

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Diego Marangoni Santos

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVAS
PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PAVIMENTO
PERMEÁVEL NO CONTROLE DAS ÁGUAS PLUVIAIS**

Porto Alegre
dezembro 2016

DIEGO MARANGONI SANTOS

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVAS
PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PAVIMENTO
PERMEÁVEL NO CONTROLE DAS ÁGUAS PLUVIAIS**

Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Joel Avruch Goldenfum

Porto Alegre
dezembro 2016

DIEGO MARANGONI SANTOS

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVAS
PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PAVIMENTO
PERMEÁVEL NO CONTROLE DAS ÁGUAS PLUVIAIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2016

Prof. Joel Avruch Goldenfum
Dr. em Hidrologia pelo Imperial
College/University of London
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Joel Avruch Goldenfum (UFRGS)
Dr. pelo Imperial College/University of London

Prof. Fernando Dornelles (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Nilza Maria Dos Reis Castro (UFRGS)
Dr. pela Université Louis Pasteur, França

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiaram, especialmente durante o período deste Curso de Graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, principalmente aos meus pais, Aramis e Marilda, e irmã, Milena, pelo incentivo e carinho durante essa etapa da minha vida.

Agradeço a Juliana, que não mediu esforços para me apoiar incondicionalmente em todas as decisões nesse período.

Agradeço aos meus amigos, que são minha segunda família e foram fundamentais em todo esse processo.

Agradeço também a todos professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Joel Avruch Goldenfum e ao Prof. Fernando Dornelles, pela dedicação, conhecimentos transmitidos e tempo dedicado a este trabalho.

O sucesso frequentemente está a apenas uma ideia de
distância.

Frank Tyge

RESUMO

A urbanização das cidades gera muitos impactos sobre o meio ambiente, referente à drenagem urbana, a impermeabilização provoca um aumento dos volumes de escoamento superficiais combinado com uma redução do tempo de concentração da bacia, provocando poluição dos cursos d'água além de alagamentos e inundações mais frequentes. Esse trabalho procurou propor um sistema de simulação de chuva adequado a avaliar a capacidade de infiltração da camada superior de um módulo experimental de pavimento permeável localizado no estacionamento de veículos leves do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A revisão bibliográfica contempla os impactos do desenvolvimento urbano referentes a drenagem urbana e medidas de controle mitigatórias, sendo a utilização de pavimentos permeáveis descrita com maior ênfase. A proposição do simulador de chuva constituiu em um sistema de irrigação por aspersão móvel com uma linha principal com oito aspersores e duas derivações com um aspersor cada, que possuem três diferentes ângulos de rotação de funcionamento (90, 180 e 360°) com objetivo de diminuir o consumo de água. Todas tubulações e grande parte das conexões propostas são de PVC com engate rápido para facilitar a montagem e desmontagem. O reservatório possui uma capacidade de 7500 L, suficiente para uma simulação da chuva de projeto, determinada adequada para avaliar a infiltração, de 10 minutos de duração com tempo de retorno de 25 anos. O conjunto moto-bomba utilizado proporcionou uma vazão média de funcionamento de 43,07 m³/h, e potência de 15,2 CV, proporcionando uma intensidade de precipitação bastante satisfatória à determinada pela chuva de projeto. As verificações realizadas mostraram que os parâmetros hidráulicos detalhados de cada trecho, e que as características encontradas do sistema obtiveram valores dentro dos critérios de projeto iniciais adotados, descritos em literatura.

Palavras-chave: Simulador de chuva. Pavimento permeável. Drenagem Urbana.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	20
Figura 2 – Crescimento urbano e rural no Brasil.....	22
Figura 3 – Diferenças no hidrograma devido à urbanização	24
Figura 4 – Relação entre crescimento da população e o número de eventos de cheia em Belo Horizonte	24
Figura 5 – Curva de atendimento às demandas de drenagem urbana.....	27
Figura 6 – Detenção off-line integrada à recreação.....	29
Figura 7 – Detenção on-line integrada à recreação	29
Figura 8 – Seção típica de um pavimento permeável.....	32
Figura 9 – Sistema de irrigação por aspersão de hortaliças.....	39
Figura 10 – Sistema convencional de aspersão	40
Figura 11 – Conjunto moto-bomba centrífuga de eixo horizontal	40
Figura 12 – Tubos de PVC para irrigação	41
Figura 13 – Conexões e para tubulações de PVC.....	42
Figura 14 – Aspersores convencionais	42
Figura 15 – Vista frontal do local do módulo experimental durante sua construção	56
Figura 16 – Planta baixa do pavimento permeável com suas dimensões e localização dos pontos de coleta de amostras para caracterização do solo.....	57
Figura 17 – Aspersor Setorial 1” Bronze Macho	60
Figura 18 – Gráfico de comportamento do aspersor com giro completo e pressão de funcionamento de 40 m.c.a.....	60
Figura 19 – Tubo de PVC com engate roscável plástico.....	61
Figura 20 – União soldável.....	61
Figura 21 – Adaptador soldável com flanges livres para caixa d’agua	62
Figura 22 – Registro gaveta.....	62
Figura 23 – Niple rosca	62
Figura 24 – Conexões das tubulações em PVC	63
Figura 25 – Curvas características do conjunto moto-bomba	64
Figura 26 – Planta baixa do arranjo final	65
Figura 27 – Detalhes dos trechos 1 e 2.....	65
Figura 28 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen	69
Figura 29 – Curva do sistema x Curva da carga manométrica da bomba	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de perda de carga C da equação de Hazen-Williams	50
Tabela 2 – Coeficiente de carga localizada K	51
Tabela 3 – Comprimentos equivalentes em metros de canalização para tubos rugosos (tubo de aço-carbono, galvanizado ou não).....	52
Tabela 4 – Comprimentos equivalentes em metros de canalização para tubos lisos (tubos de plástico, cobre ou liga de cobre).....	52
Tabela 5 – Classificação do desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional em função do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).....	58
Tabela 6 – Características técnicas do aspersor setorial 1” bronze macho	60
Tabela 7 – Aproximação da vazão do aspersor e intensidade total sobre o pavimento	66
Tabela 8 – Intensidade efetiva	67
Tabela 9 – Comprimentos equivalentes (L_e) das singularidades utilizadas	71
Tabela 10 – Perda de carga total do sistema com pressões de funcionamento constantes.....	72
Tabela 11 – Parâmetros hidráulicos considerando nível máximo no reservatório	76
Tabela 12 – Parâmetros hidráulicos considerando nível médio no reservatório	76
Tabela 13 – Parâmetros hidráulicos considerando nível próximo do mínimo no reservatório	76
Tabela 14 – Orçamento dos componentes do sistema de simulação de chuva proposto (valores obtidos em outubro de 2016).....	77

LISTA DE SÍGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCE – American Society of Civil Engineers

EPA – *Environmental Protection Agency*

CUC – Coeficiente de Christiansen

DN – Diâmetro Nominal

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana

PVC – Policloreto de Vinila

ReCESA – Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SIMBOLOS

I = Intensidade de precipitação (mm.h^{-1})

Q_S = Vazão de cada aspersor aplicada sobre a superfície ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)

N = Quantidade de aspersores

A_S = Área da superfície (m^2).

Q_B = Vazão do bocal do aspersor ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

C_d = Coeficiente de descarga do bocal

S = Área da seção transversal do bocal (m^2)

g = Aceleração da gravidade ($\text{m}.\text{s}^{-2}$)

h = Pressão de serviço do aspersor (m.c.a)

R = Raio de alcance do jato (m)

d = Diâmetro do bocal (mm)

X_i = Lâmina de água aplicada no i -ésimo ponto sobre a superfície (mm)

\bar{X} = Lâmina média aplicada sobre a superfície (mm)

n = Número de observações

Q = Vazão do conduto ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

V = Velocidade da água no conduto ($\text{m}.\text{s}^{-1}$)

A = Área da seção transversal do conduto (m^2)

Z_i = Altura do ponto i em relação a um plano horizontal de referência (m)

P_i = Pressão do fluido no ponto i ($\text{N}.\text{m}^{-2}$)

γ = Peso específico do fluido ($\text{N}.\text{m}^{-3}$)

V_i = Velocidade do fluido no ponto i ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

ΔH_{12} = Perda de carga entre os pontos 1 e 2 (m)

ΔH_L = Perda de carga linear do trecho L (m)

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach

L = Comprimento do conduto (m)

D = Diâmetro do conduto (m)

Re = Número de Reynolds

e = rugosidade interna da parede da tubulação (m)

J = Perda de carga unitária ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)

C = Coeficiente de Hazen-Williams

ΔH_s = Perda de carga singular do trecho L (m)

K = Coeficiente de carga localizada

NPSH_D = Net Positive Suction Head disponível (m)

NPSH_R = Net Positive Suction Head requerido (m)

H_{ATM} = Carga hidráulica correspondente a pressão atmosférica (m)

ΔH_S = Perda de carga na tubulação de sucção (m)

H_{GS} = Altura geométrica de Sucção (m)

H_V = Carga hidráulica correspondente a pressão de valor (m)

H_M = Altura manométrica (m)

H_G = Altura geométrica (m)

ΔH_T = Perda de carga total na tubulação (m)

I_P = Intensidade da precipitação (mm.h^{-1})

T_R = Período de retorno (anos)

T_D = Tempo de duração da precipitação (min)

i = Trechos do sistema de simulação de chuva;

Q_i = Vazão em cada trecho do conduto ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

D_i = Diâmetro interno em cada trecho do conduto (m);

L_i = Comprimento real de cada trecho do conduto (m);

L_{ei} = Comprimento equivalente de todas singularidades de cada trecho do conduto (m);

Q_u = Vazão unitária do aspersor ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

N_R = Número de aspersores restantes;

D_e = Diâmetro externo do conduto (m);

E_s = espessura da parede do conduto (m).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	18
2.3 HIPÓTESE	18
2.4 DELIMITAÇÕES.....	18
2.5 LIMITAÇÕES	18
2.6 DELINEAMENTO.....	19
3. DRENAGEM URBANA	21
3.1 IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO.....	22
3.1.1 Erosão e sedimentação da bacia	23
3.1.2 Balanço hídrico	23
3.2 MEDIDAS DE CONTROLE	25
3.2.1 Medidas de controle compensatórias.....	27
3.2.1.1 Medidas de contenção a jusante	28
3.2.1.2 Medidas de controle na fonte.....	29
4. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	32
4.1 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	32
4.2 TIPOS DE SISTEMA DE INFILTRAÇÃO DO PAVIMENTO	33
4.2.1 Infiltração total	33
4.2.2 Infiltração parcial.....	33
4.2.3 Sem infiltração	34
4.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS	34
4.4 LIMITAÇÕES AO USO	34
4.5 MANUTENÇÃO E LIMPEZA	35
5. SIMULADORES DE CHUVA	37
6 SIMULAÇÃO DE CHUVA POR ASPERSÃO	39
6.1 Componentes do sistema	39
6.1.1 Conjunto moto-bomba	40
6.1.2 Tubulações.....	41
6.1.3 Conexões	41
6.1.4 Aspersores	42
6.2 Tipos de Sistemas de aspersão.....	43
6.2.1 Sistema convencional portátil.....	43
6.2.2 Sistema convencional semi-portátil.....	43

