quadra Q57 até o exutório 7, conforme destaque em vermelho nas figuras. Esta situação em eventos reais pode chegar a causar prejuízos à população do local.

Observou-se também que as alturas do escoamento em todas as situações se apresentaram com os maiores níveis, sempre após 12 minutos do início das precipitações.

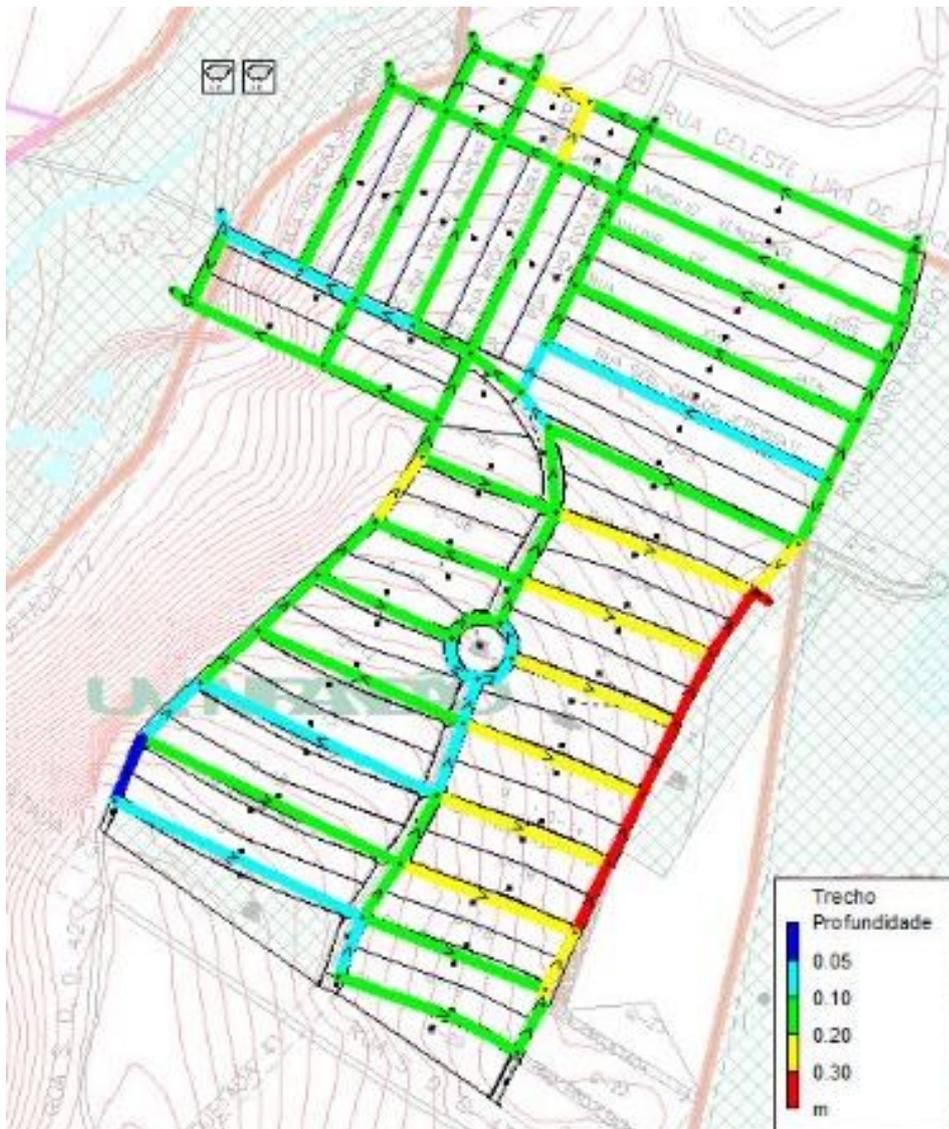


Figura 26 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado com Tr=5
Fonte: Elaborada pelo autor

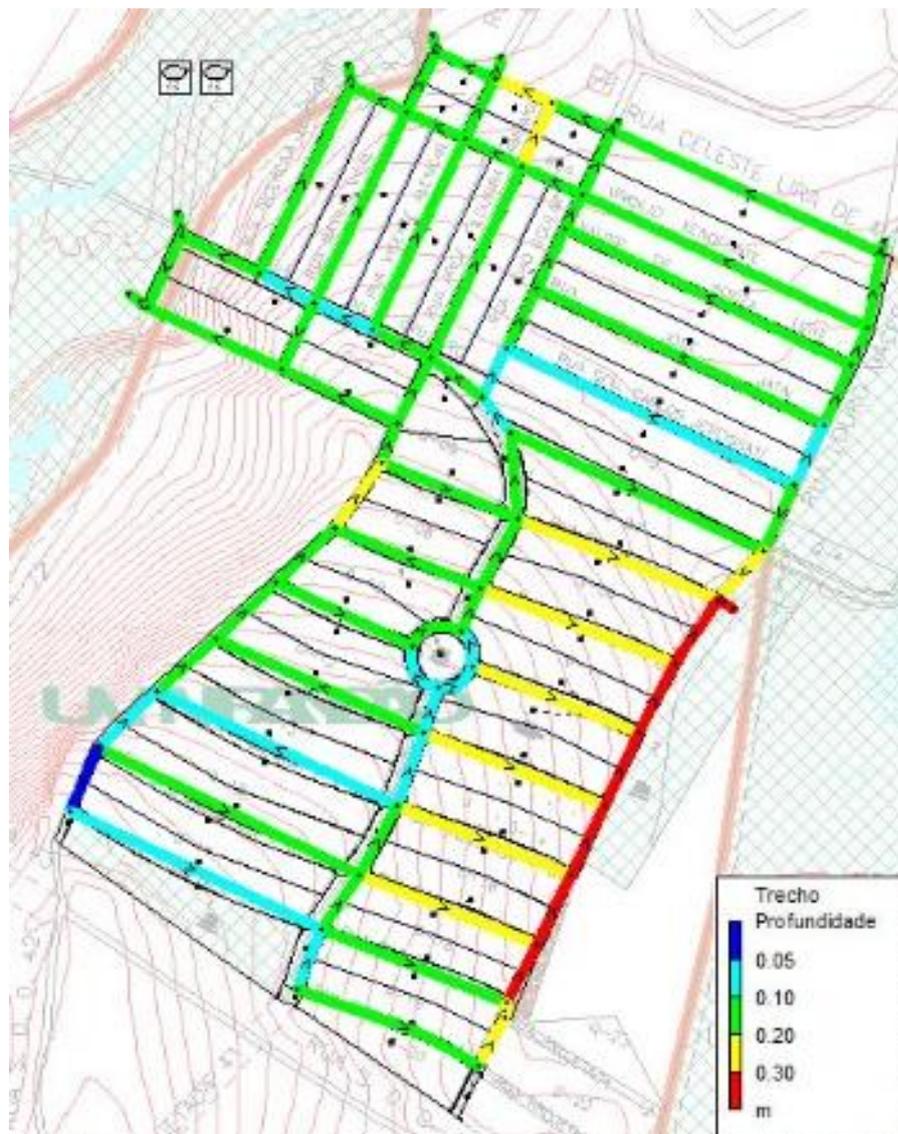


Figura 27 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado com Tr=10anos
Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto a velocidade de escoamento, para os diversos períodos de retorno estudados, os trechos das laterais das quadras Q34 e Q39, e proximidades da quadra Q25, apresentaram velocidades superiores a 3m/s que, segundo a literatura, podem causar erosões nas ruas carreando de sedimentos e outros materiais que podem obstruir as redes de drenagem existentes.

5.2 Simulação com as trincheiras de infiltração

A simulação realizada para o cenário com as trincheiras de infiltração instaladas, demonstrou resultados satisfatórios na redução da altura do escoamento

superficial nas ruas, ficando em sua situação de maior pico, após 12 minutos do início da precipitação, com alturas de 17, 21 e 22cm, para os períodos de retorno de 3, 5 e 10 anos respectivamente, os quais encontram-se representados nos seus respectivos mapas de cheias, (figuras 28, 29 e 30).

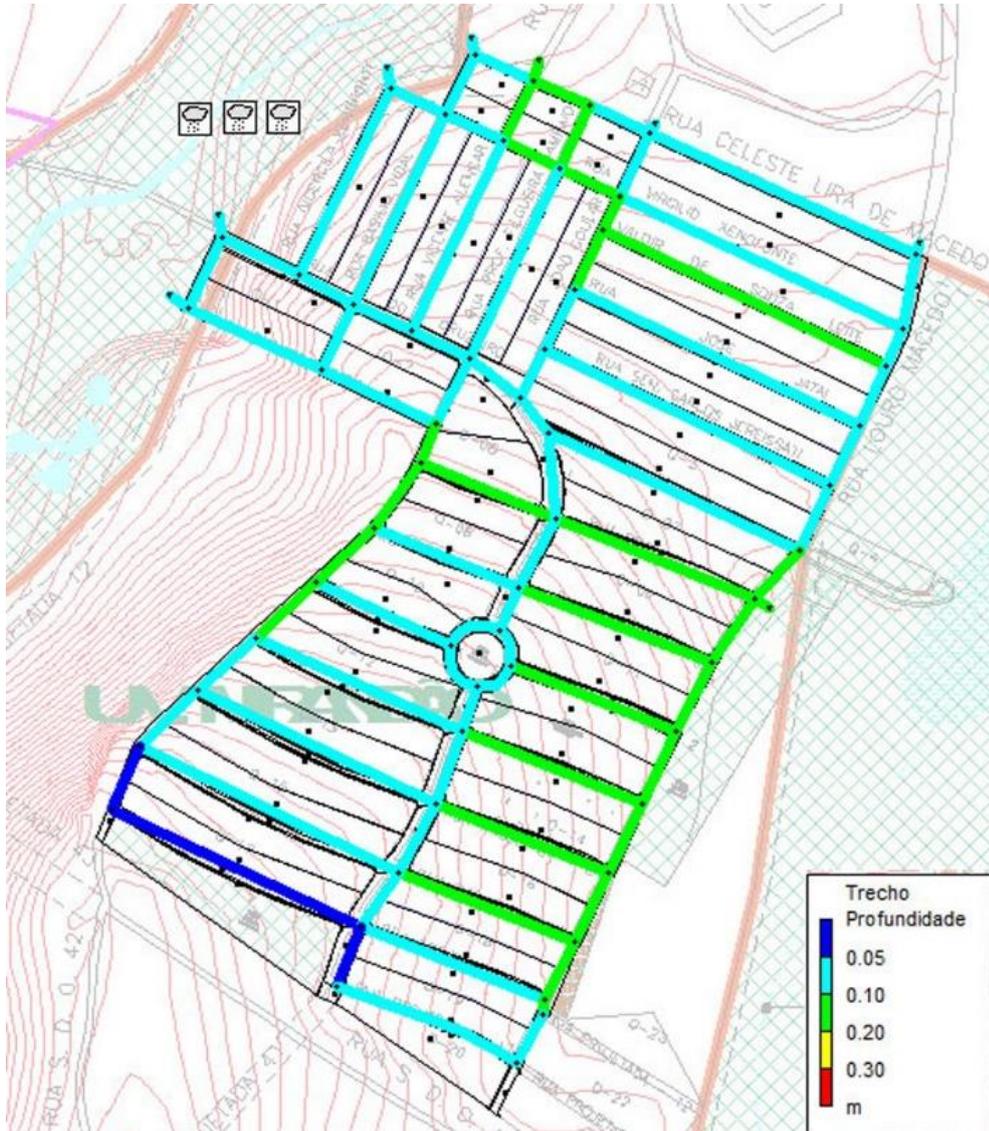


Figura 28 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado e trincheiras de infiltração com $Tr=3$ anos
Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 29 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado e trincheiras de infiltração com Tr=5 anos
Fonte: Elaborada pelo autor

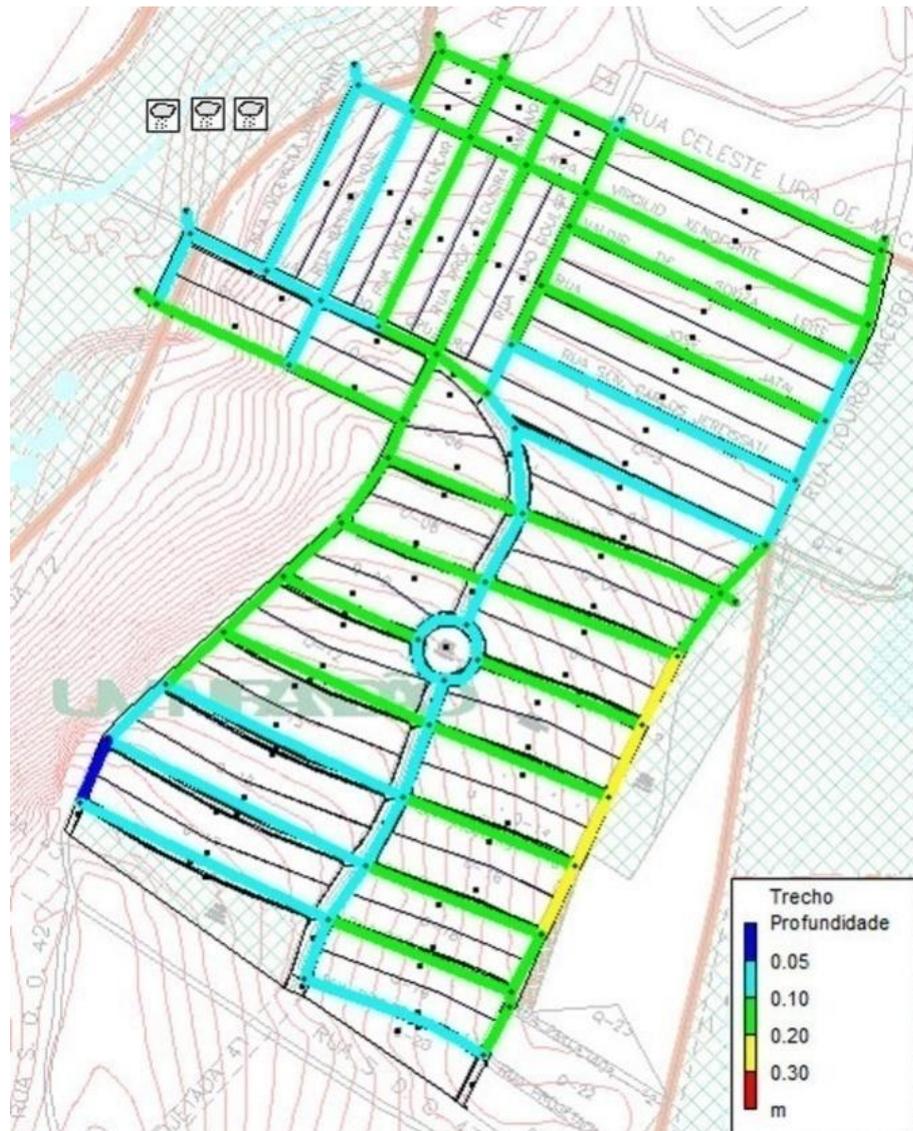


Figura 30 - Mapa de cheias para o cenário Urbanizado e trincheiras de infiltração com $Tr=10$ anos
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme visto em todos os casos, o trecho mais crítico, quanto à altura de escoamento superficial, ocorreu sempre após 12 minutos do início da precipitação, ou seja, não houve retardo da cheia. Esta situação pode ser explicada analisando a figura 31, que representa o hidrograma de entrada e saída de uma das trincheiras de infiltração. Nesta figura, pode-se verificar que as vazões geradas pelas quadras após a saída das trincheiras não são altas suficientes para alterar o pico da vazão produzida pelas ruas, contudo verifica-se que houve uma distribuição maior das vazões com o uso do sistema. Ou seja, se durante o instante de pico a trincheira ainda encontrar-se em período de reservação e se o pico desta não for maior que o pico do escoamento das ruas, não haverá modificação no instante em que o pico do conjunto ocorrerá.