6.2.3 Sistema convencional permanente	43
6.2.4 Sistemas mecanizados	43
6.3 Características hidráulicas de um sistema de aspersão convencional	44
6.3.1 Precipitação equivalente	44
6.3.2 Vazão do Aspersor	44
6.3.3 Raio de alcance de aspersores rotativos	45
6.3.4 Grau de uniformidade de precipitação	45
6.4 Dimensionamento das linhas principais e laterais	46
6.4.1 Equação da continuidade	46
6.4.2 Equação de conservação de energia	47
6.4.3 Perda de carga linear	48
6.4.3.1 Equação de Darcy-Weisbach.....	48
6.4.3.2 Equação de Hazen-Williams	49
6.4.4 Perda de carga localizada	50
6.4.5 Bombas hidráulicas	52
7. PROPOSTA DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA POR ASPERSÃO	56
7.1 Descrição da área experimental	56
7.2 Características desejadas para a simulação de chuva	58
7.3 Descrição do sistema de chuva proposto	59
7.3.1 Aspersor	59
7.3.2 Tubulações	61
7.3.3 Conexões	61
7.3.4 Conjunto moto-bomba	63
7.3.5 Reservatório	64
7.3.6 Planta baixa e detalhes do sistema de irrigação proposto	64
7.4 Verificações de desempenho do arranjo proposto	66
7.4.1 Relação entre pressão e vazão e intensidade total	66
7.4.2 Intensidade de precipitação efetiva	66
7.4.3 Coeficiente de Uniformidade	68
7.4.4 Perdas de carga no sistema	69
7.4.5 Características do conjunto moto-bomba	73
7.4.6 Resultados	74
8. ORÇAMENTO DETALHADO	77
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A urbanização provoca uma ampla taxa de impermeabilização do solo alterando assim o ciclo hidrológico natural da região. A superfície menos permeável gera um maior volume de escoamento superficial e uma redução no tempo de concentração, resultando em vazões máximas maiores e aumento da frequência de inundações e alagamentos.

Entre 2008 e 2012, 2.065 municípios declararam terem sido atingidos por alagamentos, ou seja, 37,1% do total dos municípios brasileiros. Em todo território nacional, 97,4% dos municípios com mais de 500.000 habitantes registraram alagamentos. No mesmo período, inundações graduais e bruscas deixaram 2,1 milhões de pessoas desabrigadas ou desalojadas (IBGE, 2013).

“O princípio errado que tem levado as inundações na drenagem urbana é o seguinte: A melhor drenagem é aquela que escoar a água da chuva o mais rápido possível para jusante” (Tucci, 2007, p.185). Utilizando esse princípio higienista, que surgiu pela preocupação em evitar o risco de doenças no século XIX, utiliza a aceleração do escoamento através de condutos e o aumento da seção dos mesmos para evitar os alagamentos e inundações no local onde são construídos. O que ocorre na realidade é a transferência do impacto a jusante sem que o problema seja resolvido. Segundo o mesmo autor, resolver os problemas de drenagem apenas utilizando essa abordagem, pode ser definido como uma gestão insustentável.

Em uma visão de gestão sustentável da drenagem urbana tem-se buscado compensar os efeitos da ocupação urbana por meio de um plano de controle de águas pluviais que engloba as bacias hidrográficas relativas à região, utilizando medidas estruturais e não estruturais. Dentre as medidas de controle estruturais existentes está o pavimento permeável.

Pavimento Permeável é um dispositivo de infiltração que permite a passagem de água através de uma superfície permeável para dentro de uma estrutura reservatório. Segundo Araújo (1999), os pavimentos permeáveis são classificados em três tipos quanto ao seu revestimento: pavimento de asfalto poroso, de concreto poroso e de blocos de concreto perfurado preenchido com areia ou grama.

Por razão do grande potencial de aplicação que essa medida de controle apresenta, pesquisas sobre o seu comportamento têm sido realizadas em diversos países com o objetivo de um melhor entendimento dos parâmetros envolvidos do seu funcionamento e a sua aplicabilidade em um planejamento de sistemas de drenagem mais eficiente e sustentável.

No Brasil, estudos experimentais com pavimentos permeáveis vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1990 (Araújo, 1999). Um destes estudos é o dispositivo experimental implantado no IPH-UFRGS.

Em abril de 2003, no estacionamento para veículos leves do IPH-UFRGS foi implantado um módulo experimental com pavimento permeável compreendendo uma área de 264 m², sendo metade com revestimento de asfalto poroso e o restante em blocos de concreto vazados. O módulo foi instrumentado para o monitoramento da eficiência no controle das águas pluviais e com possibilidade de coleta d'água para avaliação da qualidade da água infiltrada. Acioli (2005) descreve sua implantação e um primeiro monitoramento, mostrando um desempenho hidráulico satisfatório. Não foram realizadas manutenções preventivas recomendadas internacionalmente no estudo, de maneira proposital, visto que seria a situação mais prejudicial possível, para assim observar o tempo necessário para o pavimento perder sua capacidade de redução do escoamento superficial. Castro (2011) realizou uma segunda etapa de monitoramento em 2007, 2008 e 2009 incluindo análises qualitativas e quantitativas que mostraram sinais de colmatção no revestimento de asfalto poroso. Jabur et al. (2015) após a realização de testes de infiltração em 2012 nos dois revestimentos do estacionamento constatou que apenas o revestimento de blocos vazados continuava realizando um controle adequado do escoamento superficial, mesmo com perda parcial da capacidade de infiltração. Pellizzari (2013) conseguiu recuperar a capacidade de infiltração média do revestimento para níveis aceitáveis, logo após a utilização de jateamento de ar e água como métodos de manutenção em maio de 2013. Em abril e maio de 2014, Mello (2014) verificou que os revestimentos estavam comprometidos quanto à capacidade de infiltração e repetiu as técnicas aplicadas por Pellizzari (2013), porém não conseguiu recuperar as camadas superficiais para níveis aceitáveis.

Constata-se, portanto, a importância da capacidade de infiltração do revestimento de pavimentos permeáveis para um controle eficiente das águas pluviais. Nesse sentido, o presente trabalho visa descrever uma proposta de simulação de chuva por meio de um sistema de aspersores para a área do módulo experimental anteriormente citado, com objetivo de obter um

monitoramento do comportamento ao longo do tempo, sem depender de precipitações reais, tanto do pavimento atualmente colmatado, quanto de novos módulos experimentais no local.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: um simulador de chuva pode ser utilizado para avaliar a capacidade de controle de escoamento superficial através de pavimentos permeáveis com revestimento de concreto poroso? ~

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo do trabalho é propor um sistema de simulação de chuva por aspersão para avaliar a infiltração de um módulo experimental de pavimento permeável.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que é possível utilizar simulação de chuva para avaliar a eficiência de pavimentos permeáveis com revestimento em concreto poroso na redução dos impactos da urbanização no ciclo hidrológico.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à proposição de um sistema de simulação de chuva para avaliação de um pavimento permeável localizado no estacionamento de veículos leves do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) A falta de representatividade dos possíveis resultados para localidades onde o clima for diferente;
- b) Simulação de chuva com intensidade constantes, e coeficiente de uniformidade de precipitação diferente ao longo da área do pavimento;
- c) Desconsideração das interações entre as gotas de aspersores diferentes;
- d) Proposição do sistema de chuva para apenas uma área específica.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Definição das características desejadas na chuva simulada;
- c) Proposição de sistemas de simulação de chuva através de aspersores;
- d) Verificação das características dos sistemas propostos e escolha de arranjos com propriedades desejadas;
- e) Levantamento de quantitativos e custos para implantação dos sistemas escolhidos e escolha do layout final;
- f) Detalhamento da proposição final escolhida;
- g) Conclusões.

O trabalho foi iniciado com a pesquisa bibliográfica com objetivo de desenvolver o entendimento e embasamento teórico do assunto a ser abordado. Também foi buscado o conhecimento anterior adquirido no módulo experimental implantado em 2003. A pesquisa bibliográfica foi desenvolvida de forma contínua até o fim do trabalho

Na segunda etapa foi definida, por meio das características hidrológicas do local, a intensidade de chuva desejada, assim como um coeficiente de uniformidade de precipitação mínimo durante a simulação.

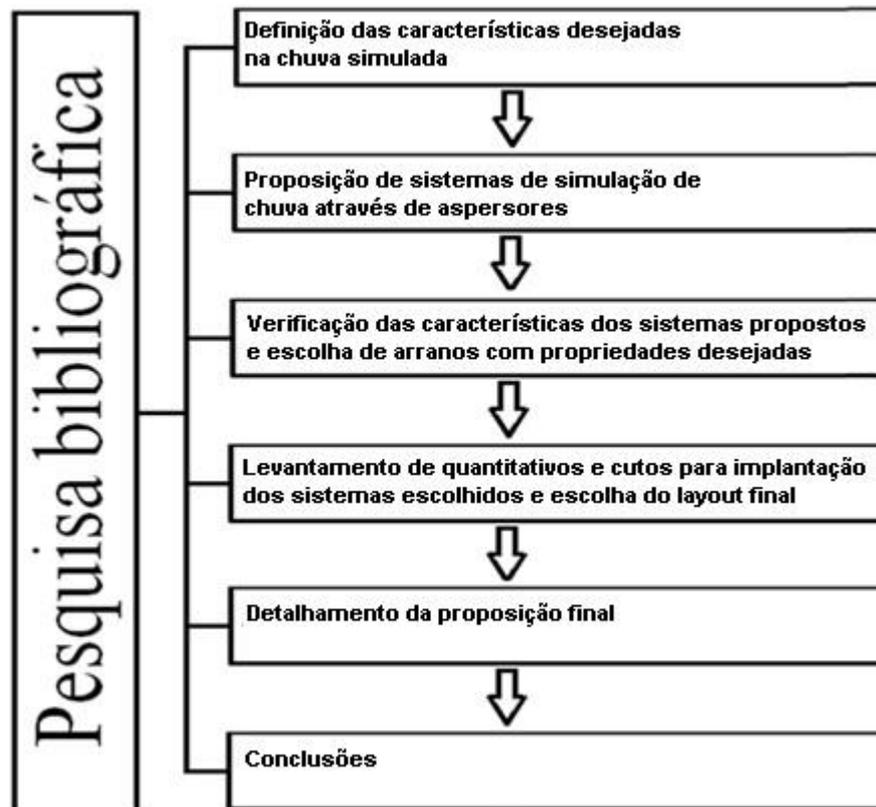
A terceira e quarta foram feitas simultaneamente por meio da proposição de diversos arranjos de sistemas de simulação, e com utilização de bibliografias, normas e equações a verificação dos parâmetros técnicos necessários para seu funcionamento. Também foi realizada a escolha dos arranjos que atendiam às definições encontradas na segunda etapa de intensidade de chuva e coeficiente de uniformidade.

Na quinta etapa foi realizado o levantamento dos quantitativos de todos equipamentos necessários como tubulações, conexões, aspersores, bombas e reservatório e seu custo aproximado na cidade de Porto Alegre no ano de 2016, para os arranjos escolhidos durante as etapas anteriores. Após, foi realizado um comparativo de preços e escolhida a proposição que atendia os requerimentos de maneira adequada e com menor custo total.

Na sexta etapa foi realizado o detalhamento dos constituintes do projeto final.

E por fim, na última etapa foram feitas as conclusões finais e a avaliação do alcance dos objetivos inicialmente propostos.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

3. DRENAGEM URBANA

Desde tempos mais remotos, aglomerados urbanos, na maioria das vezes, se instalavam próximos a corpos d'água pela facilidade da obtenção de água. Possuir água de fácil acesso e em abundância era essencial para o desenvolvimento da agricultura, comércio, comunicação, navegação e também por motivos militares. Contudo essa grande proximidade acarretava em uma suscetibilidade maior dos povos, acarretando em inundações com maior frequência. Ao longo do tempo as civilizações aprenderam a aceitar os prejuízos, considerando um “preço a pagar” pela disponibilidade da água (Virgiliis, 2009).

A relação entre os corpos d'água e os aglomerados urbanos mudou a partir do surgimento do conceito sanitaria-higienista. Ele teve sua origem no século XVIII, quando se constatou, na Itália, que águas de banhados e zonas alagadiças estavam relacionados com a mortalidade de pessoas e animais. Essa constatação foi rapidamente levada em consideração na Inglaterra, Alemanha e França onde houve um processo de extinção de banhados e cobrimento de fossas receptoras de esgoto, substituindo por canalizações enterradas. A intenção de eliminar rapidamente as águas contaminadas nascia. Porém, apenas com a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, como epidemias de cólera em grandes cidades no século XIX, houve um grande impulso na realização de obras higienistas no espaço urbano (Desbordes, 1987 apud Silveira, 2002).

O conceito higienista já pôde ser observado no Brasil logo depois, com a existência das primeiras redes enterradas de esgoto sanitário implantadas em 1864 no Rio de Janeiro. O conceito higienista continuou a se desenvolver no Brasil e ficou estabelecido como “regra” para as cidades brasileiras, no início do século XX, devido à atuação do engenheiro Saturnino de Brito (Silveira, 2002). O principal ponto negativo de apenas utilizar essa abordagem para a drenagem urbana nas cidades é transferir os problemas às partes mais baixas. Os efeitos são apenas transferidos a jusante, comumente causando alagamentos ou inundações em locais onde não ocorriam previamente.

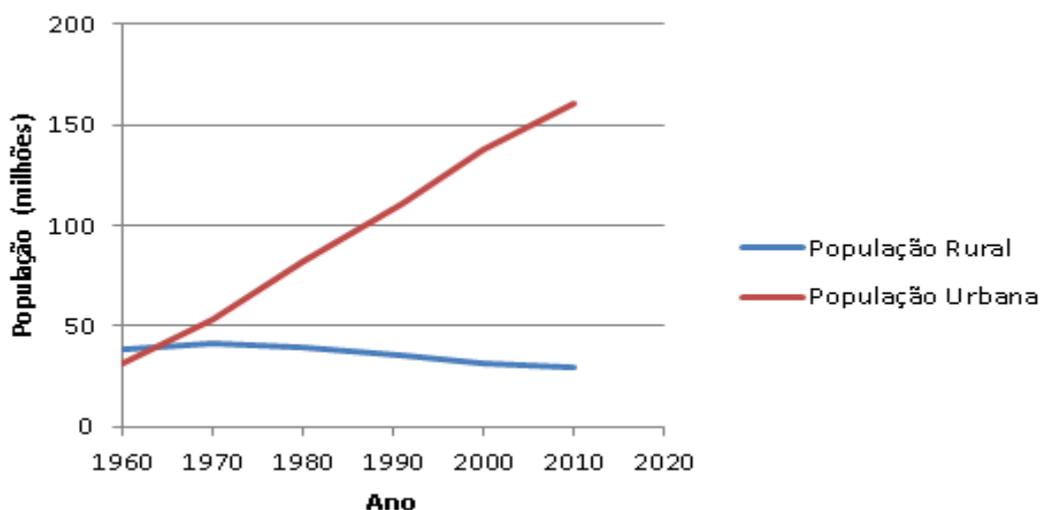
A partir de 1970 foi desenvolvida, nos países desenvolvidos, uma nova abordagem para tratar a drenagem urbana. Essa visão diferente surgiu porque a consciência ecológica expôs as limitações de utilizar somente o conceito higienista na drenagem urbana por conta dos impactos

ambientais causados pelas cidades e o balanço hídrico. Esse novo conceito visa utilizar-se de tecnologias compensatórias de drenagem, que buscam minimizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos.

3.1 IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO

O acelerado crescimento demográfico no Brasil, combinado com a grande migração da população rural para as cidades na maioria das vezes gera um cinturão de pobreza na periferia das cidades e um crescimento acelerado de população sem infraestrutura, causando uma deterioração da qualidade de vida e do meio ambiente (Tucci, 2007). A figura 2 mostra a evolução histórica das populações rural e urbana no Brasil, segundo dados do IBGE.

Figura 2 – Crescimento urbano e rural no Brasil



(fonte: elaborada pelo autor)

O crescimento expressivo da população urbana traz como consequência um aumento de geradores de impermeabilização do solo, como vias pavimentadas e coberturas. Também há uma diminuição de áreas verdes e modificações nos sistemas de drenagem como retificações e canalizações de cursos d'água.

De acordo com Araújo et al. (2000), as alterações citadas anteriormente trazem como resultado o aumento de alagamentos urbanos e a degradação da qualidade das águas pluviais.

São expostos a seguir os efeitos decorrentes da urbanização quanto ao seguinte:

- a) erosão e sedimentação da bacia
- b) balanço hídrico

3.1.1 Erosão e sedimentação da bacia

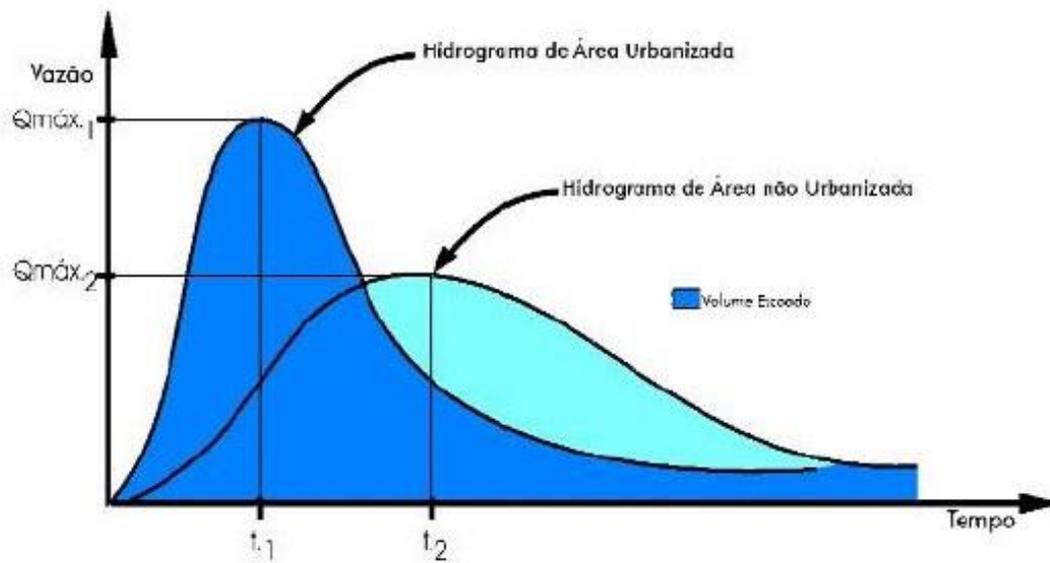
Conforme a cidade se urbaniza ocorre um aumento da produção de sedimentos devido a áreas desprotegidas e produção de resíduos sólidos, e do aumento da velocidade do escoamento, que devido a maior energia da água produz uma maior erosão do solo. Quando os sedimentos atingem a macrodrenagem, provocam assoreamento dos condutos e canais devido à redução da declividade e sua capacidade de transporte, provocando um aumento de frequência de inundações (Tucci e Collishonn, 2000).

3.1.2 Balanço hídrico

As alterações no balanço hídrico ocorrem devido à variação dos volumes dos processos do ciclo hidrológico acarretando também mudanças na resposta temporal das vazões de saída, representadas pelo hidrograma característico (Tucci, 2007). Tucci (2007) descreve que as alterações nos volumes do balanço hídrico devido à impermeabilização do solo são: aumento do volume do escoamento superficial; redução da recarga dos aquíferos, reduzindo também o escoamento subterrâneo; redução da evapotranspiração, pois há menos vegetação e retenção de água na superfície.

Com um volume maior do escoamento superficial, e uma maior velocidade desse escoamento, o tempo de escoamento diminui, decrescendo o tempo de concentração da bacia. Constatam-se então mudanças no hidrograma, onde os picos de cheia em áreas urbanizadas passam a ocorrer mais cedo e com maior intensidade. A figura 3 exemplifica esse fenômeno.

Figura 3 – Diferenças no hidrograma devido à urbanização

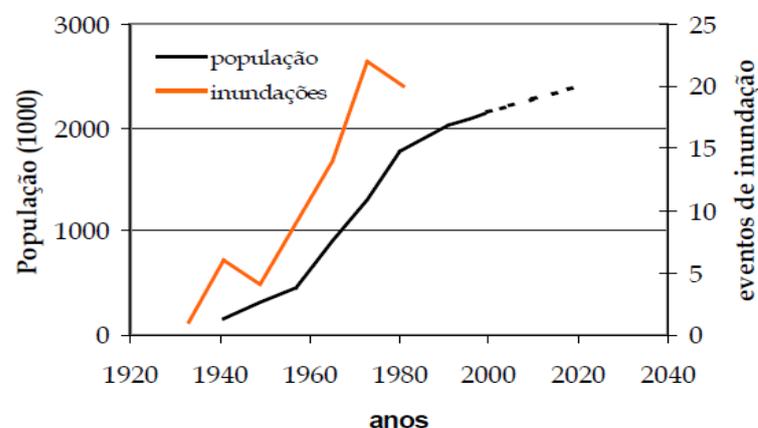


(Fonte: Virgiliis, 2009, p. 13)

O impacto no balanço hidrológico, devido ao aumento da população de maneira desordenada, resulta no aumento de frequência de ocorrência de inundações. A aceleração dos escoamentos tem como efeito transferir para jusante o problema, trazendo inundações em áreas que anteriormente não sofriam tais problemas.

O aumento no número de eventos de inundações devido ao crescimento populacional fica evidenciado na figura 4 onde mostra o número de eventos de inundação em Belo Horizonte juntamente com o crescimento urbano ao longo das décadas.

Figura 4 – Relação entre crescimento da população e o número de eventos de cheia em Belo Horizonte



(fonte: Parkison et al. 2003, p.5)

3.2 MEDIDAS DE CONTROLE

As medidas de controle visam minimizar os danos causados por inundações e podem ser classificadas de acordo com sua natureza, em medidas estruturais e medidas não estruturais.