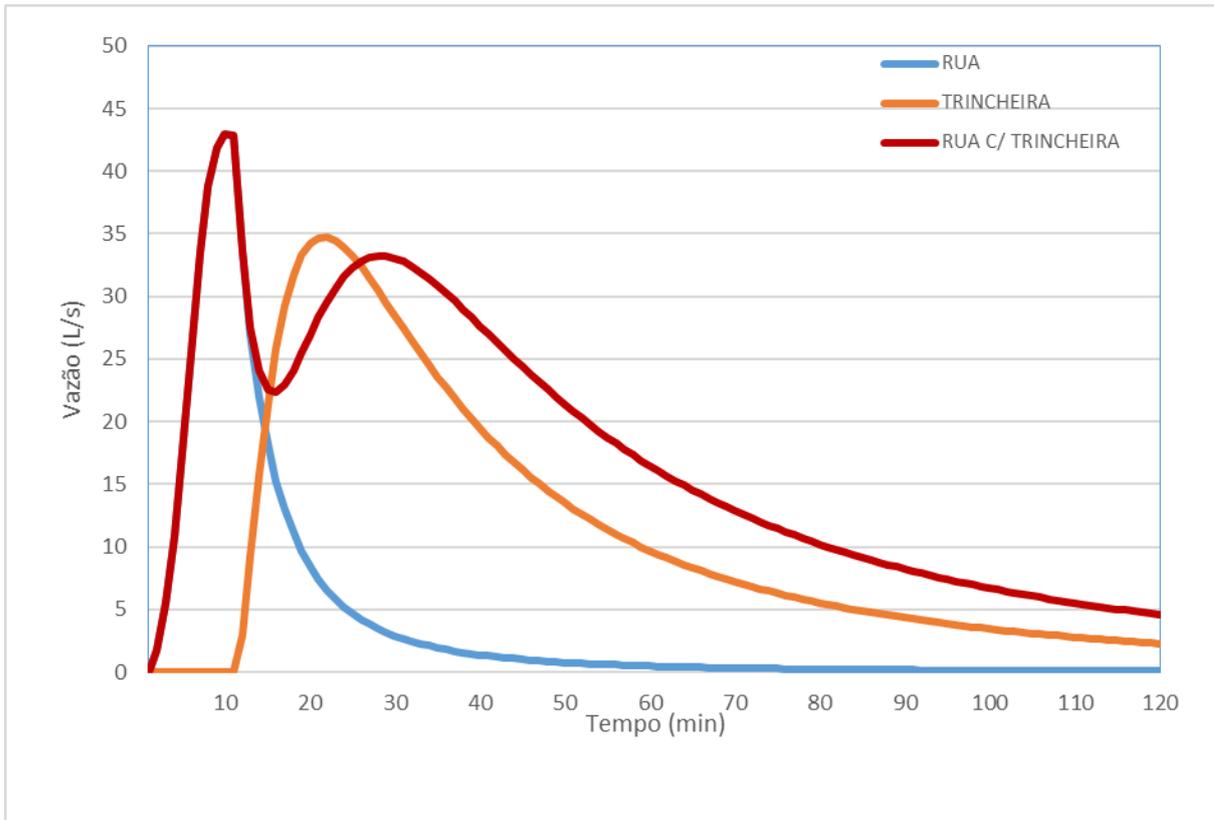


Figura 31 - Hidrogramas de saída
Fonte: Elaborada pelo autor

Tratou-se de analisar a eficiência das trincheiras, quadra a quadra (tabela 9), verificando possíveis distorções e se alguma delas encontrava-se com dimensões superiores ao necessário, ou seja, capaz de absorver um volume superior ao gerado pela quadra.

Observou-se que a quadra Q21 (figura 32), em termos percentuais, foi a que apresentou a melhor eficiência, absorvendo durante 18 minutos todo o escoamento gerado para um período de retorno de 3 anos, passando em seguida a evacuar o excedente para sarjeta e atingindo uma vazão de pico de 1,81 L/s, reduzindo o escoamento máximo da quadra que era de 92,39L/s em 98,04%. Contudo, não foram todas as quadras que apresentaram um desempenho tão bom, onde na Quadra Q28 (figura 33), houve uma redução de 44,15%, motivada pelo reduzido tamanho permitido para esta subárea, reduzindo a vazão de pico de 59,01L/s para 32,96L/s. Neste caso, o escoamento na saída da trincheira começou a ocorrer após 9 minutos do início da precipitação para um período de retorno de 3 anos. Porém, dos

resultados obtidos, apenas a subárea da quadra Q28 teve eficiência inferior a 70%, tendo os demais uma redução significativa da vazão de pico com o uso das trincheiras.

Tabela 9 - Picos de Vazão das Subáreas

Subárea	Vazão (L/s)	Instante Pico (min)	Vazão após LID(L/s)	Instante Pico (min)	Subárea	Vazão (L/s)	Instante Pico (min)	Vazão após LID(L/s)	Instante Pico (min)
Q01	33,76	8	9,43	15	Q31	104,53	9	12,32	26
Q02	35,79	7	10,13	14	Q32	28,04	11	1,56	86
Q03	31,66	8	7,29	16	Q33	34,26	11	3,05	68
Q04	36,81	7	12,15	13	Q34	125,18	8	21,37	18
Q05	33,53	8	9,54	15	Q35	127,35	9	19,06	20
Q06	37,77	8	11,3	14	Q36	87,74	10	10,74	24
Q07	132,25	11	5,65	48	Q37	72,76	9	5,36	29
Q08	134,99	11	6,36	46	Q38	117,59	9	13,89	21
Q09	86,02	10	3,97	39	Q39	114,69	9	22,01	18
Q10	89,59	9	5,1	34	Q40	79,92	10	9,83	26
Q11	98,64	9	6,42	28	Q41	105,5	10	5,54	37
Q12	103,22	9	8,64	25	Q42	101,06	7	16,72	19
Q13	99,75	9	7,02	27	Q43	124,4	9	22,33	18
Q14	98,19	9	6,68	28	Q44	104,58	11	6,85	38
Q15	100,08	9	7,27	27	Q45	118,38	11	6,68	48
Q16	103,44	9	8,51	26	Q46	117,96	8	17,77	19
Q17	133,3	11	6,48	47	Q47	120,56	8	24,61	17
Q18	117,82	11	4,03	58	Q48	89,92	11	6,76	55
Q19	97,95	11	2,54	83	Q49	100	11	5,14	52
Q20	90,94	11	2,39	89	Q50	115,26	8	21,04	17
Q21	92,39	11	1,81	89	Q51	119,55	8	20,09	18
Q22	114,3	11	3,39	67	Q52	103,54	11	3,96	53
Q23	116,45	11	7,76	48	Q53	103,67	11	4,82	44
Q24	94,75	8	23,79	14	Q54	100,48	8	9,41	22
Q25	94,6	8	23,61	14	Q55	98,56	9	6,65	27
Q26	73,33	8	15,27	17	Q56	185,35	10	34,72	22
Q27	77,85	8	18,4	15	Q57	100,68	8	8,19	24
Q28	59,01	9	32,96	13	Q58	102,95	9	11,1	22
Q29	82,48	10	11,92	24	Q59	117,72	9	18,83	19
Q30	127,72	10	6,83	36					

Fonte: Elaborada pelo autor

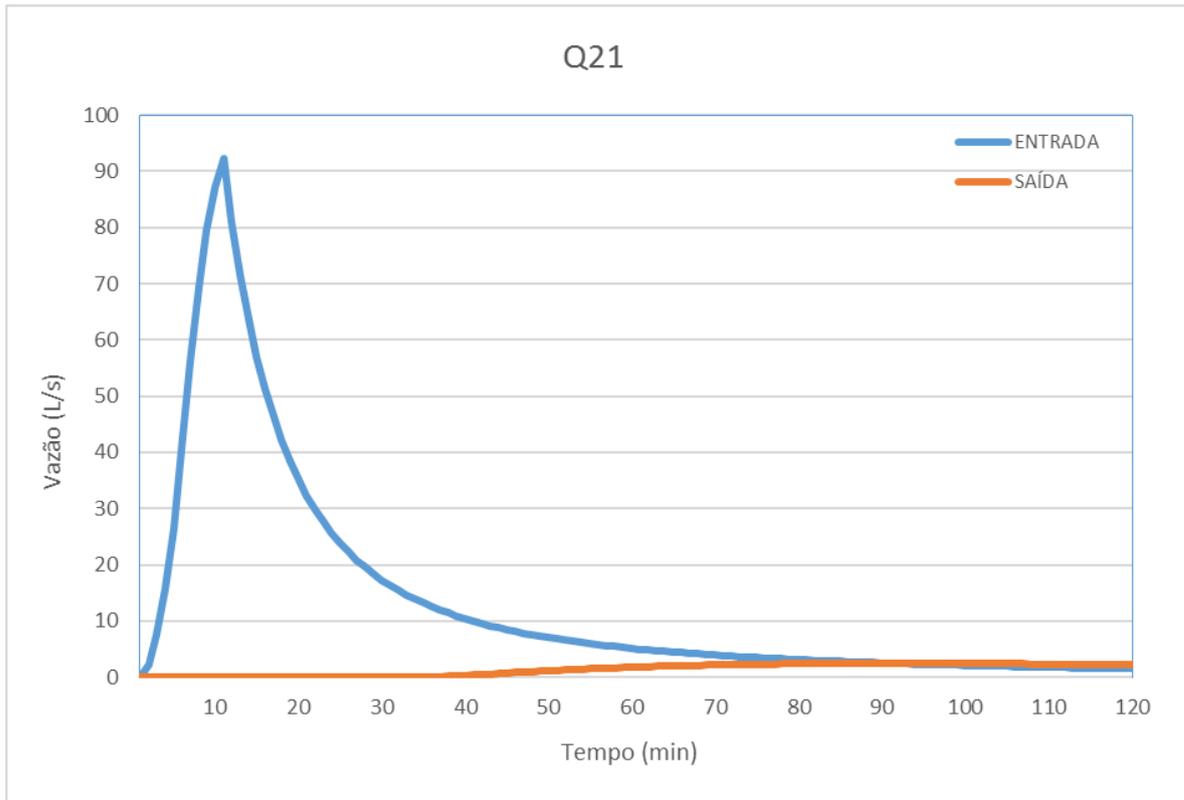


Figura 32 - Hidrogramas de entrada e saída da trincheira da quadra Q21
Fonte: Elaborada pelo autor

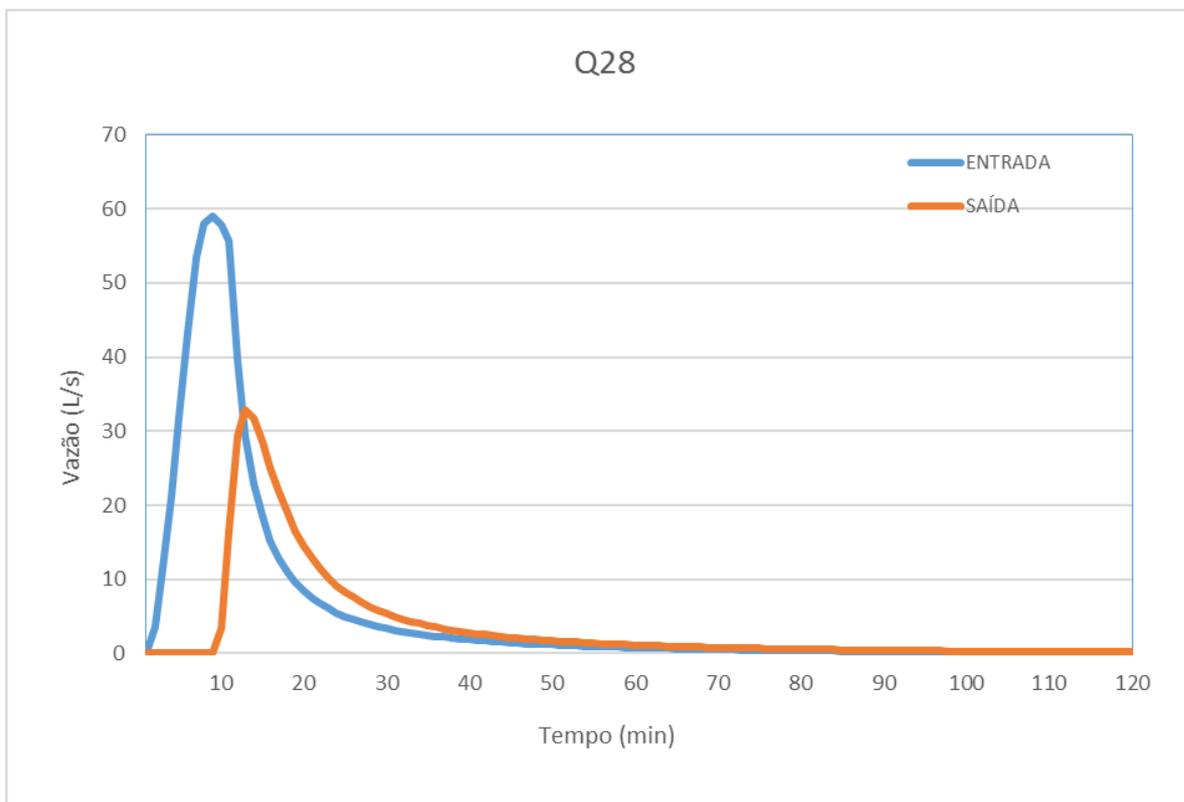


Figura 33 - Escoamento na Subbacia Q28
Fonte: Elaborada pelo autor

Devido o escoamento gerado pelas ruas permanecer-se inalterado, por não estar sendo conduzido para as trincheiras, os picos de vazão não sofreram modificações no tocante ao instante em que eles ocorreram; isto pode ser verificado na análise dos 8 exutórios, onde apesar da grande diminuição na vazão de pico esta continuou ocorrendo no mesmo instante do cenário anterior, a tabela 10 e as figuras 34 a apresentam esta situação.

Conforme a tabela 10, onde encontram-se demonstradas as vazões máximas para os dois cenários e instante em que ocorreram, pode-se ver que em apenas dois dos oito exutórios do modelo apresentaram uma discreta modificação do instante de pico.

Tabela 10 - Tempo de Pico nos Exutórios

		EXT 0	EXT 1	EXT 2	EXT 3	EXT 4	EXT 5	EXT 6	EXT 7
URB.	Vazão (L/s)	330,72	728,20	918,94	634,30	201,37	458,48	663,97	4123,77
	Tempo pico (min)	14	12	12	11	9	12	12	12
URB. C/ LID	Vazão (L/s)	95,07	139,02	163,16	116,71	67,50	30,84	135,64	629,33
	Tempo pico (min)	15	12	12	11	9	12	12	13
Redução da vazão		71%	81%	82%	82%	66%	93%	80%	85%