As medidas estruturais são obras de engenharia que tem como objetivo reduzir o risco de alagamentos e inundações. As medidas estruturais podem ser caracterizadas como medidas extensivas ou intensivas.

As medidas de controle extensivas correspondem a medidas que agem na bacia, procurando modificar relações entre a precipitação e vazão, sendo elas os pequenos armazenamentos disseminados na bacia, a recomposição de cobertura vegetal, e o controle de erosão no solo por meio de mudanças no plantio e conservação do solo. Essas medidas tendem a minimizar e atrasar os picos das enchentes e também controlar a perda de solo e sedimentação dos rios. A aplicabilidade dessas medidas é maior para pequenas bacias rurais atuando principalmente sobre as inundações com tempo de retorno mais baixo (Tucci, 2007).

As medidas de controle intensivas são aquelas que agem no curso d'água podendo ter diversos objetivos dependendo do tipo de obra. A seguir são apresentadas as medidas deste tipo de intervenção em relação ao impacto no escoamento:

- a) aceleração do escoamento: construção de diques e polders, redução da rugosidade, aumento da declividade ou eliminação de obstruções dos rios.

Diques são barramentos ou muros laterais, construídos nas margens dos rios com função de evitar inundações ribeirinhas assegurando o controle completo das cheias até o limite estabelecido na construção. Os polders são compostos de diques de proteção e são utilizados para proteger áreas que se situam em cotas inferiores às dos níveis d'água durante períodos de enchente desta forma utilizam um sistema de bombeamento

- b) amortecimento do escoamento: reservatórios e bacias de amortecimento.

A principal vantagem dos reservatórios e bacias de amortecimento é o controle das cheias à jusante do reservatório, sendo indicado para bacias pequenas e médias. Para bacias muito grandes, o volume necessário de amortecimento tornaria a medida inviável.

- c) desvio do escoamento: retificações e canais de desvios.

As retificações dos rios consistem na construção de um novo leito retilíneo para o rio. Com isso há uma redução do percurso d'água e maior velocidade. As cheias se propagarão mais rápido para jusante, podendo causar inundações em novas áreas. Os canais de desvios servem para desviar parte da vazão de cheia para outras bacias ou trechos de rio. Tucci (2007) lembra que é essencial, nesse

caso avaliar os impactos causados por essa nova vazão na bacia onde está sendo transferida a vazão.

Medidas não estruturais são ações que visam minimizar os prejuízos das cheias com custos mais baixos. Segundo Pereira (2014) elas buscam uma melhor organização da ocupação territorial, conscientizar a população pela educação ambiental e controlar a poluição difusa.

As principais medidas não estruturais de controle de enchentes são sistemas de alerta e previsão de enchentes, zoneamento das áreas de risco e seguro de inundação.

Righetto et al. (2009) destacam que para a obtenção de um bom controle dos problemas da drenagem urbana, as medidas não estruturais exigem esforços de conscientização popular, legislação apropriada, e fiscalização do uso e ocupação dos espaços urbanos.

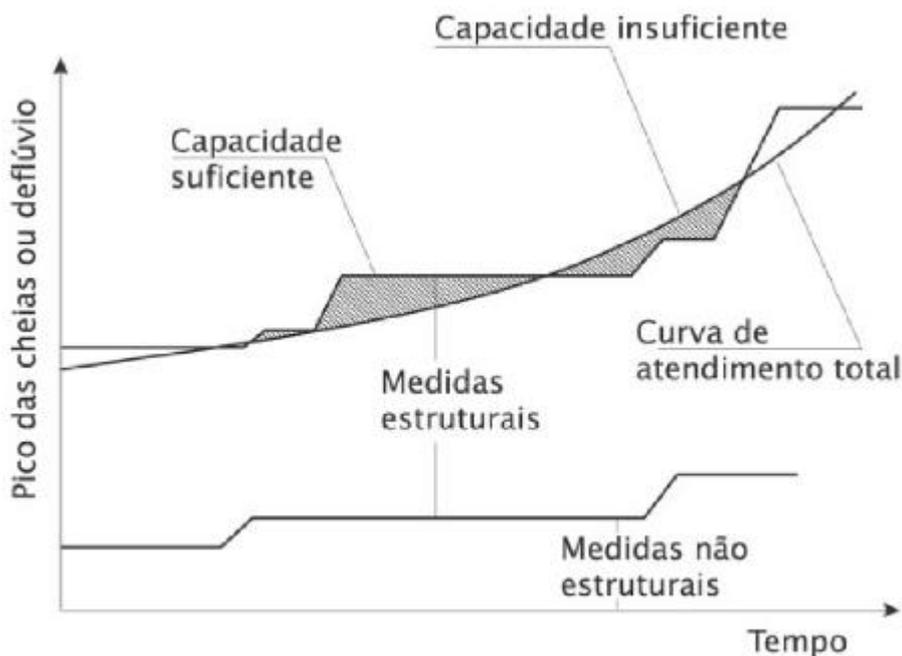
Para Parkison et al. (2003) o desenvolvimento sustentável da drenagem urbana tem como finalidade obter um ciclo hidrológico mais próximo do ciclo hidrológico natural da região. Para solucionar os problemas da drenagem urbana não se devem construir grandes obras de drenagem, e sim um conjunto de estratégias incluindo ações estruturais como parte integrante da infraestrutura, e também medidas não estruturais. O mesmo autor define o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) como “o conjunto de diretrizes que determinam a gestão de drenagem, minimizando o impacto ambiental devido ao escoamento das águas pluviais”.

Righetto et al. (2009) enfatizam que a principal medida não estrutural é a legislação para o controle dos impactos dos novos desenvolvimentos, podendo essa ser incorporada ao plano diretor urbano ou a decretos municipais.

Segundo Canholi (2015) a formulação do plano diretor de macrodrenagem deve considerar a unidade de gerenciamento como sendo a bacia hidrográfica, podendo ultrapassar limites administrativos do município. Seu planejamento deve ser multidisciplinar e garantir uma sustentabilidade institucional, econômica e ambiental. Suas soluções devem ser flexíveis e serem tomadas ao longo do tempo atendendo aos impactos gerados pela urbanização.

A figura 5 mostra a utilização de medidas estruturais e não estruturais em conjunto, para atender as demandas de drenagem urbana.

Figura 5 – Curva de atendimento às demandas de drenagem urbana



(fonte: Canholi, 2015)

Tucci (2007) ainda comenta que na maioria dos países desenvolvidos a gestão de inundações consiste majoritariamente em medidas não estruturais, sendo as estruturais somente justificáveis quando viáveis economicamente ou indispensáveis socialmente.

3.2.1 Medidas de controle compensatórias

As medidas de controle alternativas, também chamadas de compensatórias têm essas denominações, pois são apresentadas como uma alternativa ao sistema clássico de drenagem urbana, onde as águas pluviais são captadas e conduzidas por condutos artificiais e lançadas em corpos d'água rapidamente. A ReCESA (2005, p. 38) afirma que as tecnologias de controle compensatório são alternativas porque:

- a) consideram os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como base de estudo; e
- b) buscam compensar sistematicamente os efeitos da urbanização, controlando na fonte, a produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização, através de infiltração, e evitando a sua transferência rápida para jusante, através de estruturas de armazenamento temporário.

A ReCESA (2005, p. 38) também aponta vantagens ao utilizar essas medidas como a continuidade da urbanização sem custos excessivos referentes à drenagem e ao tratamento combinado de questões urbanísticas com o sistema de drenagem pluvial do município. Ainda afirma que, “Quando bem concebidas, as tecnologias alternativas contribuem efetivamente para a melhoria da qualidade de vida em meio urbano e a recuperação e a preservação do meio ambiente”.

Segundo Canholi (2015), as técnicas mais frequentemente adotadas são aquelas que visam controlar deflúvios provenientes de partes significativas de bacia, ou um aumento de áreas de infiltração ou armazenamento temporário em pequenos reservatórios, podendo ser classificadas, respectivamente, como medidas de contenção a jusante e medidas de controle na fonte.

3.2.1.1 Medidas de contenção a jusante

As medidas de contenção a jusante têm como objetivo minimizar o impacto hidrológico da redução da capacidade de armazenamento natural da bacia hidrográfica, através de reservatórios. Os reservatórios possuem um volume de amortecimento e são incorporados ao sistema de drenagem realizando um controle dos picos de vazão beneficiando outras áreas com a diminuição da frequência de alagamentos.

Esses reservatórios podem ser classificados quanto ao funcionamento em dois tipos: *on-line* e *off-line*, exemplificados na figura 6 e figura 7

Os reservatórios *on-line* estão diretamente conectados à rede de drenagem da bacia e recebem águas pluviais independente da intensidade precipitada.

Os reservatórios *off-line* não entram em funcionamento para todo e qualquer evento, mas somente em eventos determinados em projeto. A diferença fundamental entre eles é a existência de um *by-pass* com função de desviar a vazão do reservatório para valores inferiores a desejados. Quando o fluxo supera a capacidade de projeto do *by-pass*, esse reservatório entra em funcionamento recebendo o volume excedente (Neves et al. 2005).

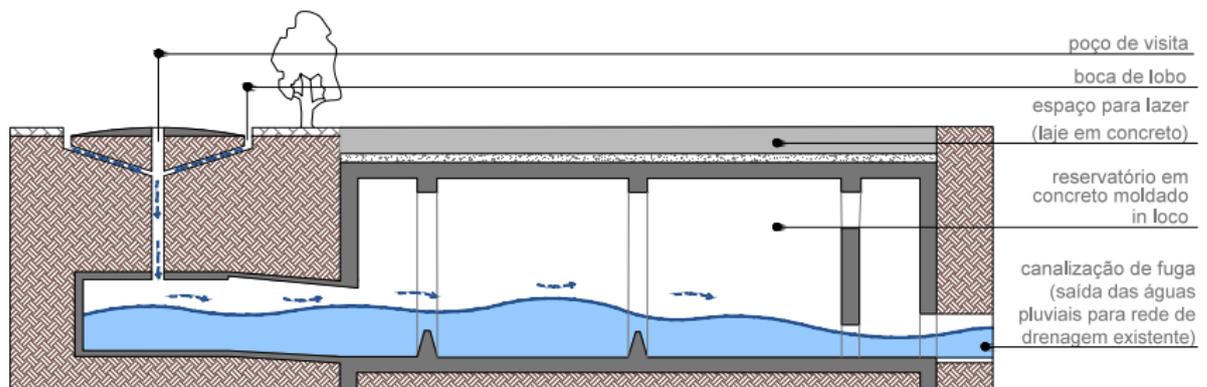
ASCE (1985 apud Tucci, 2007) comenta que a incorporação desse tipo de medida ao sistema de drenagem obteve maior sucesso quando integrada a outros usos, como recreação, pois na grande maioria do tempo ele fica vazio.

Figura 6 – Detenção *off-line* integrada à recreação



(fonte: Tucci 2007, p. 216)

Figura 7 – Detenção *on-line* integrada à recreação



(fonte: ABCP, S/D)

3.2.1.2 Medidas de controle na fonte

As medidas de controle na fonte são medidas estruturais que atuam diretamente sobre o lote, parques e passeios, com o objetivo de recuperar ao máximo as condições hidrológicas locais da condição pré-urbanização. Nas cidades brasileiras, essas técnicas ainda são raramente empregadas e relativamente desconhecidas pelos cidadãos.

Sobre essas medidas Araújo (1999, p. 4) aponta que:

As medidas de controle na fonte podem aumentar a eficiência de drenagem de jusante dos locais controlados e também aumentar a capacidade de controle de alagamentos

dos sistemas. Por esta razão o controle na fonte tem sido a tendência mais moderna de minimizar os impactos das enchentes urbanas.

Essas técnicas têm como finalidade a diminuição do volume do escoamento superficial, a manutenção do tempo de concentração da bacia, a manutenção da qualidade da água e, em alguns casos, o uso da água de chuva (Canholi, 2015).

Em diversas cidades (Seattle, Denver, Porto Alegre, entre outras), existe uma legislação específica que limita a vazão de entrada no sistema público de drenagem proveniente de loteamentos. Esta vazão geralmente corresponde geralmente à vazão natural do lote com intenção de não ampliar os picos naturais ou anteriores, resultando em um impacto zero no sistema de drenagem de novos empreendimentos. Devido a esse critério o empreendedor é obrigado a utilizar medidas de controle na fonte para obter a vazão estipulada (Tucci, 2007).

Canholi (2015) classifica as medidas de contenção na fonte como:

- a) controle de entrada: dispositivos que restringem a entrada dos escoamentos no sistema de drenagem, podendo atuar como um retardador de vazões ou como reservatório para utilização posterior da água.

Alguns exemplos de dispositivos com essa característica são: armazenamento em telhados, reservatórios de retenção e reservatórios de detenção. A diferença entre os dois tipos de reservatório são que os denominados de retenção são dimensionados para manterem uma lâmina permanente de água enquanto os reservatórios de detenção são projetados para permanecerem vazios durante períodos entre precipitações para melhor amortecimento.

- b) detenção no local: reservatórios com objetivo do controle de áreas urbanizadas restritas, como condomínios, loteamentos e distritos industriais.
- c) disposição no local: estruturas, obras e dispositivos que permitem maior infiltração e percolação.

Para Urbonas e Stahre (1993) as vantagens desse tipo de medida de aumento da infiltração são: o aumento da recarga do lençol freático; preservação da vegetação natural; atenuação da poluição transportada para os rios; redução de picos de vazões à jusante; redução do tamanho dos condutos da rede pública. O mesmo autor também comenta que existem desvantagens na utilização dessa medida como: possível contaminação do aquífero devido à infiltração de água contaminada; aumento do nível do lençol freático em casos que possam causar danos à construções.

Alguns exemplos de dispositivos com essa característica são: planos de infiltração, valos de infiltração, trincheiras, e pavimentos permeáveis.

No presente trabalho será desenvolvido um projeto de um simulador de chuva que objetiva analisar o comportamento de um módulo experimental de um pavimento permeável, medida de controle na fonte detalhada no próximo capítulo.

4. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Pavimentos permeáveis são medidas de controle estruturais que buscam compensar na fonte os efeitos da urbanização, reduzindo o escoamento superficial, melhorando a qualidade da água e contribuindo no aumento da recarga de água subterrânea. Essa técnica objetiva reproduzir as condições naturais ou de pré-desenvolvimento hidrológico do local.

Esse tipo de estrutura pode ser considerado como um dispositivo de infiltração onde o escoamento superficial é desviado através interior do revestimento permeável para dentro de um reservatório de pedras localizado sob o pavimento (Urbonas e Stahre, 1993).

Os pavimentos permeáveis são também conhecidos como estruturas reservatório. De acordo com Raimbault et al. (2002 apud Acioli, 2005, p. 27) essa denominação tem referência às funções realizadas pela matriz porosa do que são constituídos:

- a) função mecânica, associada ao termo estrutura, que permite suportar os carregamentos impostos pelo tráfego de veículos.
- b) função hidráulica, associada ao termo reservatório, que assegura, pela porosidade dos materiais, reter temporariamente as águas, seguido pela drenagem e, se possível, infiltração no solo do subleito.

4.1 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

A figura 8 apresenta as camadas típicas de um pavimento permeável.

Figura 8 – Seção típica de um pavimento permeável



Baseado em Araújo (1999), algumas características básicas do perfil do pavimento são descritas a seguir:

O revestimento de concreto ou asfalto poroso (camada superior) deve possuir uma alta permeabilidade, a fim de permitir a infiltração adequada da água. Essa camada é construída de maneira similar aos pavimentos convencionais com a diferença básica na retirada da mistura dos agregados a fração da areia fina, proporcionando uma maior porosidade à camada.

O escoamento infiltra rapidamente pela camada superficial e passa para o reservatório granular que tem função principal a estocagem temporária do volume infiltrado nos vazios da camada. A água nesse reservatório pode então ser infiltrada para o solo existente e/ou coletada através de drenos e transportadas para uma saída, dependendo do tipo de sistema de infiltração planejado para o dispositivo. Portanto a capacidade de armazenamento é determinada pela altura do reservatório, porosidade do colchão drenante, e quando permitido, o escoamento percolado para o subleito.

4.2 TIPOS DE SISTEMA DE INFILTRAÇÃO DO PAVIMENTO

Segundo a ABNT NBR 16416:2015, o pavimento permeável pode ser projetado de três diferentes maneiras em relação à infiltração de água precipitada. A norma indica que a escolha do sistema de infiltração depende das características do solo ou de condicionantes no projeto, e são apresentadas a seguir:

4.2.1 Infiltração total

Nesse sistema de infiltração toda água desviada pelo pavimento tem sua saída do reservatório de pedras através da infiltração no subleito.

4.2.2 Infiltração parcial

Nesse sistema de infiltração parte da água precipitada alcança o subleito e infiltra, enquanto parte da água fica temporariamente armazenada na base granular sendo depois removida por um dreno localizado entre o subleito e a camada reservatório.

4.2.3 Sem infiltração

Nesse sistema de infiltração toda água precipitada fica temporariamente armazenada na base permeável, não havendo infiltração no solo, sendo depois removida por um dreno localizado entre o subleito e a camada reservatório.

4.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Para EPA (1999 apud Acioli, 2005, p 13) algumas vantagens específicas do uso de pavimento permeáveis, em relação a outros dispositivos de infiltração, de uma forma geral, são:

- a) tratamento da água da chuva, através da remoção de poluentes;
- b) diminuição da necessidade de meio-fio e canais de drenagem;
- c) aumento da segurança e conforto em vias, pela diminuição de derrapagens e ruídos;
- d) é um dispositivo de drenagem que se integra completamente à obra, não necessitando de espaço exclusivo para o dispositivo;

Ainda de acordo com EPA (1999 apud Acioli, 2005, p 13), algumas desvantagens específicas dos pavimentos permeáveis incluem:

- a) pouca perícia dos engenheiros e contratantes com relação à tecnologia;
- b) o pavimento poroso tem a tendência de tornar-se obstruído, se inapropriadamente instalado ou mantido;
- c) o pavimento poroso envolve um risco de falha considerável (devido à colmatagem ou má construção);
- d) há o risco de contaminação do aquífero, dependendo das condições do solo e da suscetibilidade do aquífero;

4.4 LIMITAÇÕES AO USO

A norma ABNT NBR 16416:2015, em relação aos requisitos gerais de projeto, define algumas limitações que devem ser observadas na escolha do local e características do dispositivo como:

- a) solo: capacidade de suporte, coeficiente de permeabilidade e condição de saturação do solo (no caso dos sistemas de infiltração total ou parcial);

- b) altura do lençol freático: distância do nível mais alto do lençol deve estar no mínimo a 0,6 m da parte inferior da base do pavimento.
- c) áreas de contribuição: não podem exceder em até cinco vezes as áreas permeáveis do pavimento.
- d) declividades: declividade máxima de 5% para áreas permeáveis e de 20% para as áreas de contribuição.
- e) contaminação do lençol d'água: manter uma distância de no mínimo 30 m de fontes de captação de águas subterrâneas;

Tucci (2007) destaca que esse sistema é viável quando a capacidade de infiltração do solo é superior a 7 mm/h e que para solos com um percentual superior a 30% de argila ou 40% de silte e argila, combinados, o uso desse tipo de dispositivo não é recomendável.

Acioli (2005, p. 13) atenta que o uso do pavimento permeável pode ser restringido em regiões de clima frio, pelo entupimento e trincagem pela neve, regiões áridas, devido à alta amplitude térmica, e em regiões com altas taxas de erosão eólica podendo ocasionar uma colmatação muito rápida do revestimento.

4.5 MANUTENÇÃO E LIMPEZA

Baptista et al. (2005) consideram que a vida útil do pavimento está diretamente ligada à sua colmatação, podendo perder sua funcionalidade ao longo do tempo.

A ABNT NBR 16416:2015 estabelece que o pavimento deva sofrer intervenções de manutenção sempre que existirem condições que comprometam o desempenho mecânico ou hidráulico do pavimento. Em relação a reparos necessários explicita que devem ser utilizados os mesmos materiais do pavimento existente.

A norma indica que devem ser realizadas verificações de desempenho do pavimento permeável periodicamente quanto a sua permeabilidade. Se o pavimento apresentar um coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 36 mm/h, devem-se executar ações de limpeza a fim de recuperar a sua capacidade de infiltração. As etapas de limpeza recomendadas são:

- a) remoção de sujeiras e detritos em geral da superfície do pavimento por meio de varrição mecânica ou manual;
- b) aplicação de jato de água sob pressão;
- c) emprego de equipamento de sucção para retirada de finos;

d) recomposição do material de rejuntamento (quando for o caso).

Após a execução das etapas de limpeza, as áreas que receberam a limpeza devem apresentar no mínimo 80% do coeficiente de permeabilidade do mínimo quando recém-construído, definido pela norma em 3600 mm/h.

5. SIMULADORES DE CHUVA

Estudos sobre o efeito de precipitações em superfícies são difíceis de serem executados utilizando apenas a chuva natural porque ela apresenta muita irregularidade, não possuindo um controle sobre as características dela como intensidade, duração e tipo de chuva. Uma alternativa a esse problema tem sido a utilização de simulação de chuva, pois ela permite o controle das características desejadas para o estudo assim como a periodicidade desejada do estudo em questão.

Segundo Montebeller et al. (2001), infiltrômetros de aspersão e simuladores de chuva tem sido bastante utilizados na área de engenharia de conservação de solo e água. Nesses equipamentos a precipitação, o tamanho e a velocidade de impacto das gotas podem ser controlados com objetivo de estudar características de infiltração, escoamento superficial e produção de sedimentos do solo.

As pesquisas mais usuais envolvendo simuladores de chuva no mundo são para estudo do fenômeno da erosão hídrica pluvial, realizados tanto em campo quanto em laboratório. Eltz et al. (2001) utilizou quatro padrões de chuva diferentes, onde a variação era o tempo do pico da chuva durante a simulação, para determinação das perdas de água e solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo em Santa Maria/RS. Outros estudos podem ser encontrados na literatura tanto nacional quanto internacional onde o objeto de estudo principal é o processo de erosão como Martínez-Mena et al. (2001) que estudou mudanças nas propriedades físicas de dois tipos de solo por de chuvas simuladas em módulos experimentais de 4 m² no Sudeste da Espanha.