Fonte: Elaborada pelo autor

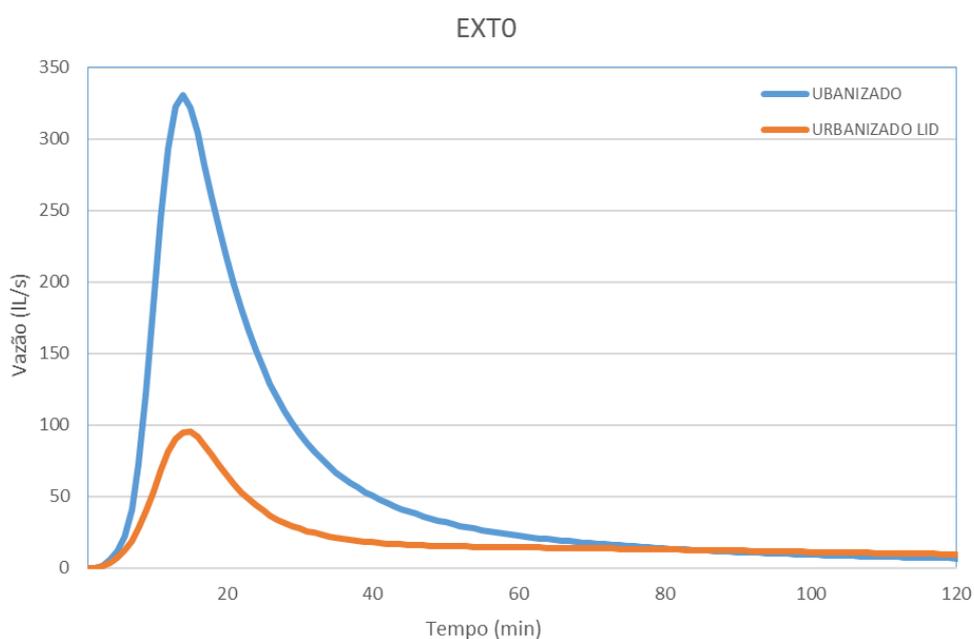


Figura 34 - Hidrograma no Exutório 0
Fonte: Elaborada pelo autor

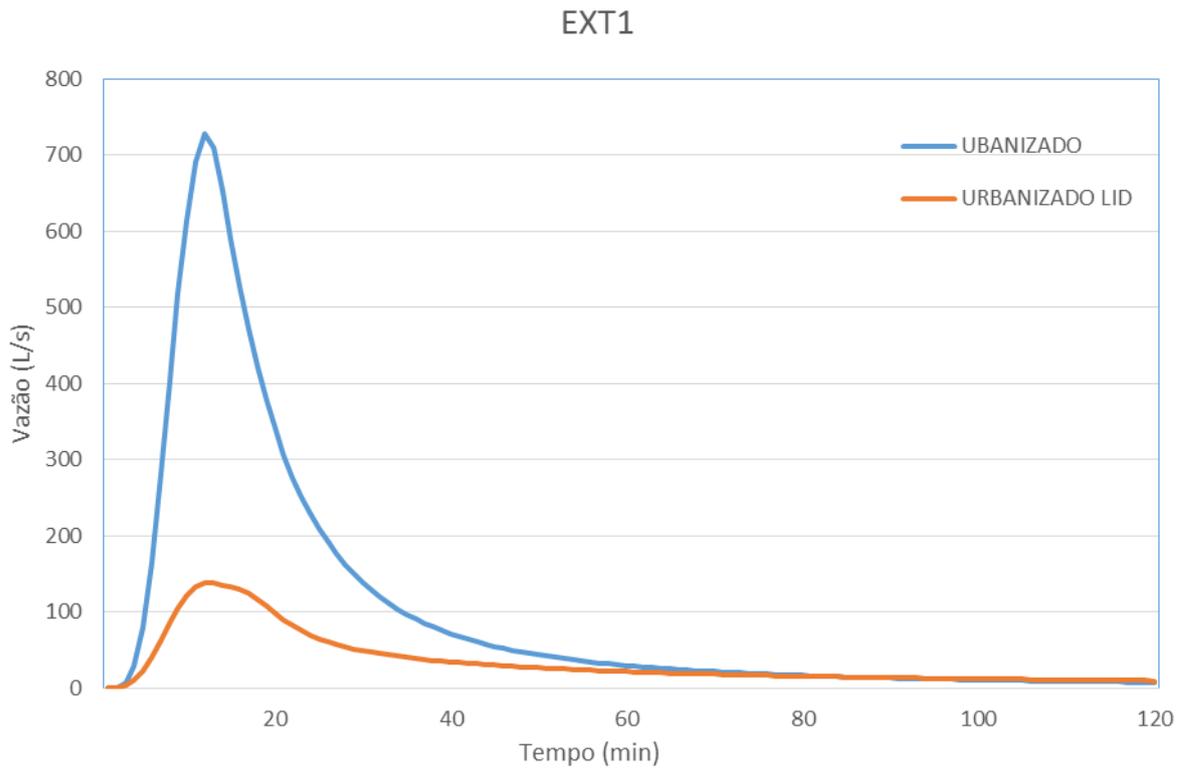


Figura 35 - Hidrograma do Exutório 1
Fonte: Elaborada pelo autor

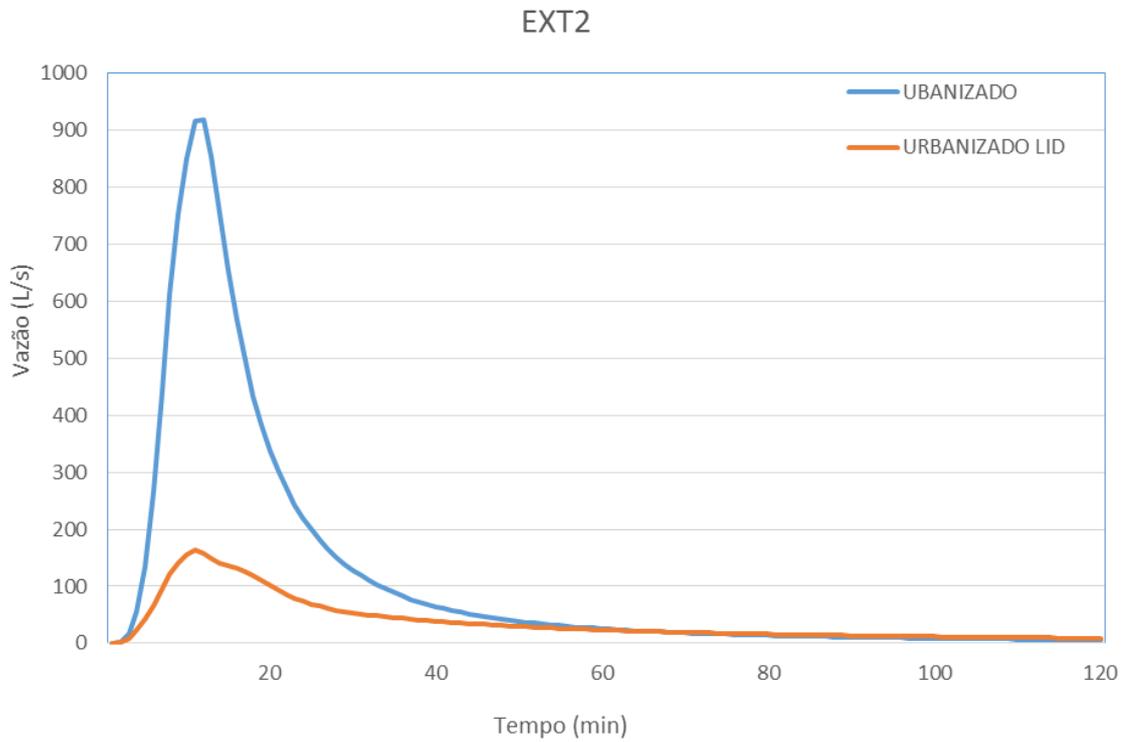


Figura 36 - Hidrograma do Exutório 2
Fonte: Elaborada pelo autor

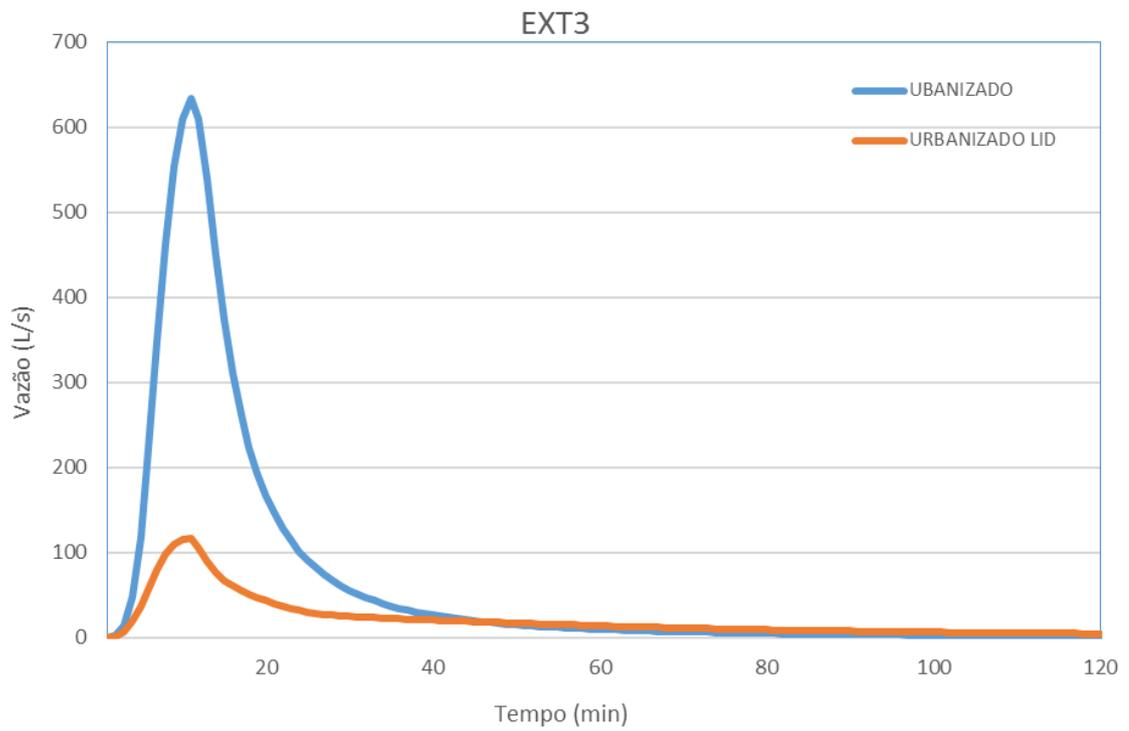


Figura 37 - Hidrograma do Exutório 3
Fonte: Elaborada pelo autor

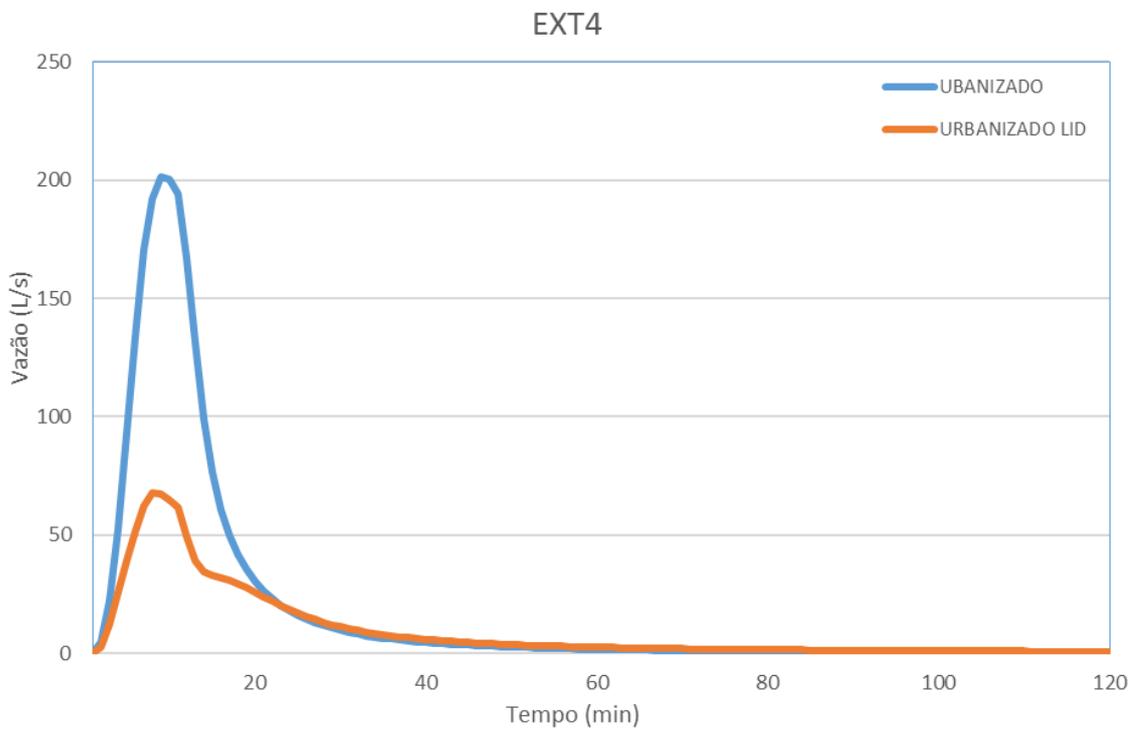


Figura 38 - Hidrograma do Exutório 4
Fonte: Elaborada pelo autor

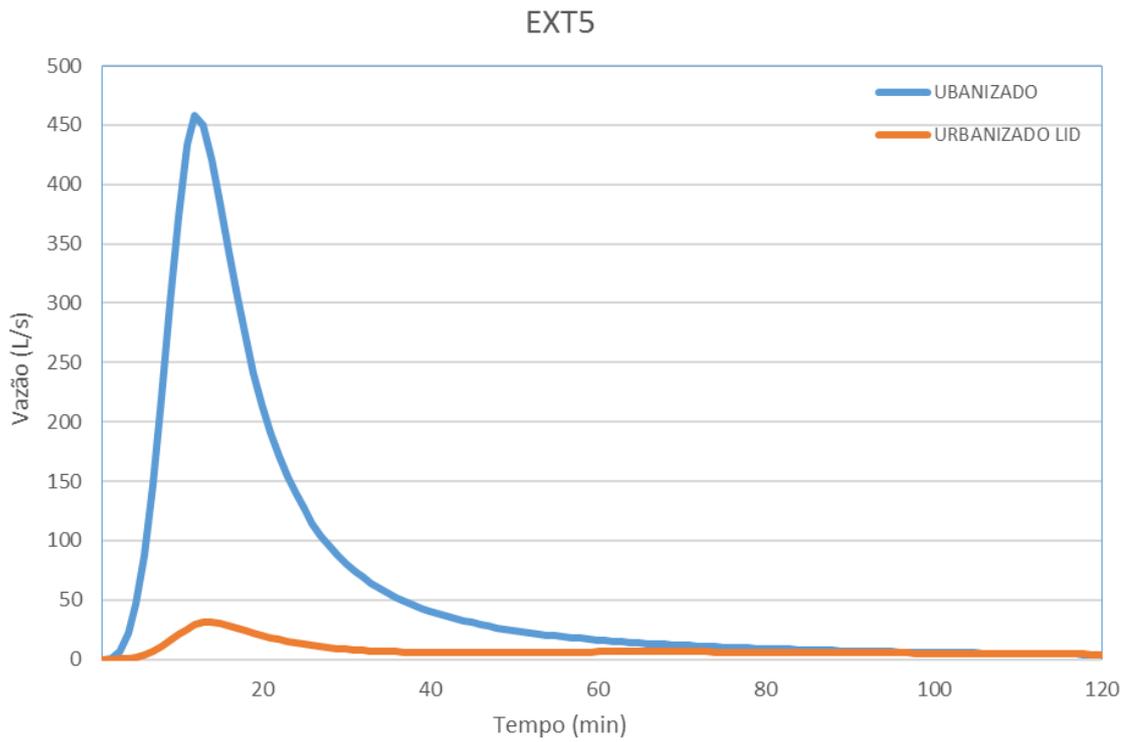


Figura 39 - Hidrograma do Exutório 5
Fonte: Elaborada pelo autor

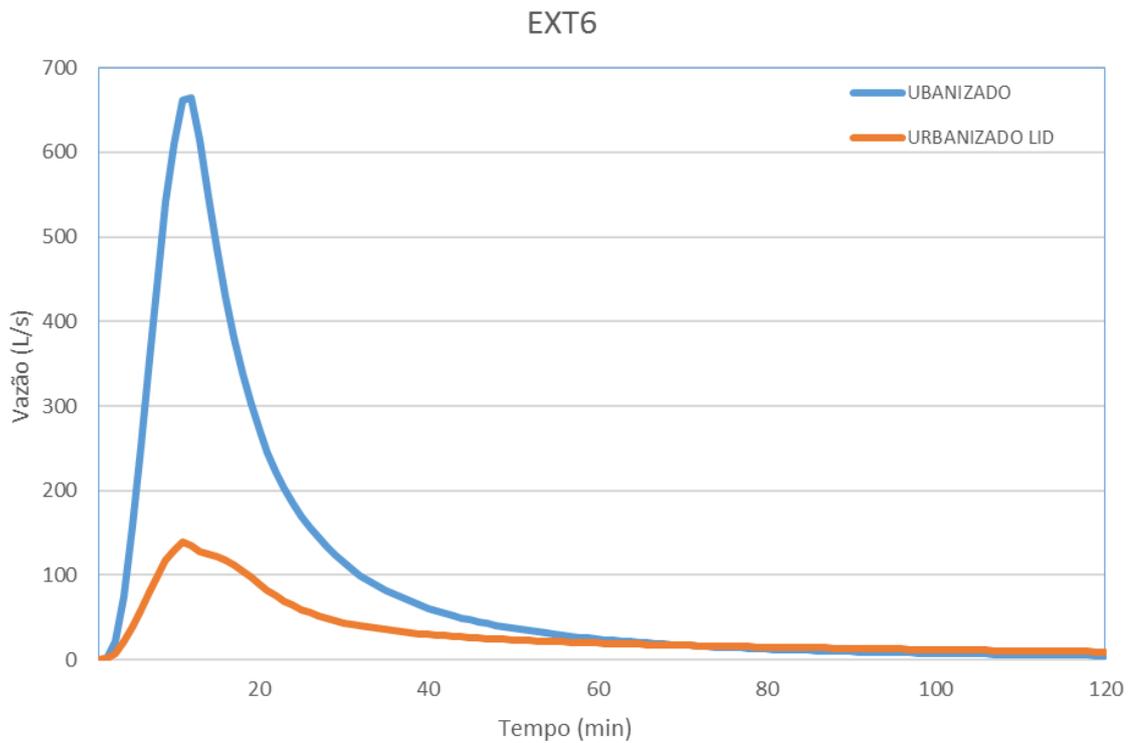


Figura 40 - Hidrograma do Exutório 6
Fonte: Elaborada pelo autor

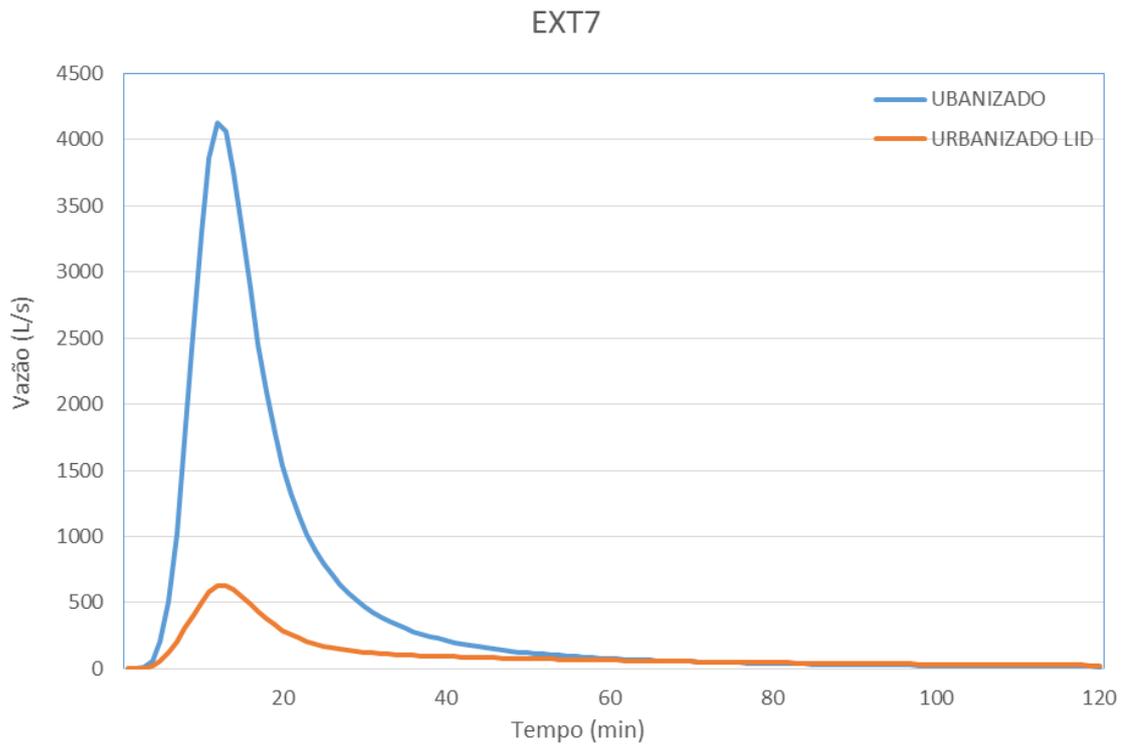


Figura 41 - Hidrograma do Exutório 7
Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura 42 é mostrado uma comparação entre dois hidrogramas, onde um deles é o hidrograma de saída no Exutório 7 da simulação realizada com o sistema de trincheiras, e o outro é o hidrograma de saída no Exutório 7 de uma simulação realizada onde foram retirados os escoamentos gerados por todas as quadras deixando apenas o gerado pelas ruas. Pode-se verificar que a vazão final nos exutórios é causada principalmente pelo escoamento das ruas, sendo as quadras responsáveis apenas por um leve aumento na vazão final destes.

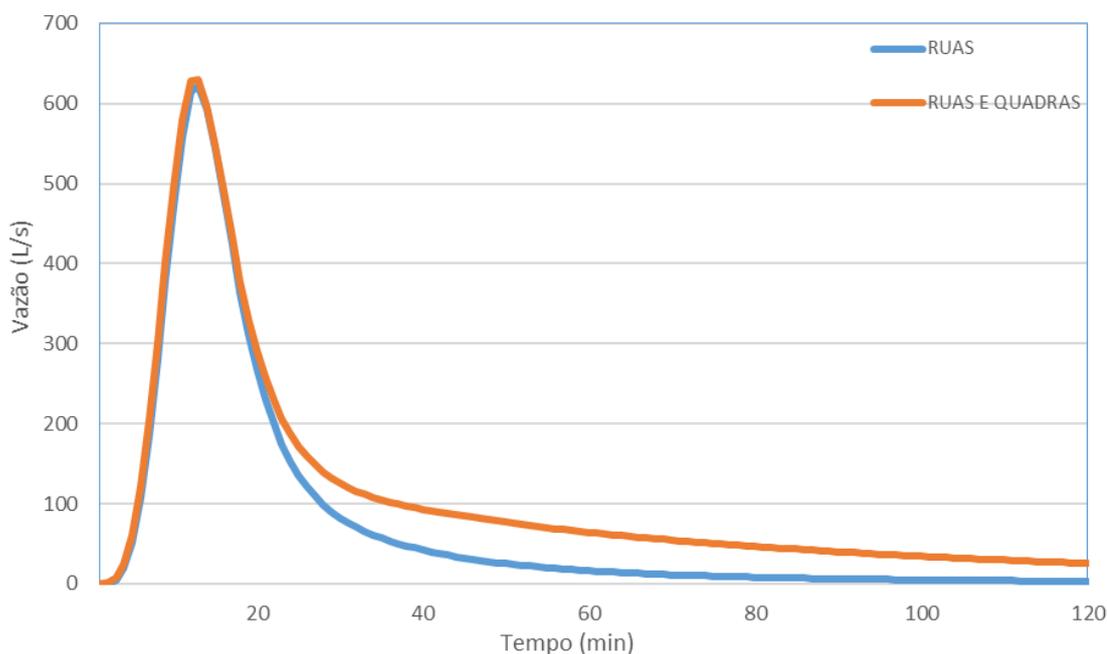


Figura 42 - Hidrograma do Exutório 7 sem o escoamento das quadras
Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar as velocidades geradas pelo escoamento superficial com a implantação do sistema, verificou-se que houve reduções em todas as sarjetas, contudo apenas o trecho das laterais das quadras Q34 e Q35 ainda apresentou uma velocidade de 3,09m/s, superior ao aconselhável para as sarjetas de concreto que é de 3m/s na maioria das cidades brasileiras.

Por fim, foram feitas simulações com período de retorno de 3 anos onde foram alterados os parâmetros de infiltração adotados segundo a tabela 8, com intuito de analisar o quanto o solo em contato com sistema de trincheiras estudado é influenciado pela infiltração. Desta forma, foram construídos hidrogramas de saída para o exutório 7 (figura 43) com três diferentes parâmetros de infiltração de Horton (tabela 8). Vê-se que quanto maiores as taxas de infiltração de Horton mais o hidrograma de saída resultante se aproxima daquele gerado apenas pelo escoamento das ruas mostrado na figura 31, contudo tais diferenças não chegam a ser significativas. Assim, pode-se concluir que a eficiência do sistema estudado deve-se à capacidade de reservação do dispositivo, e que, para seu funcionamento, a

infiltração deverá ser suficiente para esgotar o volume interno no intervalo de tempo entre as precipitações.

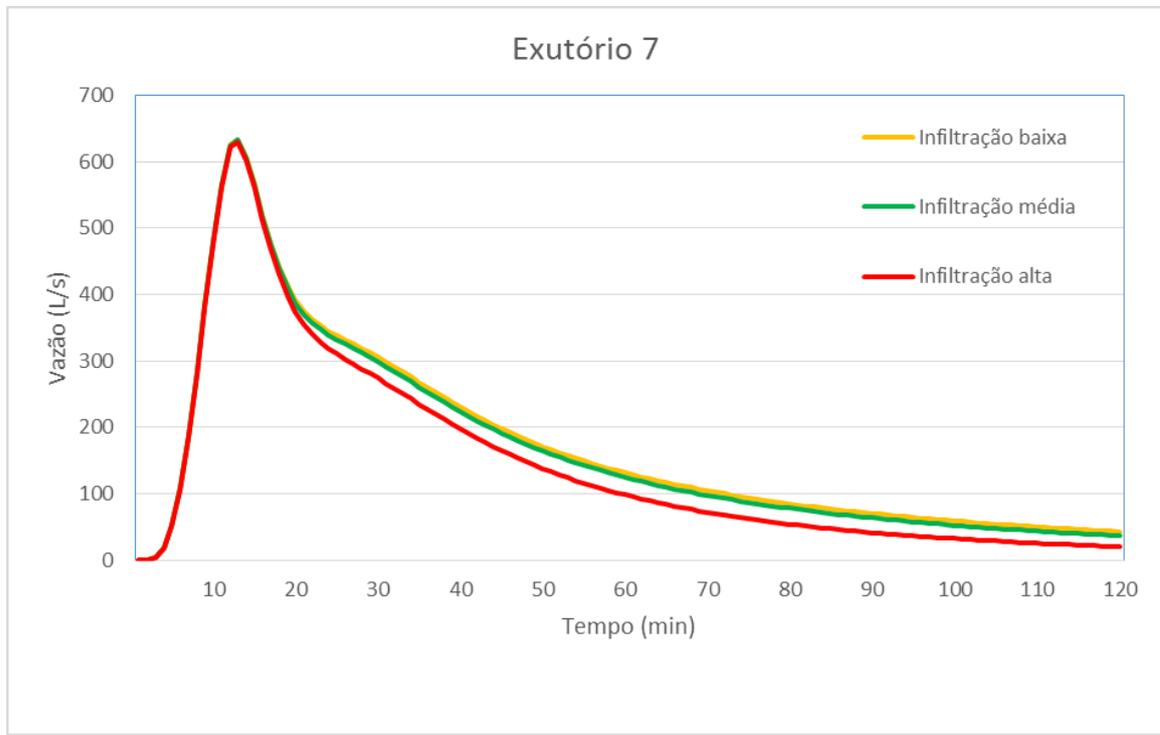


Figura 43 - Hidrograma de saída no exutório 7 com parâmetros de infiltração diferentes
Fonte: Elaborada pelo autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo analisar as consequências do escoamento superficial devido ao processo de urbanização de uma localidade na forma como encontra-se constituído, propondo uma possível solução através do uso de trincheiras de infiltração com seção padrão, tendo utilizado como local de estudo o bairro Mirandão, município do Crato/CE.

Destas análises foram construídos mapas de cheias, mostrando os pontos mais críticos com a urbanização do bairro, podendo concluir que as medidas não estruturais existentes para redução do escoamento, como a limitação da área impermeável de solo através da lei de uso e parcelamento de solo, apresentaram altos volumes no escoamento superficial, não sendo assim suficientes para evitar problemas decorrentes da urbanização.

Apesar de o modelo ter sido construído supondo um cenário com todos os lotes construídos no limite do permitido pela lei, é possível que esta situação, na realidade, seja diferente, com a ocorrência de lotes com uma área permeável superior aos 30%, como também áreas 100% impermeáveis, devido falhas na fiscalização de novas obras e reformas que não chegam ao conhecimento dos gestores e que podem agravar mais ainda a situação do cenário urbanizado.

Nas simulações em que se utilizou as trincheiras de infiltração, apenas uma das subáreas apresentou eficiência inferior a 50% na redução da vazão de cheia gerada para as sarjetas, tendo sido obtido pelas demais uma eficiência superior a 70%, sendo em alguns casos o suficiente para tornar quase nulo o extravasamento da trincheira para as ruas.