Porém já existem estudos com a utilização de simulação de chuva com objetivo de analisar o escoamento superficial em pavimentos permeáveis. Araújo (2000), utilizando um simulador de chuva com capacidade de gerar precipitações variáveis sobre áreas experimentais de 1 m², estudou a diferença do escoamento superficial de seis superfícies diferentes, incluindo duas superfícies de pavimentos permeáveis, submetidas a precipitações de 111,9 mm/h e 10 minutos de duração em Porto Alegre. O objetivo do estudo era avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, comparando os resultados gerados pelas diferentes superfícies simuladas. Outro estudo muito semelhante, conduzido por Alessi et al. (2006), foi desenvolvido para avaliar e comparar o escoamento superficial gerado por

pavimentos permeáveis em blocos de concreto e com superfície em asfalto poroso. A pesquisa utilizou um simulador de chuvas semelhante ao utilizado por Araújo com uma área de precipitação também de 1 m², e assim como encontrado por Araújo as superfícies de pavimento permeável pesquisadas obtiveram um ótimo resultado na redução do escoamento superficial, onde o coeficiente de escoamento observado para concreto poroso foi de 0,005 enquanto o de paralelepípedo ficou em 0,60 e a superfície de concreto em 0,95, mostrando um melhor desempenho do concreto poroso em relação a pavimentos convencionais.

6 SIMULAÇÃO DE CHUVA POR ASPERSÃO

A irrigação por aspersão tem como característica principal a simulação de uma chuva intensa e uniforme através do fracionamento de um jato de água em gotas lançadas sobre uma superfície (Silva 2012). É uma técnica muito utilizada na agricultura por adaptar-se a quase todos tipos de culturas e topografias de terrenos, assim como possuir boa uniformidade de distribuição de água e possibilitar a aplicação durante o período noturno e de produtos químicos via água de irrigação. Algumas desvantagens incluem a necessidade de mão de obra especializada, não indicação em locais com muito vento e a necessidade de um alto investimento inicial. Um exemplo de sua aplicação é ilustrado abaixo na figura 9.

Figura 9 – Sistema de irrigação por aspersão de hortaliças

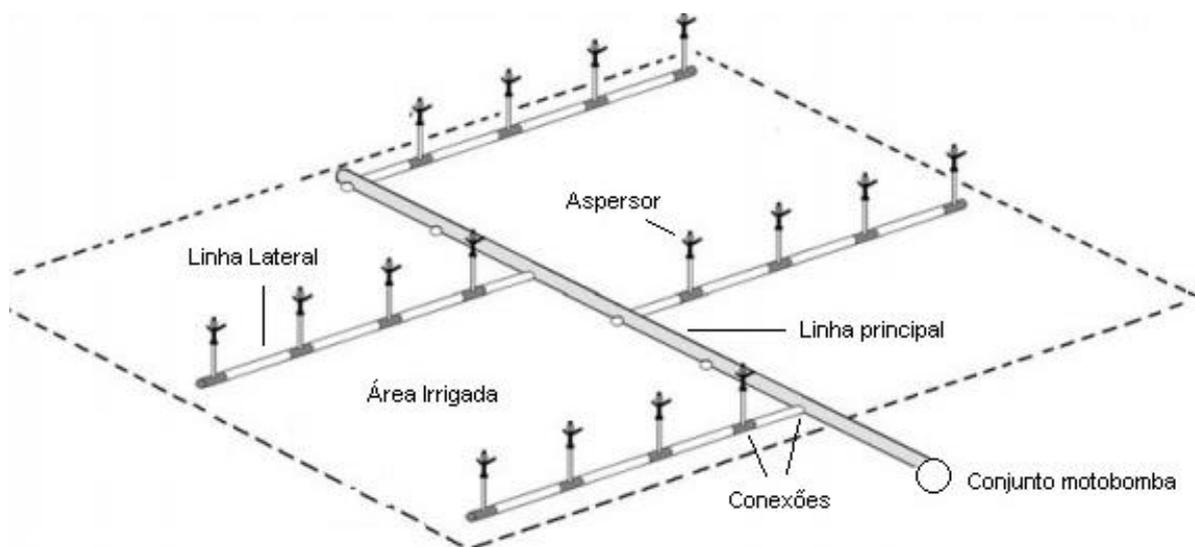


(fonte: Globo rural 2016)

6.1 Componentes do sistema

A técnica de aspersão é composta, normalmente, por um conjunto moto-bomba, tubulações, conexões e aspersores. A figura 10 mostra os componentes em um sistema convencional.

Figura 10 – Sistema convencional de aspersão



(fonte: Adaptado de Biscaro, 2009, p. 17)

6.1.1 Conjunto moto-bomba

O conjunto moto-bomba tem a função de realizar a captação da água através de uma tubulação de sucção e fornecer ao sistema energia necessária até os aspersores. Nos sistemas de irrigação por aspersão convencionais as bombas centrífugas de eixo horizontais são as mais utilizadas e os motores acoplados a bomba utilizam geralmente energia elétrica ou combustíveis inflamáveis como fontes de energia.. A figura 11 mostra um conjunto moto-bomba.

Figura 11 – Conjunto moto-bomba centrífuga de eixo horizontal



(fonte: Spxflow 2016)

6.1.2 Tubulações

As tubulações são responsáveis pela condução da água desde a captação de água até os aspersores. As tubulações utilizadas no sistema devem apresentar resistência à pressão de serviço desejada. Em geral, as tubulações utilizadas para essa finalidade têm um comprimento padrão de 6 m e diâmetro variando entre 50 e 200 mm, podendo ser constituídas de aço zincado, alumínio, cimento amianto, concreto, ferro fundido e policloreto de vinila (PVC) (Silva, 2012). A figura 12 mostra um exemplo de tubo de PVC utilizado em irrigação, com engate roscável plástico.

Figura 12 – Tubos de PVC para irrigação

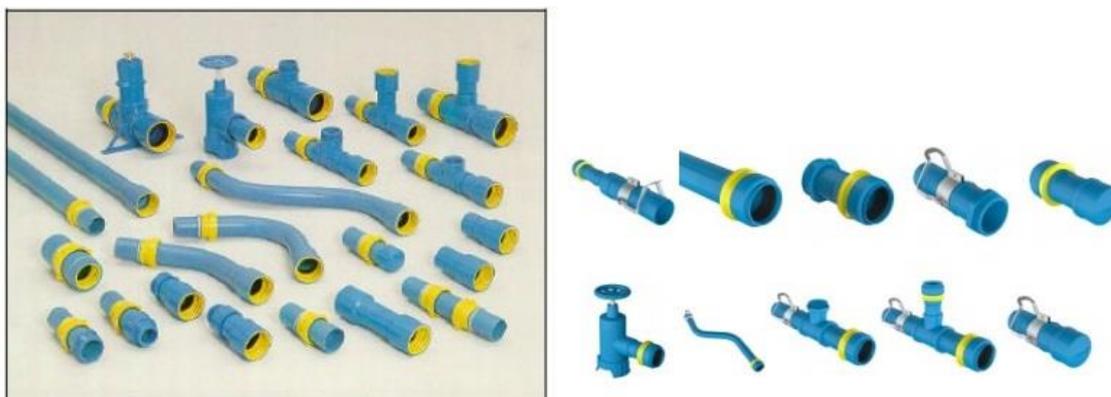


(fonte: Catálogo técnico Tigre, 2009, p. 20)

6.1.3 Conexões

As conexões ou acessórios em um sistema de aspersão permitem realizar a montagem do arranjo desejado independente da topografia ou área desejada, servindo principalmente para ligações, curvas, reduções, derivações de fluxo, adaptadores, válvulas entre outros. Os acoplamentos das tubulações podem ser do tipo engate rápido, utilizado em sistemas convencionais móveis, ou para sistemas fixos são utilizadas juntas flexíveis ou rígidas. A figura 13 apresenta diversas conexões utilizadas em PVC.

Figura 13 – Conexões e para tubulações de PVC



(fonte: Silva, 2012 p. 08)

6.1.4 Aspersores

Os aspersores são os elementos de maior importância no sistema de irrigação por aspersão, pois é através deles, operando sob pressão, que ocorre a pulverização do jato d'água caracterizando a distribuição de água na superfície sob forma de precipitação. Eles podem possuir um ou mais bocais, e quanto ao sistema de rotação podem ser estacionários ou rotativos. Os aspersores rotativos podem ser do tipo setorial, possuindo regulagem na amplitude do giro, ou possuírem giro completo (360°).

A escolha do aspersor é uma das primeiras e mais importantes partes de um projeto de sistema de aspersão pois é através de suas características como vazão, intensidade de aplicação, raio de alcance, pressão de operação, entre outras que se obtém o resultado final desejado e define-se os outros elementos necessários. Para a seleção é necessário consultar tabelas técnicas fornecidas pelos fabricantes com as especificações de cada aspersor. A figura 14 mostra três aspersores convencionais.

Figura 14 – Aspersores convencionais



(fonte: Makino agrícola e irrigação, 2016)

6.2 Tipos de Sistemas de aspersão

O método de irrigação por aspersão pode ser classificado em relação a sua configuração em sistemas convencionais portáteis, semi-portáteis, permanentes e sistemas mecanizados.

6.2.1 Sistema convencional portátil

Um sistema convencional portátil é caracterizado pela possibilidade de mobilidade dos equipamentos, onde todas linhas e componentes deslocam-se na área irrigada. Nesse sistema, geralmente, a superfície a ser irrigada é dividida em parcelas irrigadas uma de cada vez. As tubulações, conexões e acessórios são leves facilitando o deslocamento.

6.2.2 Sistema convencional semi-portátil

No sistema semi-portátil as linhas principais e secundárias permanecem fixas e as linhas laterais se deslocam em diferentes posições dentro da área irrigada. Nesse sistema as linhas fixas podem ser enterradas.

6.2.3 Sistema convencional permanente

No sistema convencional permanente todas as tubulações são fixas cobrindo simultaneamente toda área a ser irrigada.

6.2.4 Sistemas mecanizados

Os sistemas de irrigação por aspersão mecanizados têm por principais objetivos diminuir os custos com mão-de-obra e realizar irrigação em grandes áreas. Estes sistemas possuem mecanismos de propulsão que asseguram a movimentação enquanto aplicam água no terreno. Os sistemas mecanizados podem ser divididos em linha lateral móvel, pivô central e sistema auto propelido (Biscaro, 2009).

6.3 Características hidráulicas de um sistema de aspersão convencional

Um sistema de aspersão convencional possui diversas características hidráulicas que são determinadas pela escolha do tipo e quantidade de aspersores, sistema de rotação e pressão de serviço do aspersor e do arranjo das tubulações e conexões.

6.3.1 Precipitação equivalente

A intensidade de aplicação é a lâmina de água aplicada sobre uma superfície por um determinado período de tempo. Ela é função da vazão e quantidade de aspersores, e da área de aplicação podendo ser definida pela equação:

$$I = \frac{1000 \times Q_S \times N}{A_S} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

I = Intensidade de aplicação de água na área determinada (mm.h⁻¹);

Q_S = Vazão de cada aspersor aplicada sobre a superfície (m³.h⁻¹);

N = Quantidade de aspersores;

A_S = Área da superfície (m²).

6.3.2 Vazão do Aspersor

A vazão de um bocal de um aspersor é determinada pela seguinte fórmula:

$$Q_B = C_d \times S \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q_B = Vazão do bocal do aspersor (m³.s⁻¹);

C_d = Coeficiente de descarga do bocal;

S = Área da seção transversal do bocal (m²);

g = Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$);

h = Pressão de serviço do aspersor (m.c.a).

6.3.3 Raio de alcance de aspersores rotativos

O alcance do jato em aspersores é função da pressão de serviço do aspersor, do diâmetro do bocal, do ângulo do bocal com a horizontal e da altura do bocal em relação ao chão. Para um ângulo de 30° do bocal com o plano horizontal pode-se estimar o raio de alcance do aspersor pela seguinte equação:

$$R = 1,35 \times \sqrt{d \times h} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

R = Raio de alcance do jato (m);

d = Diâmetro do bocal (mm);

h = Pressão de serviço do aspersor (m.c.a).

6.3.4 Grau de uniformidade de precipitação

O grau de uniformidade de precipitação expressa a variabilidade da lâmina de água aplicada à superfície irrigada. O coeficiente mais conhecido e usado para essa determinação em sistemas de aspersão é o Coeficiente de Christiansen (CUC), que adotou o desvio médio como medida de dispersão, sendo o cálculo obtido através da equação:

$$CUC = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \times \bar{X}} \right] \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

CUC = Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

X_i = Lâmina de água aplicada no i -ésimo ponto sobre a superfície (mm);

\bar{X} = Lâmina média aplicada sobre a superfície (mm);

n = Número de observações.

6.4 Dimensionamento das linhas principais e laterais

A distribuição das tubulações no sistema de aspersão convencional deve ser feita considerando diversos fatores como topografia, perdas de carga linear e localizadas, geometrias e fatores climáticos.

Quanto a topografia é recomendada que as linhas laterais sejam paralelas às curvas de nível, evitando assim uma diferença de pressão entre os aspersores e permitindo uma maior uniformidade de aspersão.

As perdas de carga no sistema são muito importantes na concepção do sistema convencional de aspersão pois se muito altas podem acarretar em uma variabilidade muito grande de pressões de serviço de diferentes aspersores no sistema, e conseqüentemente causando irrigações diferenciadas entre o começo e o final das linhas.

O vento, a umidade relativa do ar e a temperatura são os principais fatores climáticos que afetam o uso da irrigação. O vento afeta diretamente a uniformidade de irrigação, sendo esse sistema não recomendado para regiões com ventos fortes e constantes. A umidade relativa do ar e temperatura influenciam na perda de água por evaporação, podendo, dependendo da aplicação do sistema, ter importância no dimensionamento.

Para o dimensionamento das tubulações da linha principal e laterais é necessário a utilização de duas equações básicas de hidráulica em condutos forçados; Equação da continuidade e equação da conservação de energia (Castro, 2005). As equações básicas, metodologias de perda de carga, assim como alguns critérios utilizados no dimensionamento de sistemas convencionais, são mostrados a seguir.

6.4.1 Equação da continuidade

A equação da continuidade na mecânica dos fluidos representa a conservação de massa do fluido ao longo do escoamento, sendo a relação para fluidos incompressíveis, em qualquer ponto do escoamento a seguinte:

$$Q = V \times A$$

Equação 5

Onde:

Q = Vazão do conduto ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

V = Velocidade da água no conduto ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

A = Área da seção transversal do conduto (m^2).

Segundo Castro (2005), um critério a ser utilizado no dimensionamento é estabelecer a velocidade máxima da água dentro da tubulação igual a 2,5 m/s. Essa recomendação decorre de evitar o desgaste das tubulações devido a altas velocidades, porém como o sistema será utilizado apenas poucas vezes ao ano e durante apenas 10 minutos cada utilização, esse critério foi desconsiderado durante as verificações.

6.4.2 Equação de conservação de energia

A equação de conservação de energia em um fluido ou também conhecida como equação de Bernoulli expressa que em um fluido ideal (sem viscosidade e atrito) a energia que possui o fluido permanece constante ao longo de seu percurso, dividindo essa energia em três componentes; cinética (taquicarga), potencial gravitacional (hipsocarga); pressão (piezocarga).

Porém na realidade não existem fluidos reais e, portanto, para a equação de Bernoulli aplicada à fluidos reais é necessário acrescentar um parâmetro à equação denominado perda de carga, podendo ser representada na seguinte forma, entre dois pontos de um escoamento:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \times g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \times g} + \Delta H_{12} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Z_i = Altura do ponto i em relação a um plano horizontal de referência (m)

P_i = Pressão do fluido no ponto i ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$);

γ = Peso específico do fluido ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$);

V_i = Velocidade do fluido no ponto i ($m.s^{-1}$);

g = Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$);

ΔH_{12} = Perda de carga entre os pontos 1 e 2 (m).

Um critério de projeto recomendado por Biscaro (2009), para garantir um bom funcionamento do sistema é de uma variação máxima de 20% entre a pressão de funcionamento entre o primeiro e o último aspersor em uma linha, ou seja, a perda de carga total ao longo da linha, mais ou menos o desnível nessa linha, deverá ser igual ou menor que 20%.

6.4.3 Perda de carga linear

Para a determinação da perda de carga linear em um trecho de tubulação podem ser utilizadas diversas formulas como a equação de Darcy-Weisbach ou formula de Hazen-Williams. As metodologias de cálculo das equações acima são detalhadas a seguir.

6.4.3.1 Equação de Darcy-Weisbach

A equação de Darcy-Weisbach, ou também conhecida como formula universal de perda de carga para condutos de seção circular apresenta-se como:

$$\Delta H_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

ΔH_L = Perda de carga linear do trecho L (m);

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach;

L = Comprimento do conduto (m);

D = Diâmetro do conduto (m);

V = Velocidade do líquido no interior do conduto ($m.s^{-1}$);

g = Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$).

O coeficiente de atrito f é adimensional e pode ser determinado para escoamentos laminares ($Re < 2000$), através da formula:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach;

Re = Número de Reynolds

Para escoamentos na faixa de transição ou turbulentos ($Re > 4000$) a equação de Colebrook-White apresenta bons resultados na determinação do fator de atrito:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach;

e = rugosidade interna da parede da tubulação (m)

D = Diâmetro do conduto (m)

Re = Número de Reynolds

6.4.3.2 Equação de Hazen-Williams

A equação de Hazen-Williams tem sido largamente empregada para condutos de seção circular com diâmetro superior a 50 mm, para a condução de água. A equação é descrita como:

$$J = \frac{10,64}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

J = Perda de carga unitária ($m \cdot m^{-1}$)

C = Coeficiente de Hazen-Williams

Q = Vazão do conduto no trecho ($m^3 \cdot s^{-1}$)

D = Diâmetro do conduto (m)

O coeficiente C é um coeficiente de perda de carga que depende do material empregado nas paredes do tubo. A tabela 1 mostra valores do coeficiente C normalmente adotados.

Tabela 1 – Coeficiente de perda de carga C da equação de Hazen-Williams

Tubos	Novos	Usados ≈ 10 anos	Usados ≈ 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	–	–
Aço galvanizado roscado	125	100	–
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	–	–
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	–	–
Plástico (PVC)	140	135	130

(fonte: NETTO et al. 1998, p. 150)

6.4.4 Perda de carga localizada

As perdas de carga localizadas são causadas por singularidades que provocam a dissipação localizada de energia, como curvas, junções, válvulas, conexões, etc. A expressão geral para o cálculo da perda de carga localizada é expressa por:

$$\Delta H_S = K \times \frac{V^2}{2 \times g} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

ΔH_s = Perda de carga singular do trecho L (m);

K = Coeficiente de carga localizada;

V = Velocidade do líquido no interior do conduto ($m.s^{-1}$);

g = Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$).

Os coeficientes K são tabelados para cada caso específico de singularidade no sistema. A tabela 2 apresenta valores aproximados do coeficiente K para cada singularidade.

Tabela 2 – Coeficiente de carga localizada K

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Pequena derivação	0,03
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Saída de canalização	1,0
Cotovelo de 45°	0,40	Te de passagem direta	0,6
Cotovelo de 90°	0,90	Te de saída bilateral	1,8
Crivo	0,75	Te de saída de lado	1,3
Curva de 22,5°	0,10	Válvula borboleta aberta	0,3
Curva de 45°	0,20	Valvula de ângulo aberta	5,0
Curva de 90°	0,40	Válvula de gaveta aberta	0,2
Entrada de borda	1,00	Válvula de pé	1,8
Entrada normal	0,50	Valvula de retenção	2,5
Junção	0,40	Valvula de globo aberta	10,0
Medidor venturi	2,50**		

* Relativo à maior velocidade

** Relativo à velocidade na tubulação

(fonte: Baptista 2005, p. 101)

Outra metodologia para a consideração da perda de carga singular em tubulações, é a utilização do método dos comprimentos virtuais, que considera que uma canalização que possui diversas singularidades, equivale a uma tubulação retilínea maior. Sob o ponto de vista de cálculo o método consiste em adicionar a extensão real da canalização, tubos com diâmetro, rugosidade e comprimento, denominado comprimentos equivalentes, tal que proporcionem a mesma perda de carga oriunda das singularidades. Cada singularidade possui um comprimento equivalente para o tipo de tubulação, encontrados em formas de tabelas em manuais de hidráulica ou normas. As tabelas 3 e 4 mostram comprimentos equivalentes correspondentes a singularidades mais comuns utilizadas em instalações hidráulicas de água fria.

Tabela 3 – Comprimentos equivalentes em metros de canalização para tubos rugosos
(tubo de aço-carbono, galvanizado ou não)

Diâmetro nominal (DN)	Tipo de conexão					
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê passagem direta	Tê passagem lateral
15	0,5	0,2	0,3	0,2	0,1	0,7
20	0,7	0,3	0,5	0,3	0,1	1,0
25	0,9	0,4	0,7	0,4	0,2	1,4
32	1,2	0,5	0,8	0,5	0,2	1,7
40	1,4	0,6	1,0	0,6	0,2	2,1
50	1,9	0,9	1,4	0,8	0,3	2,7
65	2,4	1,1	1,7	1,0	0,4	3,4
80	2,8	1,3	2,0	1,2	0,5	4,1
100	3,8	1,7	2,7	-	0,7	5,5
125	4,7	2,2	-	-	0,8	6,9
150	5,6	2,6	4,0	-	1,0	8,2

(fonte: Norma Brasileira de Instalação predial de água fria – NBR 5626/98, p. 29)

Tabela 4 – Comprimentos equivalentes em metros de canalização para tubos lisos
(tubos de plástico, cobre ou liga de cobre)

Diâmetro nominal (DN)	Tipo de conexão					
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê passagem direta	Tê passagem lateral
15	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3
20	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4
25	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1
32	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6
40	3,2	1,0	1,2	0,6	2,2	7,3
50	3,4	1,3	1,3	0,7	2,3	7,6
65	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8
80	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0
100	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3
125	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0
150	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1

(fonte: Norma Brasileira de Instalação predial de água fria – NBR 5626/98, p. 30)

Castro (2005) recomenda que, para o cálculo final das perdas de carga singulares em sistemas de irrigação móveis, deve-se adicionar 25% correspondente às perdas dos engates.