Através dos estudos realizados, conclui-se que o modelo proposto apresenta bons resultados quanto a redução da velocidade do escoamento e dos picos de cheia, podendo ser uma solução para atenuação das inundações da área em estudo, contudo não foram verificadas modificações substanciais no instante em que os picos de cheia ocorreram, tendo como principal causa a não condução do escoamento gerado pelas ruas às trincheiras.

Ao serem melhoradas as capacidades de infiltração das trincheiras do modelo, pode-se concluir que o sistema apresenta eficácia devido ao volume de reservação das trincheiras, sendo necessário, contudo que a capacidade de infiltração seja suficiente para que este volume se infiltre no solo em pelo menos 24h. Desta

forma, podem ser obtidos melhores resultados com a substituição do material de enchimento das trincheiras por outro de maior porosidade.

Apesar dos resultados obtidos com a solução proposta, para o seu perfeito funcionamento deverá existir um controle rígido na manutenção do sistema, pois como cada um dos dispositivos é interligado a vários lotes simultaneamente, seria suficiente que apenas um deles, sem o devido controle das águas que entram no sistema, causar a diminuição da eficiência do dispositivo. Uma das formas para diminuir este tipo de risco é a individualização das trincheiras por lote, através do uso de divisórias que separem uma trincheira das demais, de forma que o volume de águas evacuadas de cada lote seja direcionado para apenas um único dispositivo tornando, porém, o sistema mais oneroso.

É importante destacar os grandes benefícios trazidos através do uso das técnicas LID que, através de construções de baixa complexidade em determinada localidade, é possível obter grandes benefícios não somente para a área em estudo, mas também para as regiões próximas que recebem uma quantidade menor de água destas regiões, além dos lençóis freáticos que passam a receber recargas maiores.

Através deste estudo pode-se verificar que na bacia estudada houve um aumento considerável da quantidade de água infiltrada no solo, fazendo com que além da diminuição das cheias na localidade, ocorra também uma melhora no armazenamento do aquífero da região, que em regiões sedimentares deveriam ser práticas obrigatórias fazendo com que em épocas de escassez as perdas dos recursos hídricos disponíveis fossem diminuídas.

Como sugestão fica a calibração do modelo, podendo ser realizado uma investigação mais profunda quanto ao solo da região, materiais de construção das trincheiras e precipitações do local, incluindo estudos que analisem outras técnicas LID separadamente ou em conjunto com a apresentada.

REFERÊNCIAS

- AL-RUBAEI, A. M.; ENGSTROM, M.; VIKLANDER, M.; TOBIAS-BLECKEN, G. **Long-term Hydraulic Performance of Stormwater Infiltration Systems – a field survey**, NOVATECH, 2013.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial, RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 5, nº3 Jul/Set 2000. p 21-29.
- BAPTISTA, M., NASCIMENTO, N., BARRAUD, S., 2005. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. ABRH, Porto Alegre, 2005. 266 p.
- BARBASSA, A. P.; ANGELINI SOBRINHA, L.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. **Ambiente Construído**, Porto Alegre , v. 14, n. 2, p. 91-107, junho 2014.
- BEECHAM, Simon; CHOWDHURY, Rezaul. **Effects of changing rainfall patterns on WSUD in Australia**. Water Management, v. 165, p. 285-298, 2011.
- BELING, Fábio Alex. **Análise do desempenho do modelo SWMM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do arroio Cancela/RS**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2013
- BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H. Software para Elaboração de Projetos de Drenagem Urbana Envolvendo AutoCAD e SWMM, **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, (2009)
- BEZERRA, A. A.; CASTRO, **MANUAL- UFC8**, (interface entre autocad e swmm). Laboratório de Hidráulica Computacional. Universidade Federal do Ceará
- BRATTEBO, B. O.; BOOTH, D. B. (2003). Long-Term Stormwater Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems. **Water Research**, v. 37, n.18, p.4369-4376.
- CANHOLI, A.P., 2005. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de Textos, São Paulo. 304 p.
- COSTA J., ALEANDRI G. A.; POLETO C. Experimental Studies of Green Roof Systems as part of Sustainable Urban Watershed in order to minimize the problems of flooding. **XII International Conference on Urban Drainage**, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.
- CRATO, Lei Nº 2.590, de 22 de dezembro de 2009. Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Crato/CE
- CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Otimização das obras de controle de cheias em uma bacia urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 63-80.

DAEE / CETESB – **Drenagem Urbana, Manual de Projeto**, 2 Edição, agosto de 1980, São Paulo

DRAKE, JP; BRADFORD, A; MARSALEK, J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge. **Water Quality Research Journal of Canada (IWA Publishing)**. 48, 3, 203-222, July 2013. ISSN: 12013080

FECHINE SOBRINHO, V. **Aplicação do método das isozonas na obtenção das equações IDF de chuvas intensas dos municípios de Juazeiro do Norte, Barbalha e Crato** – CE, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2011.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, p. 1-10, 2006.

GIRONÁS J.; ROESNER L. A.; ROSSMAN L. A.; DAVIS J. (2009). **Storm Water Management Model. Applications manual**, EPA/600/R -09/077, United States Environmental Protection Agency.

GOOGLE EARTH-MAPAS. <http://mapas.google.com>. Consulta realizada em julho de 2015.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 207-214, 2008.

GUITERREZ, L. A. R. ; LUCAS, A. H. ; ANGELINI SOBRINHA, L. ; BARBASSA, A. P. ; MORUZZI, R. B. ; TEIXEIRA, B. A. N. . Problemas construtivos em um sistema vala-trincheira de infiltração. In: **14 Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2010**, Porto.

HSU, M. H.; Chen, S. H.;CHANG, T. J. Inundation Simulation for Urban Drainage Basin with Storm Sewer System. **Journal of Hydrology**, 234, 21-37 pp. 2000.

HUBER, W. C.; WELLS, W. J.; BESAW, I. K. Application of SWMM5 for BMP/LID Quality Evaluation. **World Water and Environmental Resources Congress 2005**, 2005. Anais Eletrônicos. Anchorage, Alaska, United States: ASCE, 2005.

HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E., **Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual**. U.S. Environmental Protection Agency, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=9&uf=00> >, acesso em julho de 2015.

JAMES, W.; HUBER, W. C.;DICKINSON, R. E.; PITT, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A., 2003. **User's Guide to SWMM**, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canada

JANG, S.; CHO, M.; YOON, J.; KIM, S.; KIM, L.; AKSOY, H. **Using SWMM as a Tool for Hydrologic Impact Assessment**. *Desalination*, v. 212, Issues 1-3, 55 June 2007, 344-356 pp

JUNIOR, L. M. C.; BARBASSA, A. P. Parâmetros de projeto de microrreservatório, de pavimentos permeáveis e de previsão de enchentes urbanas. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 46-54, 2006.

LIMA, V. C. G. R. **Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

LUCAS, A. H. **Monitoramento e modelagem de um sistema filtro - vala - trincheira de infiltração em escala real** - Dissertação (mestrado) - São Carlos : Universidade Federal de São Carlos, 2011. 159 f

LUCAS, A. H.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B.; BARBASSA, A. P.. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro , v. 20, n. 1, p. 17-28, mar. 2015

MARTINS, J. R. S. **Gestão da Drenagem Urbana: Só tecnologia é suficiente**. Julho, 2012. Disponível em <http://www.daee.sp.gov.br/outorgatreinamento/Obras_Hidr%C3%A1ulic/gestaodrenagem.pdf>.

MCCUTCHEON, M.; WRIDE, D.. Shades of Green: Using SWMM LID Controls to Simulate Green Infrastructure. 2012 Stormwater and Urban Water Systems Modeling **Conference. Pragmatic Modeling of Urban Water Systems**, Monograph 21, pp. 289-301. Toronto, Ontario, Canada : CHI Press (2013)

MEDEIROS, P. A.; CORDERO, A.; TACHINI, M. Aproveitamento de água da chuva associado à trincheira de infiltração. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió-AL. 17p, 2011.

MELO, T. A. T. (2011) **Jardim de Chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 137p.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**. 2014, vol.14, n.4, pp. 147-165. ISSN 1678-8621.

MOREIRA, A. A. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Granjeiro- Crato-CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo** – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte. 2013. 163 f.

- MOURA, Priscilla Macedo. **Contribuição para a avaliação global de sistemas de drenagem urbana**. 2004.. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil.
- MUJOVO, M. J. N.; BENTO, T. A.; FINOTTI, A. R.; SOUSA, V. C. B. S.. Calibração do Modelo Computacional Chemflo para Simulação de uma Trincheira de Infiltração. **X Encontro Nacional de Águas Urbanas Simpósio**. São Paulo, SP. 2014.
- PARKINSON, J.; MILOGRANA, J.; CAMPOS, L. C.; CAMPOS, R. **Drenagem Urbana Sustentável no Brasil**. Relatório do Workshop em Goiânia-GO, 2003
- PEIXOTO, V. C. 2011. 111p. **Análise Paramétrica e Dimensionamento de Poços de Infiltração para Fins de Drenagem Urbana**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- POLETO, Cristiano. SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica. **Revista Thema**, v. 8, n. 1, 2011.
- PORTO, R.M. (1998). **Hidráulica Básica** . EESC/USP, São Carlos - SP, 540 p.
- REIS, R. P. A; OLIVEIRA, L. H.; SALES, M. M. Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 99-117, abr./jun. 2008
- ROSSETI, K. A. C.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. S. **Abordagens sistêmicas dos efeitos da implantação de telhados vegetados**, Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium, Ituiutaba, v. 4, n. 1, p. 55-77, jan./jun. 2013
- ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5**. U.S.EPA. Cincinnati, OH, p.295. 2010.
- Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais**. São Paulo, 2012.
- SILVA, J. P. **Estudos Preliminares para Implantação de Trincheiras de Infiltração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2007
- SILVEIRA, A. L. L da; GOLDENFUM, J. A. Metodologia generalizada para prédimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 157-168, 2007.
- SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M.. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.
- SOUZA, V. C. B. de. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. Tese de doutorado. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

TOMAZ, Plínio. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. São Paulo: Navegar, 2002. 475 p..

TUCCI, C. E. M. (2001). **Aspectos Institucionais do Controle das Inundações Urbanas. Avaliação e controle da Drenagem Urbana**. Porto Alegre, Ed. ABRH, pp. 405-419,

TUCCI, C. E. M. (org). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: UFRGS/Edusp/ABRH, 2009. 943P

TUCCI, C. E. M. e BERTONI, J. C. (2003). **Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre**. Disponível em: <<http://www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/DisciplinaDrenagem.pdf>>. Acesso em:15/07/2015.

TUCCI, C. E. M. Elementos para o controle da drenagem urbana. TUCCI, C. E. M; MARQUES, D. M. L. M. (Org.). **Avaliação e controle da drenagem urbana** . Porto Alegre: ABRH, v. 2, p. 421-437, 2001.

TUCCI, C.E.M., PORTO, R.L. e BARROS, M.T., 1995. **Drenagem Urbana**. 1a edição. ABRH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stomwater Best Management Pratices and Detention**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1993.450p.

VANUYTRECHT Eline; MECHELEN Carmen Van; MEERBEEK Koenraad Van; WILLEMS Patrick; HERMY Martin; RAES Dirk. **Runoff and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios, Landscape and Urban Planning**, Volume 122, February 2014, Pages 68-77, ISSN 0169-2046

WARWICK, J.; TADEPALLI, P. (1991). "Efficacy of SWMM Application." J. Water Resour. Plann. Manage., 117(3), 352-366.

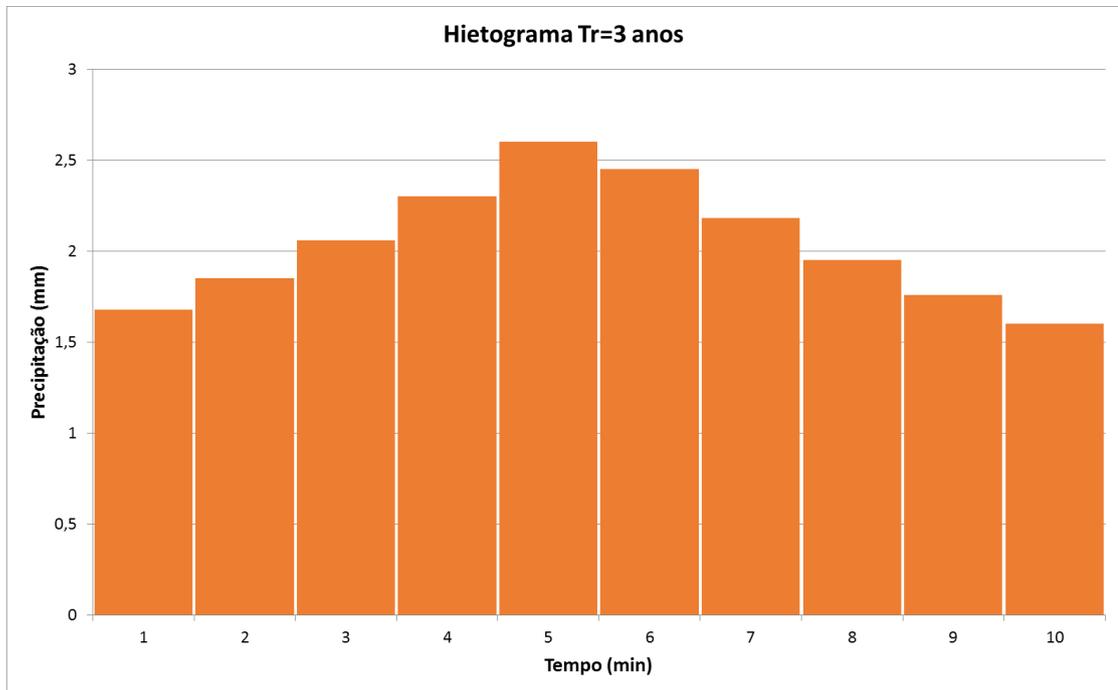
APÊNDICE A – HIETOGRAMAS DE PROJETO

Figura 44 - Hietograma Tr=3 anos
Fonte: Elaborada pelo autor

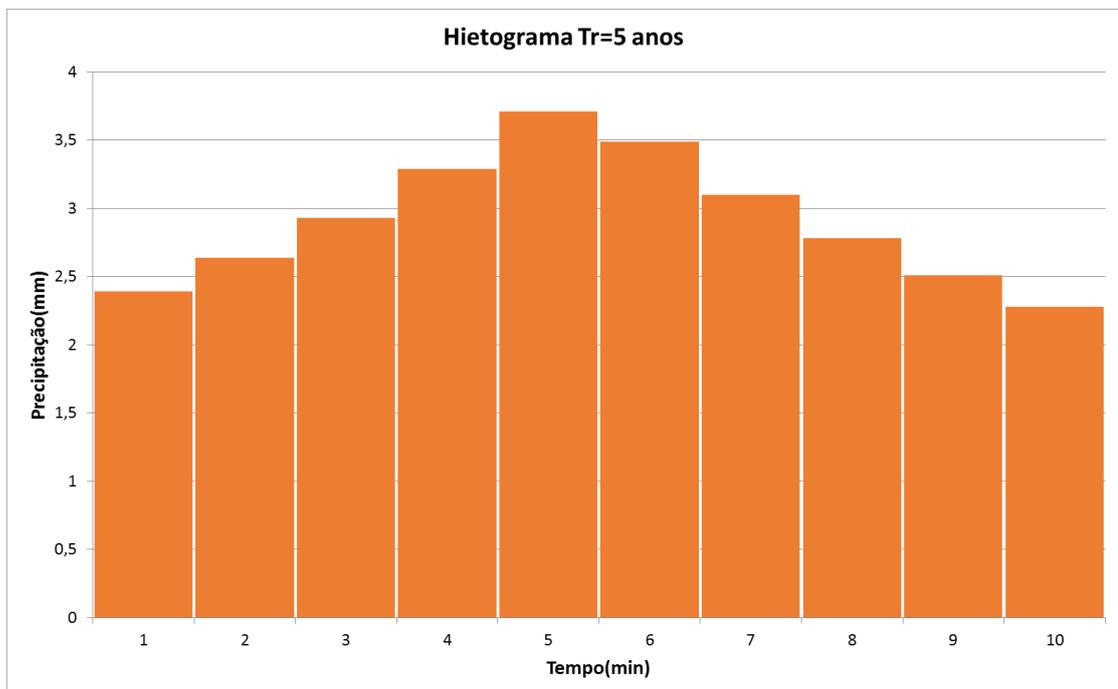


Figura 45 - Hietograma Tr=5 anos
Fonte: Elaborada pelo autor

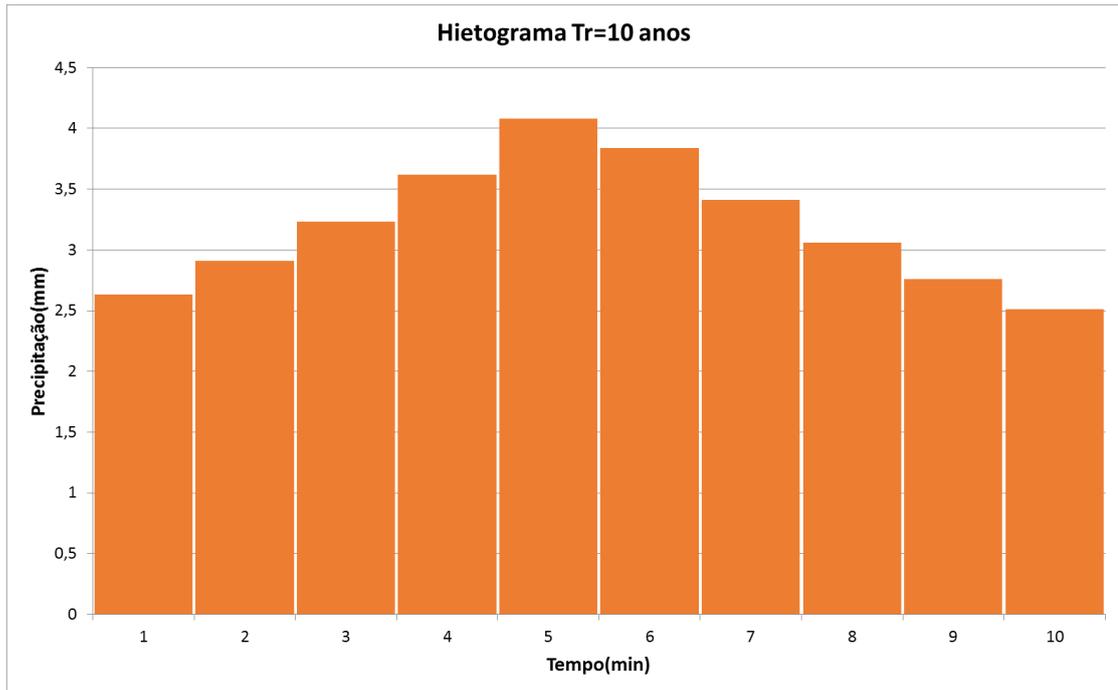


Figura 46 - Hietograma Tr=10 anos
Fonte: Elaborada pelo autor

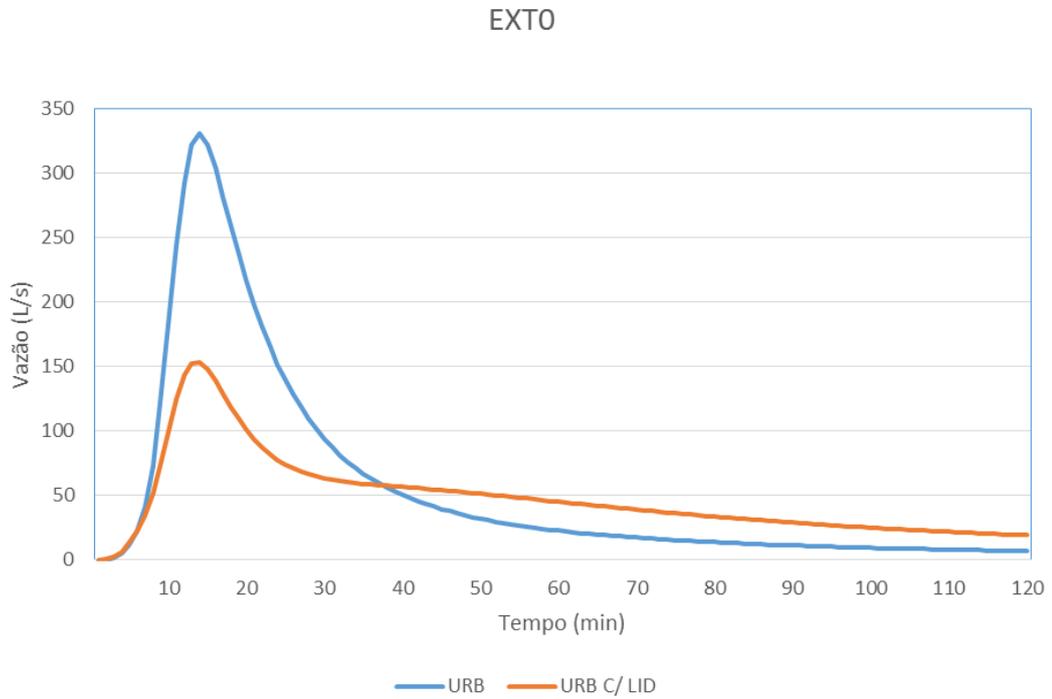
APÊNDICE B – HIDROGRAMA DE SAÍDA DOS EXUTÓRIOS PARA T=5ANOS

Figura 47 - Hidrograma do Exutório 0
Fonte: Elaborada pelo autor

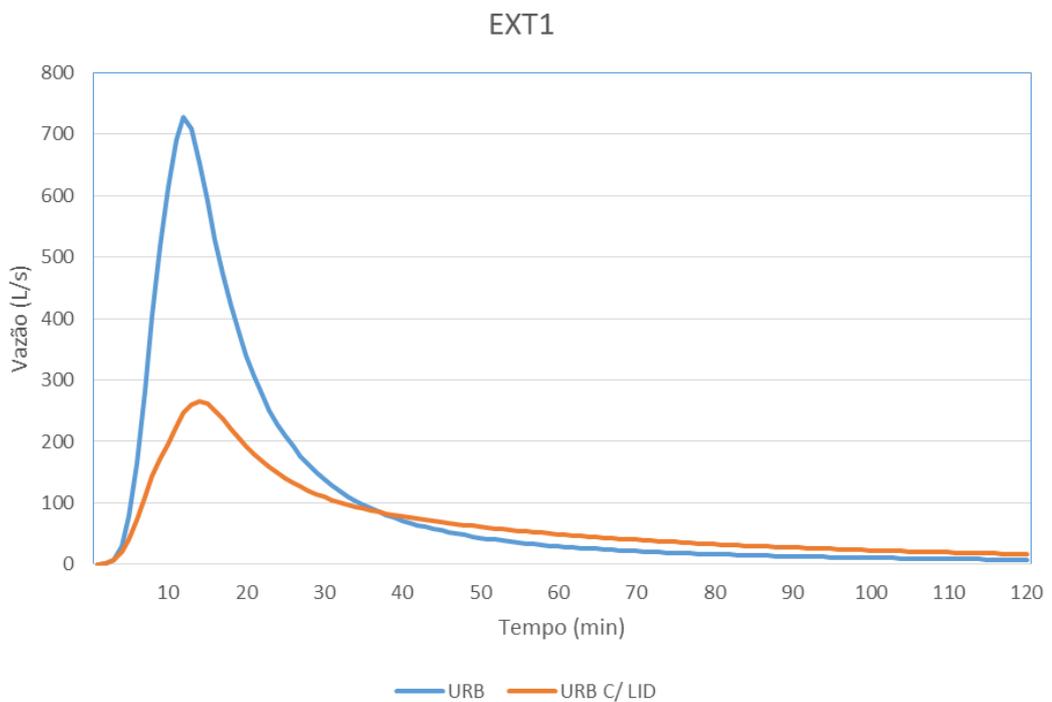


Figura 48 - Hidrograma do Exutório 1
Fonte: Elaborada pelo autor

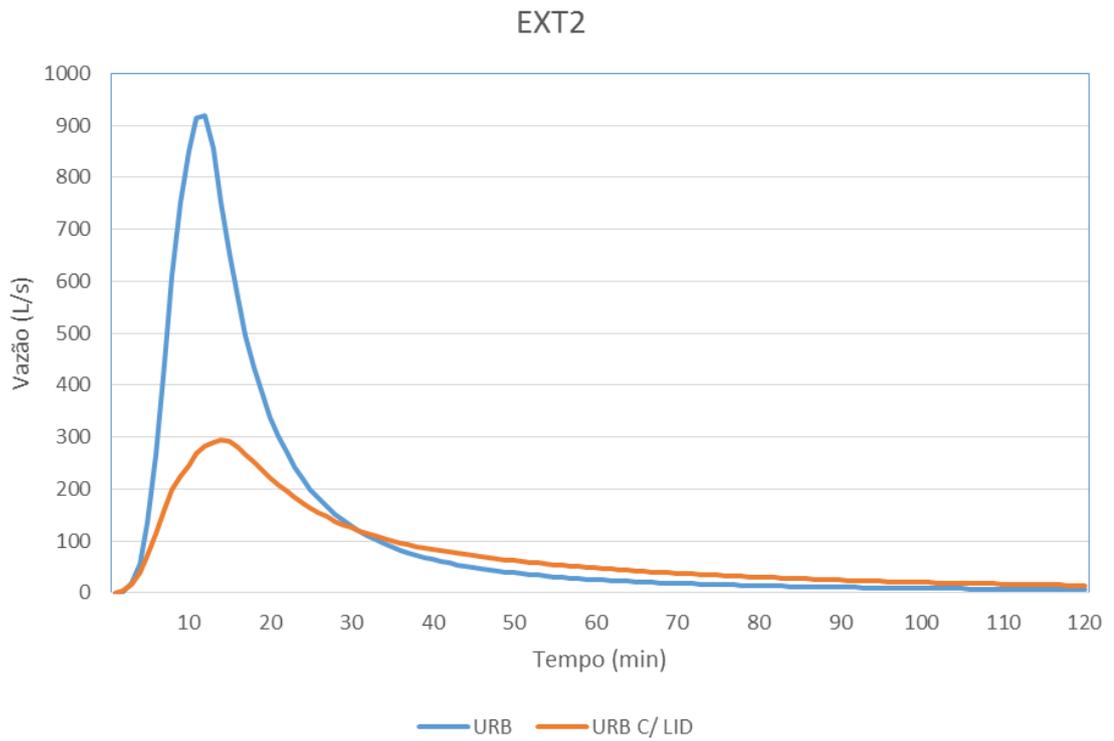


Figura 49 - Hidrograma do Exutório 2
Fonte: Elaborada pelo autor

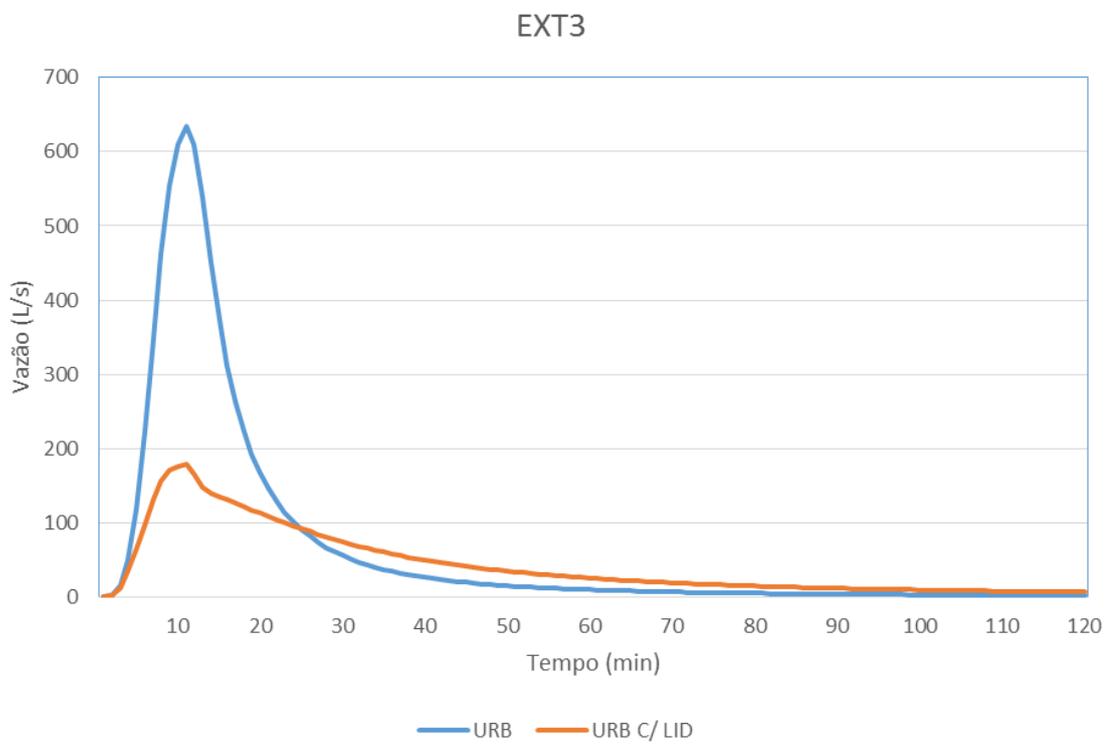


Figura 50 - Hidrograma do Exutório 3
Fonte: Elaborada pelo autor

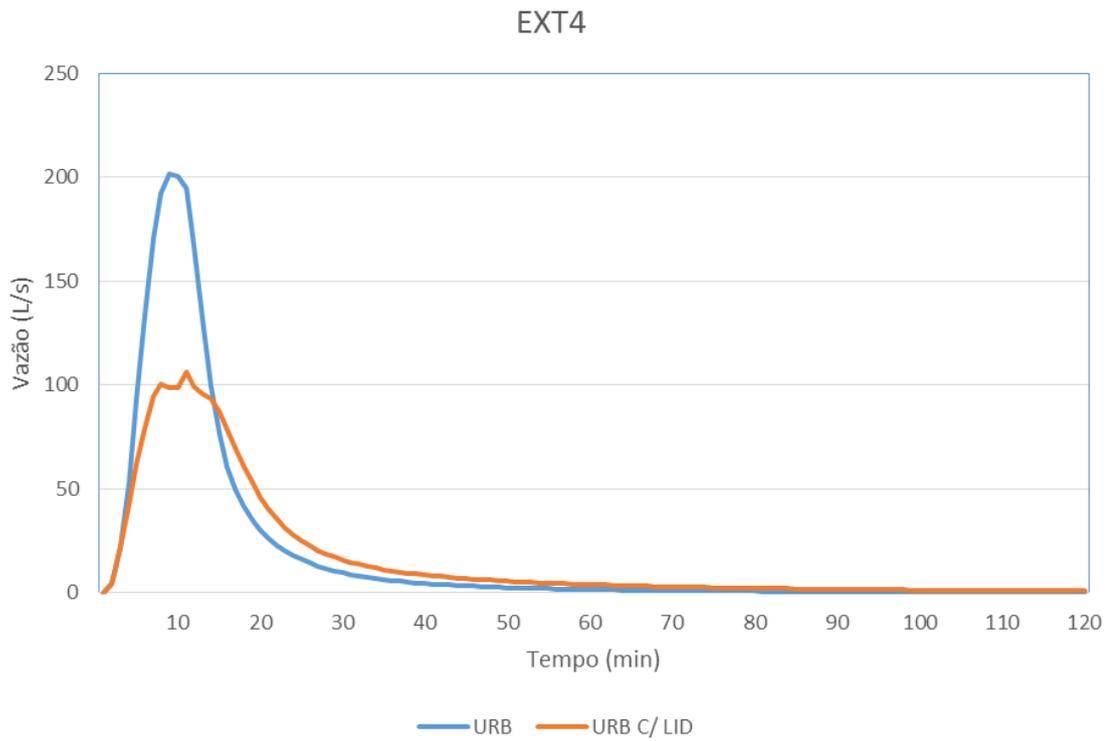


Figura 51 - Hidrograma do Exutório 4
Fonte: Elaborada pelo autor

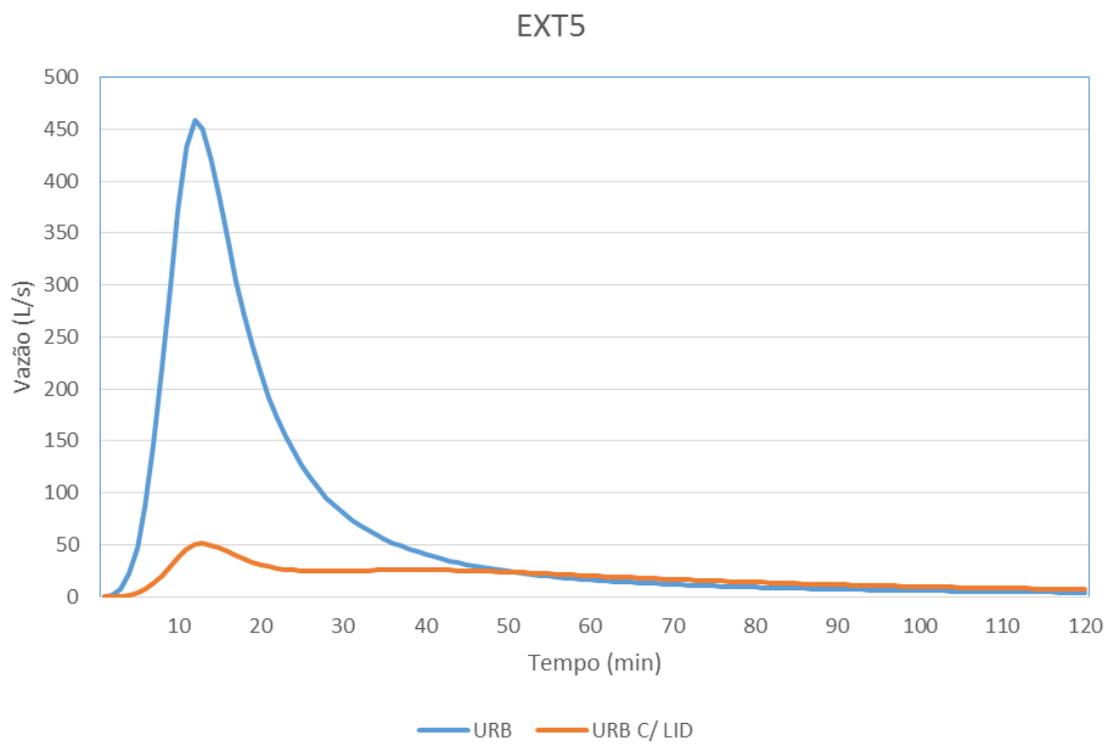


Figura 52 - Hidrograma do Exutório 5
Fonte: Elaborada pelo autor

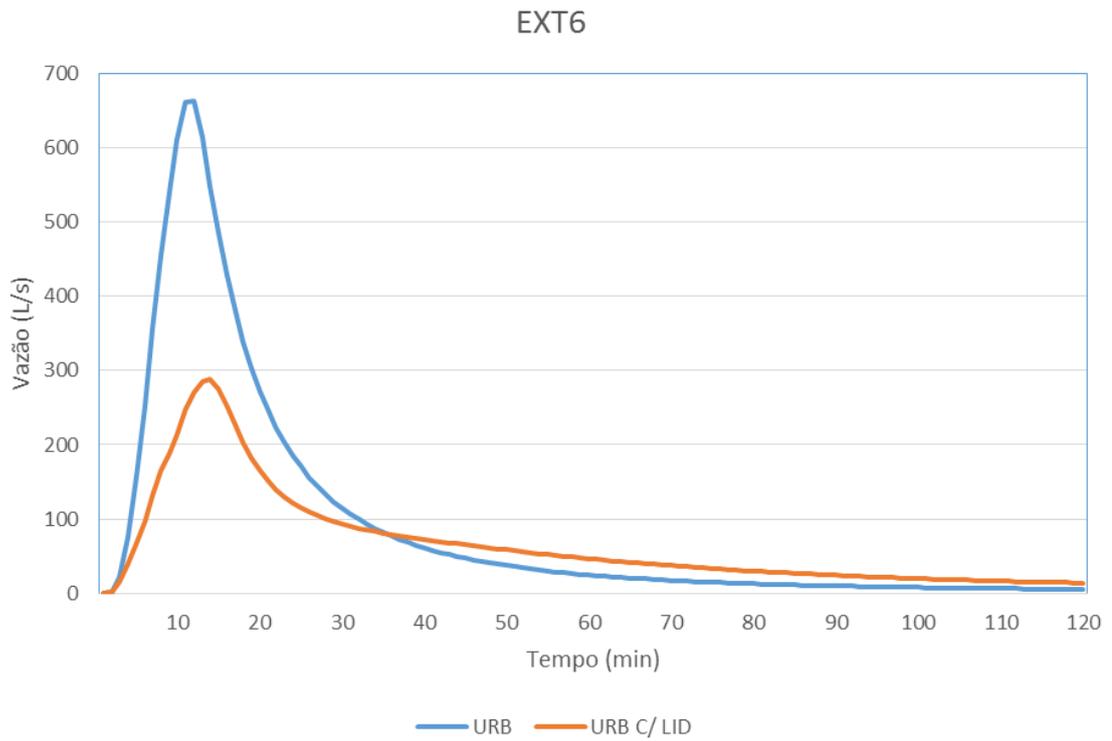


Figura 53 - Hidrograma do Exutório 6
Fonte: Elaborada pelo autor

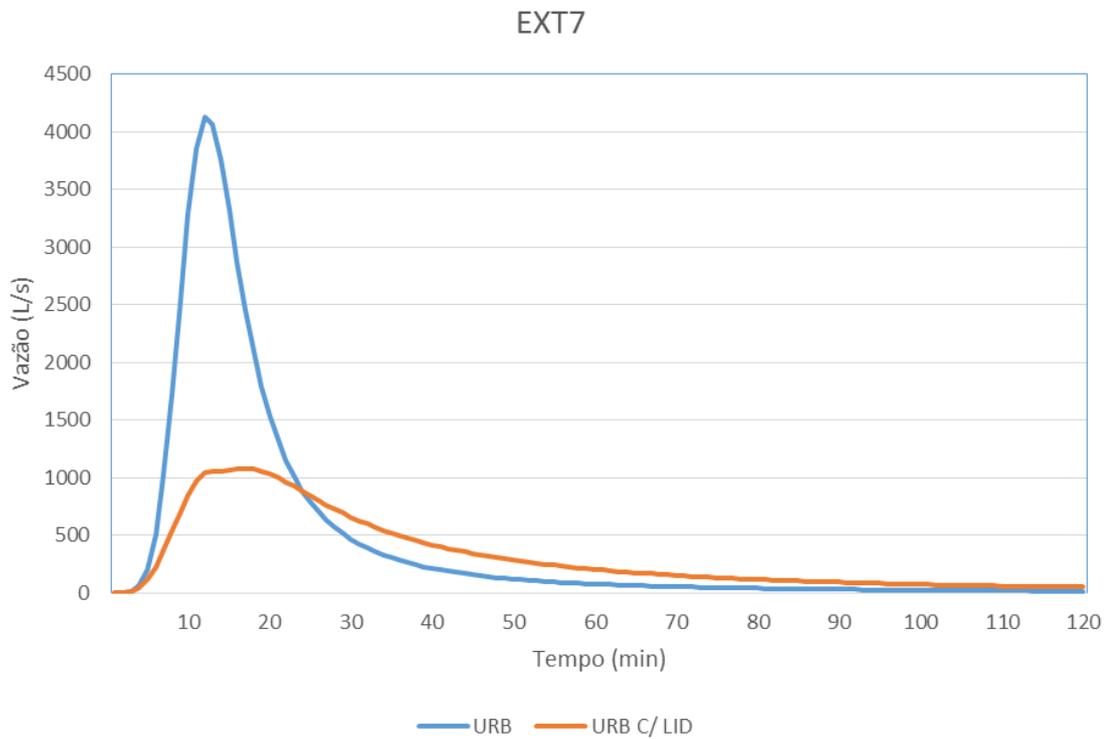


Figura 54 - Hidrograma do Exutório 7
Fonte: Elaborada pelo autor

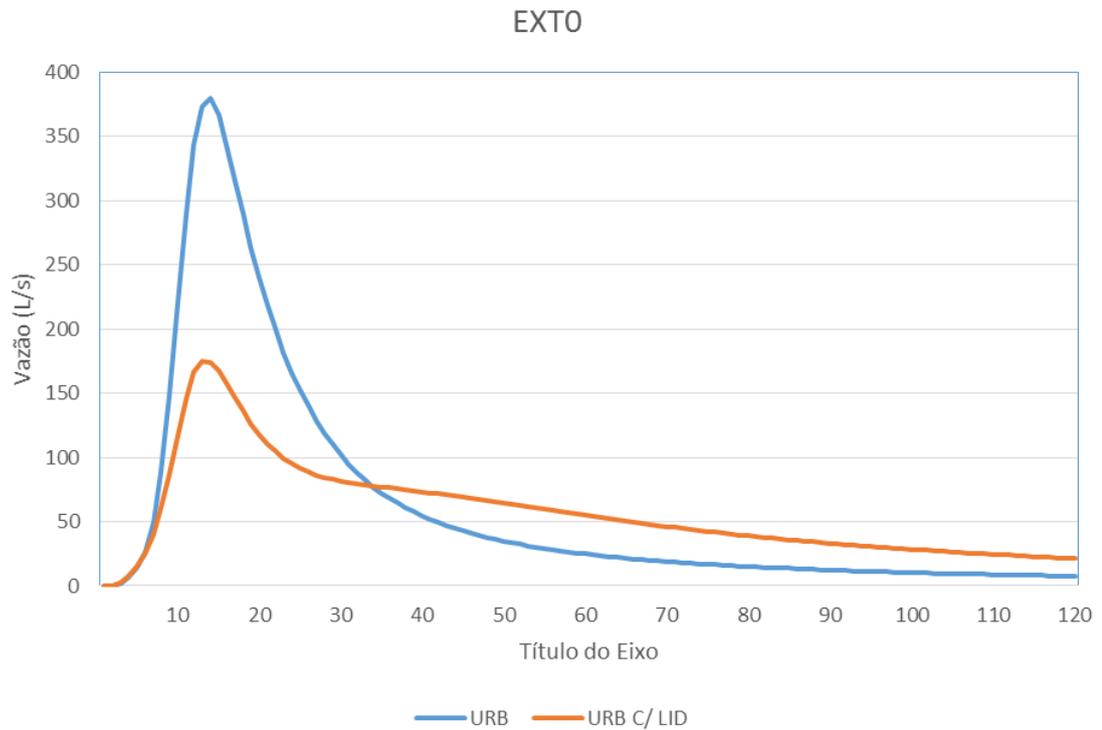
APÊNDICE C – HIDROGRAMA DE SAÍDA DOS EXUTÓRIOS PARA T=10ANOS

Figura 55 - Hidrograma do Exutório 0
Fonte: Elaborada pelo autor

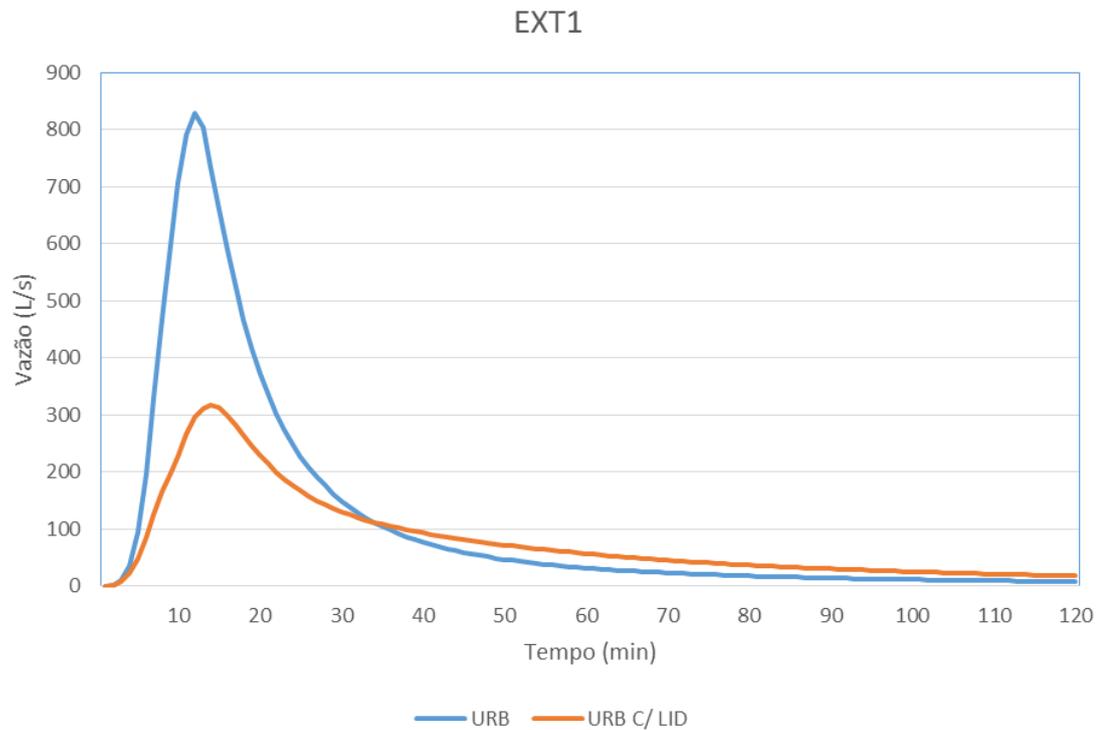


Figura 56 - Hidrograma do Exutório 1
Fonte: Elaborada pelo autor

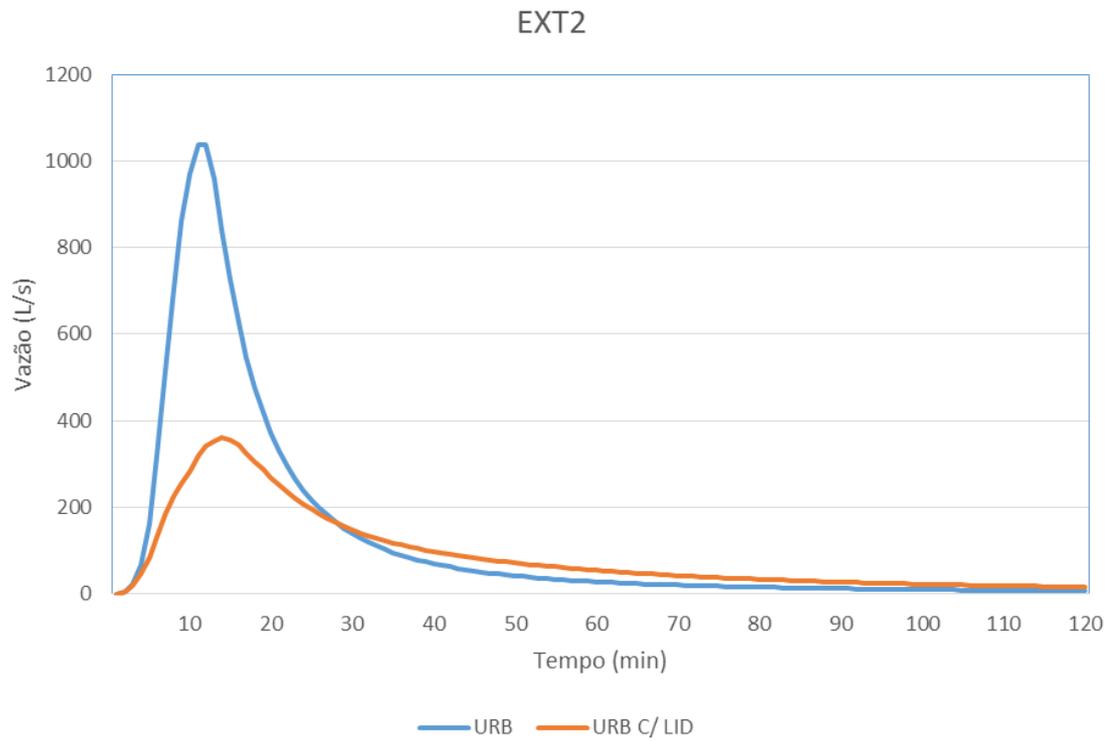


Figura 57 - Hidrograma do Exutório 2
Fonte: Elaborada pelo autor

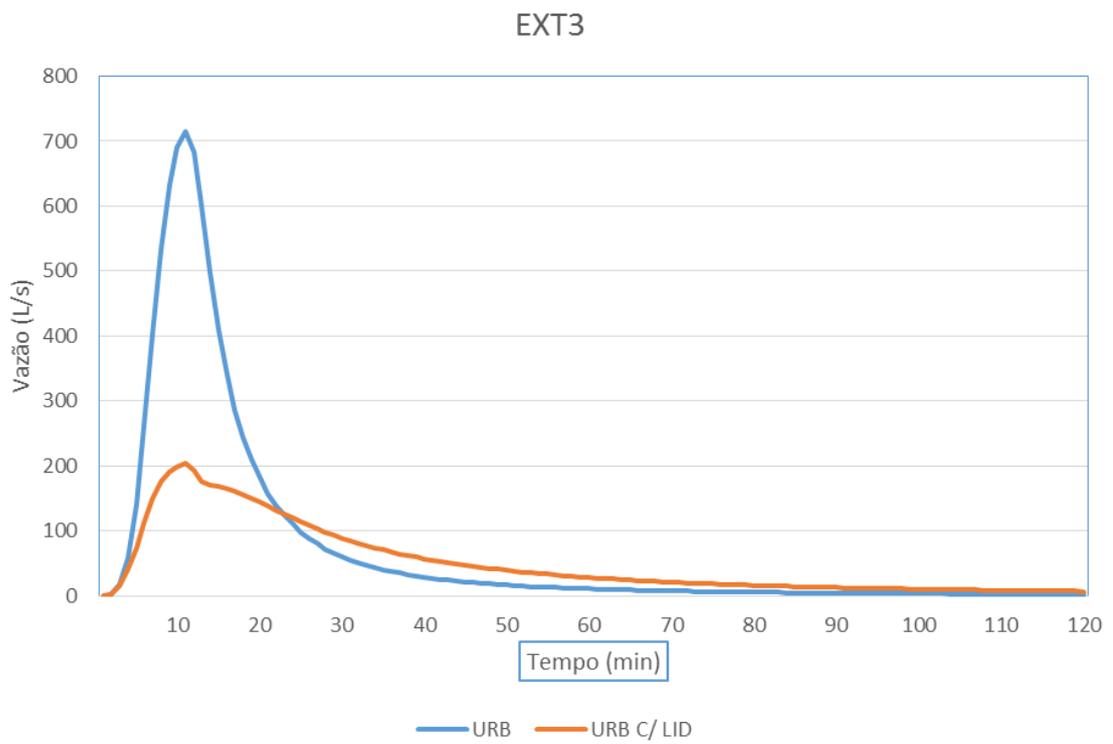


Figura 58 - Hidrograma do Exutório 3
Fonte: Elaborada pelo autor

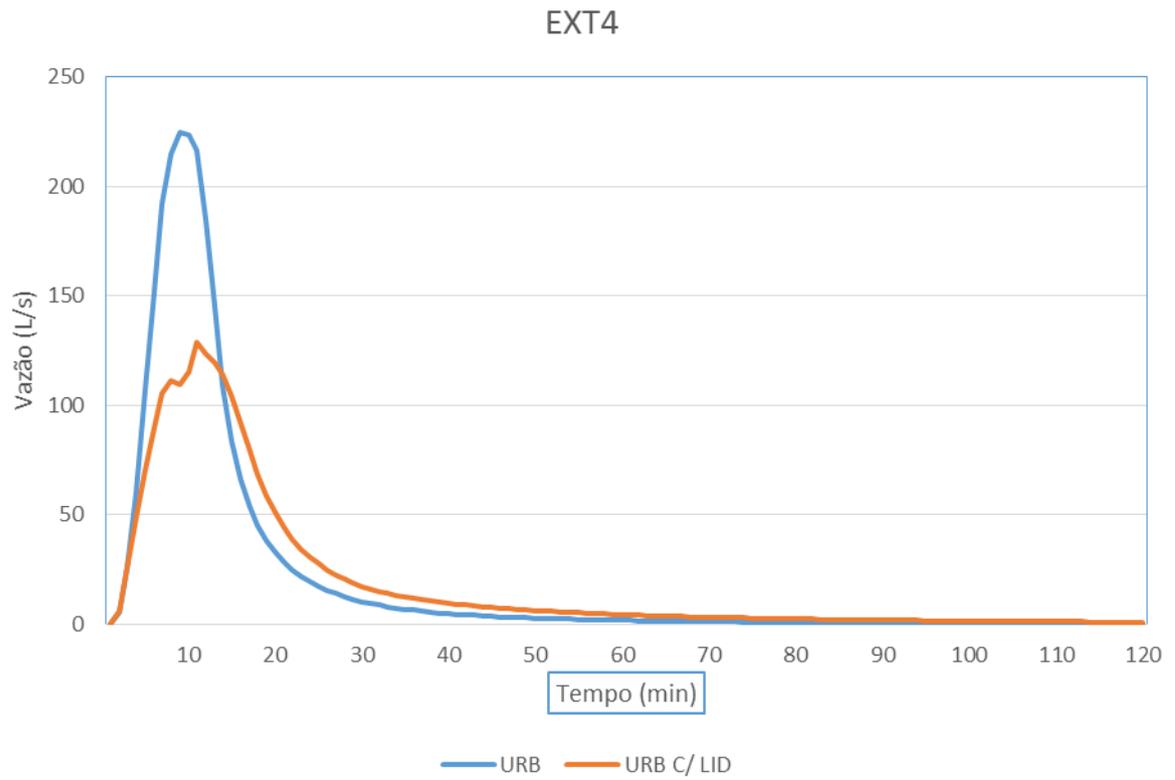


Figura 59 - Hidrograma do Exutório 4
Fonte: Elaborada pelo autor

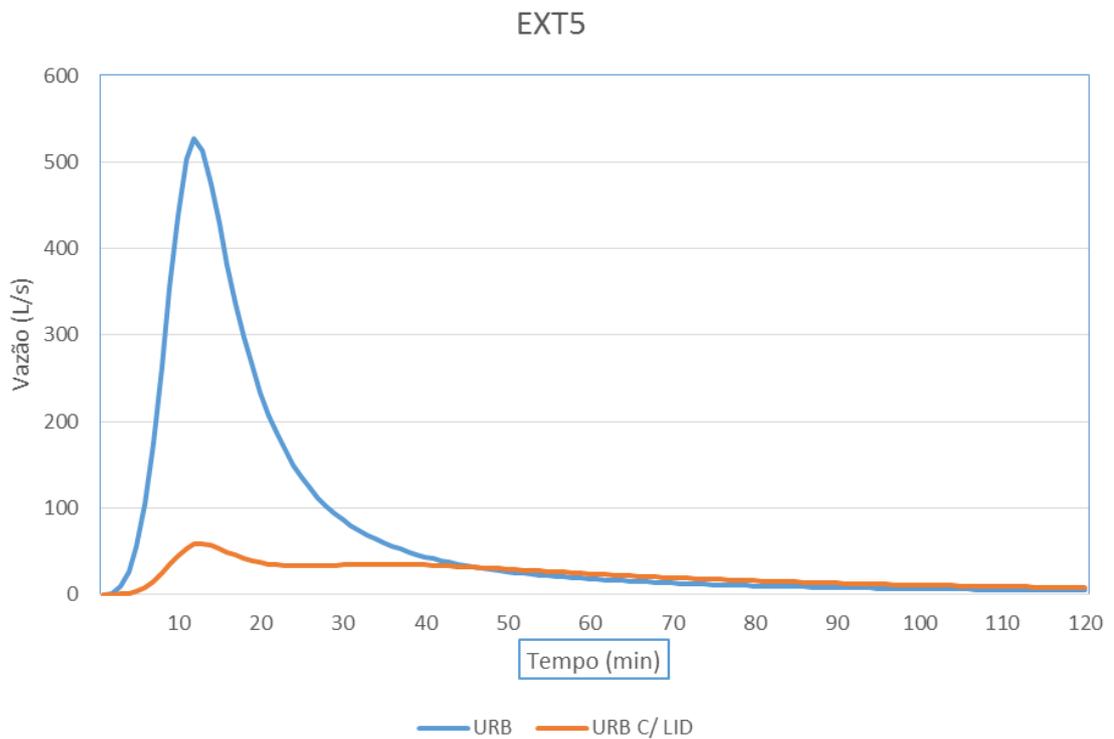


Figura 60 - Hidrograma do Exutório 5
Fonte: Elaborada pelo autor

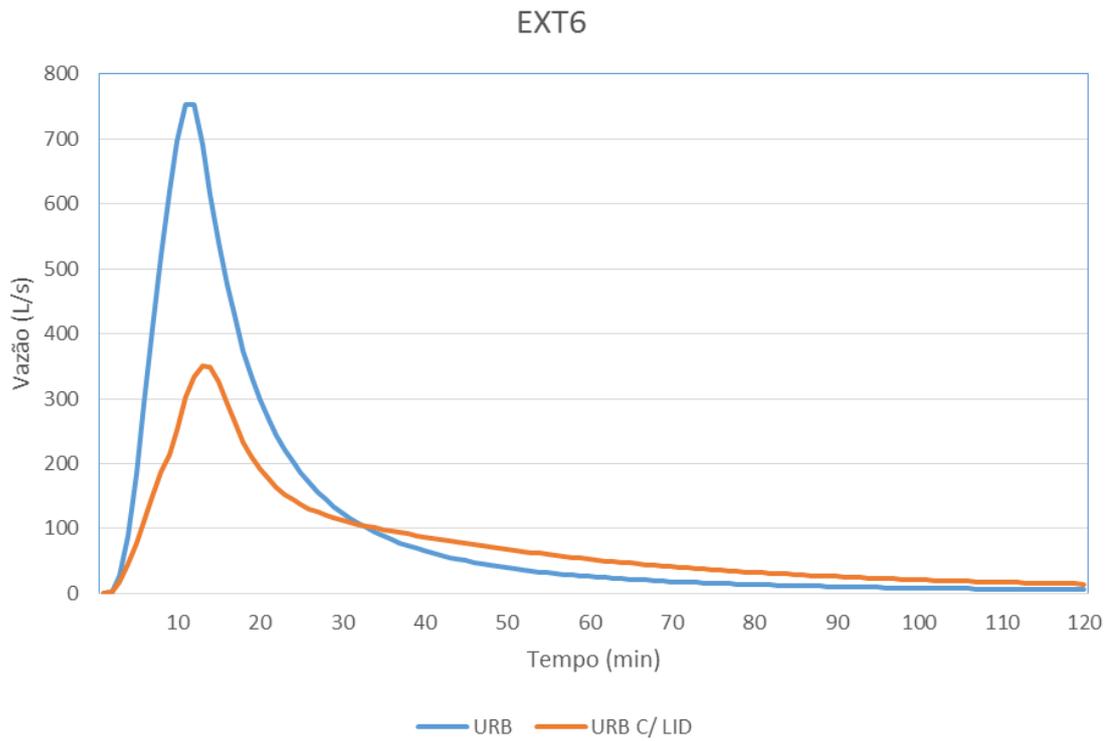


Figura 61 - Hidrograma do Exutório 6
Fonte: Elaborada pelo autor

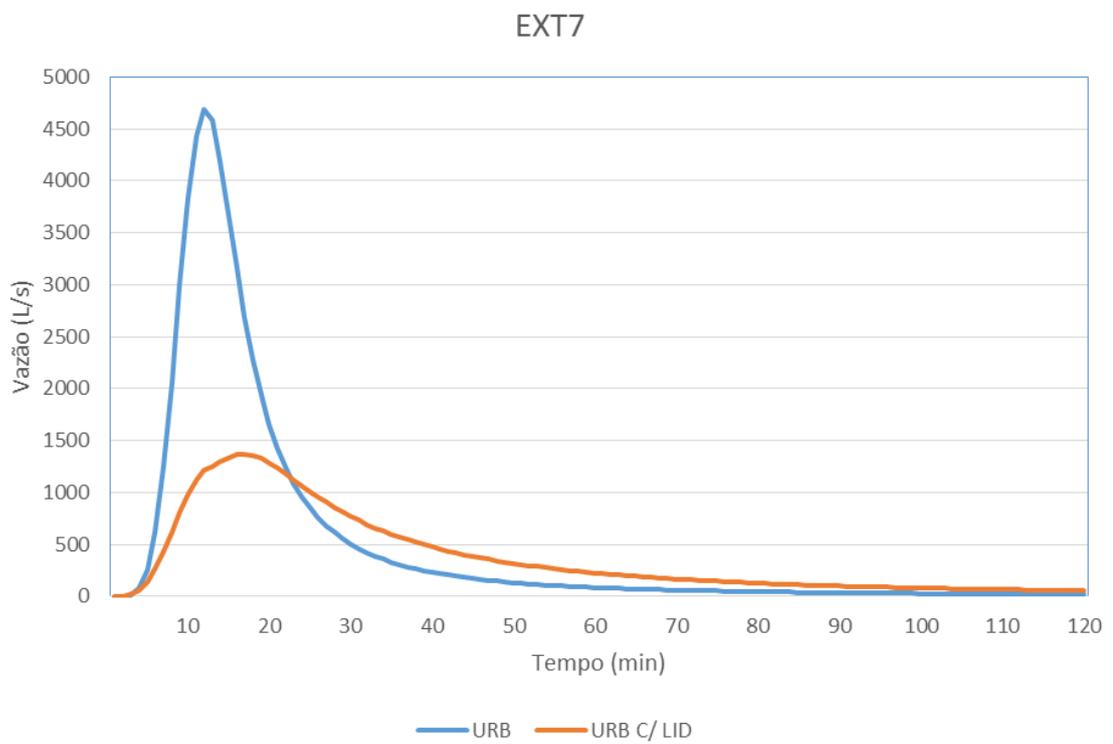


Figura 62 - Hidrograma do Exutório 7
Fonte: Elaborada pelo autor

ANEXO A – METODOLOGIA DE CÁLCULO DE OUTROS DISPOSITIVOS DE DRENAGEM NA FONTE.

Silveira e Goldenfum (2007) desenvolveram uma metodologia generalizada para pré-dimensionamento de diversos dispositivos de controle na fonte com base no método da “curva envelope”.

Neste método, a curva de massa no tempo, dos volumes afluentes ao dispositivo é comparada com a curva de massa dos volumes dela efluentes, e a máxima diferença entre as duas curvas é o volume de dimensionamento.

Para a solução do volume máximo, utiliza-se a expressão de Talbot abaixo:

$$I = \frac{aT^b}{t+c} \quad (19)$$

Onde

I é a intensidade da chuva (mm/h);

T é o período de retorno em anos;

t é a duração da chuva em minutos;

a, b, c são parâmetros da equação.

Porém, a expressão de Talbot não é muito comum no Brasil, sendo mais comum equações para chuvas idf escritas da seguinte forma:

$$I = \frac{kT^m}{(t+d)^n} \quad (20)$$

Contudo, pode-se converter este tipo de equação para uma expressão de Talbot, utilizando as seguintes expressões:

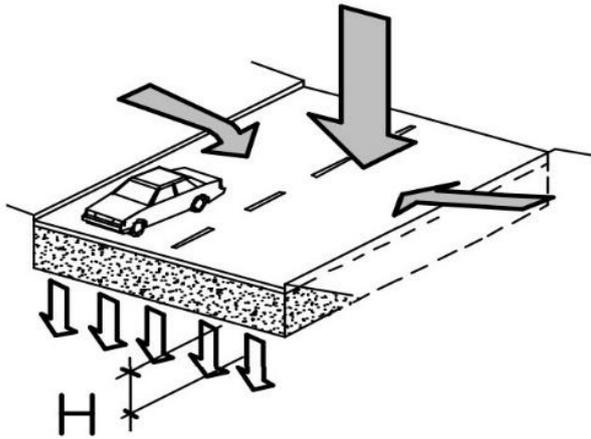
$$a = 0,68 \cdot k \cdot \exp(0,06n^{-0,26}d^{1,13})$$

$$b = m$$

$$c = 1,32 \cdot n^{-2,28} \cdot d^{0,89}$$

Com base nestes parâmetros iniciais, as expressões para cada uma das medidas de controle são:

Pavimento permeável

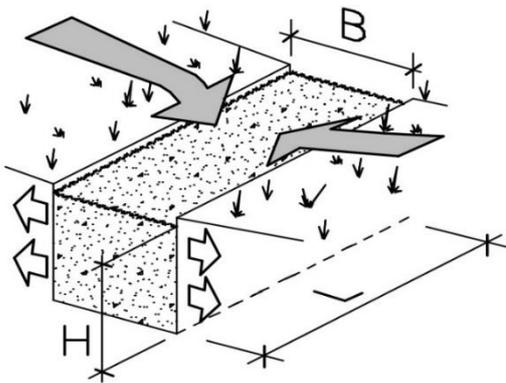


Fonte: Silveira e Goldenfum, (2007)

$$H = \frac{V_{max}}{\eta}$$

$$V_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_s} \right)^2$$

Trincheiras de infiltração



Fonte: Silveira e Goldenfum, (2007)

$$H = \left[\frac{k_1(k_2 - \sqrt{\eta})}{\eta - k_2^2} \right]^2$$

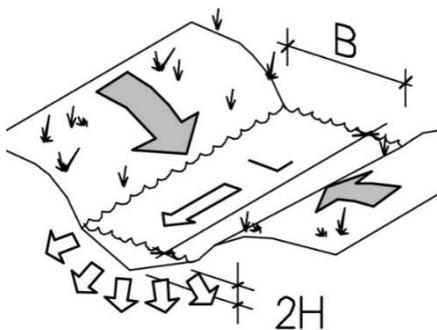
$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}}$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{q_s}$$

$$\beta = \frac{C \cdot A}{B \cdot L}$$

$$\gamma = \frac{2}{B}$$

Vala de infiltração

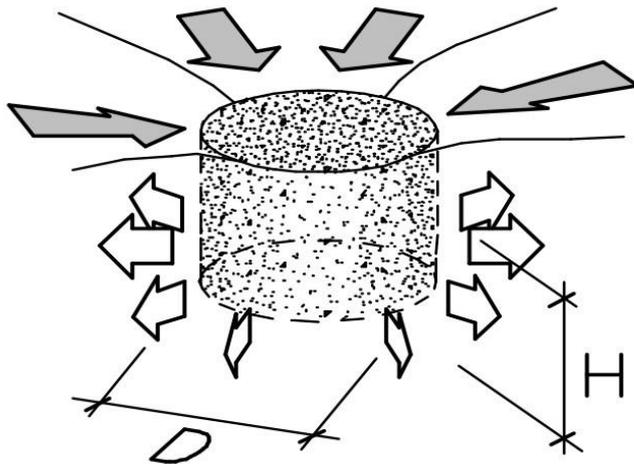


Fonte: Silveira e Goldenfum, (2007)

$$H = V_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_s} \right)^2$$

$$\beta = \frac{C \cdot A}{B \cdot L}$$

Poços de infiltração



Fonte: Silveira e Goldenfum, (2007)

$$H = \left[\frac{k_1(k_2 - \sqrt{\eta})}{\eta - k_2^2} \right]^2$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}}$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{q_s}$$

$$\beta = \frac{4 \cdot C \cdot A}{\pi \cdot D^2}$$

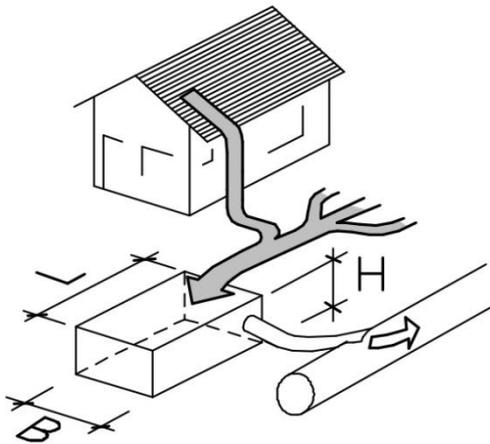
$$\gamma = \frac{4}{D}$$

Micro reservatórios

$$V_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{q_s} \right)^2$$

$$\beta = \frac{C \cdot A}{B \cdot L}$$

Infiltrante



$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}}$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{q_s}$$

$$\gamma = \frac{2 \cdot (L + B)}{L \cdot B}$$

Estanque

Fonte: Silveira e Goldenfum, (2007)

$$H = V_{max}$$

$$\sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{H} = 1$$