6.4.5 Bombas hidráulicas

“As bombas hidráulicas são máquinas destinadas à transformação da energia mecânica recebida dos motores em energia hidráulica sob a forma cinética, de pressão ou de posição, afim de possibilitar o transporte e/ou elevação dos fluídos a outros pontos” (Baptista, 2005).

As curvas características das bombas, fornecidas pelos fabricantes, permitem relacionar vazão de funcionamento com altura manométrica, potência, rendimento ou desenvolvimento do NPSH.

Para não ocorrer cavitação na bomba a seguinte inequação deve ser respeitada:

$$NPSH_D \geq NPSH_R \quad \text{Inequação 1}$$

O termo $NPSH_D$ representa a carga existente na instalação para permitir a sucção do fluido, e pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$NPSH_D = H_{ATM} - \Delta H_S - H_{GS} - H_V \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$NPSH_D$ = *Net Positive Suction Head* disponível (m)

H_{ATM} = Carga hidráulica correspondente a pressão atmosférica (m)

ΔH_S = Perda de carga na tubulação de sucção (m)

H_{GS} = Altura geométrica de Sucção (m)

H_V = Carga hidráulica correspondente a pressão de valor (m)

Já o termo $NPSH_R$ pode ser interpretado fisicamente como sendo a energia que a bomba necessita para realizar a sucção do líquido sem cavitação, e seu valor pode ser obtido através da curva fornecida pelo fabricante. Na prática utiliza-se uma margem de segurança mínima de 0,6 m, ou 20% do valor teórico, modificando a inequação 1 (Baptista, 2005).

$$NPSH_D - 0,6 \text{ m} \geq NPSH_R \quad \text{Inequação 2}$$

$$\frac{NPSH_D}{1,2} \geq NPSH_R \quad \text{Inequação 3}$$

A equação do sistema de tubulação, para a situação em que os pontos inicial e final estão sujeitos a pressão atmosférica é dada por:

$$H_M = H_G + \Delta H_T \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

H_M = Altura manométrica (m);

H_G = Altura geométrica (m);

ΔH_T = Perda de carga total na tubulação (m).

Para cada vazão estará associada uma perda de carga na tubulação. Quando utilizada a equação 10 para a perda distribuída e a equação 11 para perda de carga localizada é possível reescrever a equação da curva do sistema somente em função da vazão por:

$$H_M = H_G + \frac{10,64}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \times L + \frac{8 \times K \times Q^2}{g \times \pi^2 \times D^4} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

H_M = Altura manométrica (m);

H_G = Altura geométrica (m);

C = Coeficiente de Hazen-Williams;

Q = Vazão do conduto no trecho ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

D = Diâmetro do conduto (m);

K = Coeficiente de carga localizada.

Portanto, a partir da equação 14 e conhecendo as características físicas do sistema de tubulação como altura geométrica, diâmetros, material de composição, comprimentos dos condutos, e singularidades existentes é possível determinar a curva altura manométrica versus vazão.

O ponto de operação da bomba será dado pelo ponto de intersecção da curva que relaciona altura manométrica e vazão da bomba, fornecida pelo fabricante, com a curva do sistema de tubulação.

7. PROPOSTA DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA POR ASPERSÃO

De acordo com os objetivos do trabalho, a proposição de simulação de chuvas, constitui em um sistema de aspersão convencional portátil, concebido para estudar o comportamento de um dispositivo experimental de medida de controle de escoamento superficial, quando submetido à diferentes chuvas. O local do módulo experimental da simulação de chuva fica localizado no Instituto de Pesquisa Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

7.1 Descrição da área experimental

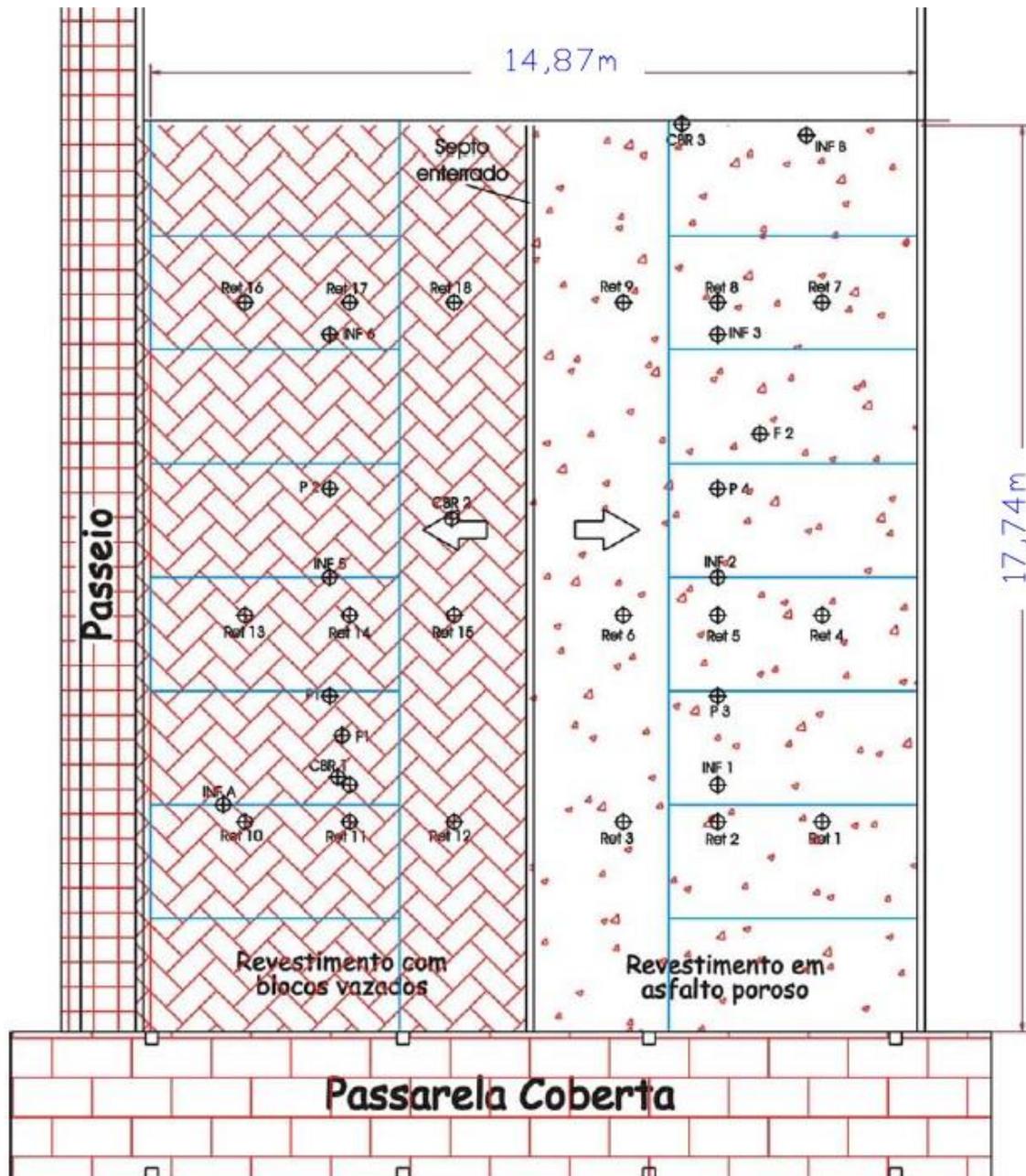
A área do módulo experimental consiste em um estacionamento de veículos leves, localizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, no município de Porto Alegre. O estacionamento possui uma área de aproximadamente 264 m², com capacidade para 16 automóveis. Nas figuras 15 e 16 pode-se observar o local de estudo assim como sua planta baixa com as suas dimensões.

Figura 15 – Vista frontal do local do módulo experimental durante sua construção



.(fonte: Panoramio)

Figura 16 – Planta baixa do pavimento permeável com suas dimensões e localização dos pontos de coleta de amostras para caracterização do solo



.(fonte: ACIOLI, 2005, p. 41)

O solo encontrado na base da área do pavimento, é do tipo argiloso, tendo assim uma boa representatividade em relação aos solos da cidade de Porto Alegre (IBGE 2003 apud Acioli, 2005 p. 39). O volume máximo de armazenamento do reservatório, dado pela porosidade da camada brita abaixo do revestimento, é de 8250 L (Acioli, 2005).

Para o projeto do simulador de chuvas, a área considerada foi um retângulo de 18 x 15 m, totalizando 270 m² de superfície, abrangendo desta forma a totalidade da área do pavimento.

7.2 Características desejadas para a simulação de chuva

Os parâmetros mais importantes definidos para a simulação da chuva foram a intensidade de precipitação e o coeficiente de uniformidade mínimo.

A intensidade de precipitação foi definida pela da curva IDF do posto IPH, em Porto Alegre, produzida a partir de dados de chuva de 1964 a 1983 com validade para chuvas com duração entre 10 e 180 minutos (Goldenfum 1990), bastante representativa das condições meteorológicas do local escolhido. Como o objetivo do trabalho é avaliar a capacidade de infiltração do revestimento do pavimento permeável, foi utilizado uma chuva com duração de 10 minutos e tempo de retorno de 25 anos. As chuvas de curta duração possuem em média, maiores intensidades, e foi assim escolhida porque a intensidade de precipitação é um fator importante para avaliar a infiltração do revestimento. A partir da curva IDF do posto IPH, mostrada abaixo, e características da chuva descritas anteriormente encontrou-se uma intensidade de projeto de 110,8 mm/h.

$$I_P = \frac{509,859 \times T_R^{0,196}}{(T_D + 10)^{0,72}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

I_P = Intensidade da precipitação (mm.h^{-1});

T_R = Período de retorno (anos);

T_D = Tempo de duração da precipitação (min).

O coeficiente de uniformidade é um fator muito importante em simuladores de chuva pois quanto maior a uniformidade de um simulador mais semelhante é de uma chuva real com mesma intensidade. A definição do coeficiente de uniformidade mínimo para o presente projeto baseou-se na classificação proposta por Mantovani (2001) para desempenho de sistemas de irrigação por aspersão, tabela 5, como bom. Desta forma considerou como aceitável valores acima de 80%.

Tabela 5 – Classificação do desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional em função do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

Classificação	CUC (%)
Excelente	>90
Bom	80-90
Razoável	70-80
Ruim	60-70
Inaceitável	<60

(fonte: Mantovani, 2001)

7.3 Descrição do sistema de chuva proposto

Com as informações iniciais de intensidade, coeficiente mínimo de uniformidade, e geometria definidas anteriormente foram propostos diversos arranjos possíveis com diferentes componentes e verificado cada desempenho e características. A seguir são descritos os componentes escolhidos e a planta final do sistema, cujas verificações apontaram os resultados mais próximos dos desejados.

7.3.1 Aspensor

Para a definição do aspensor foi necessário buscar um tipo de aspensor que proporcionasse uma vazão bastante elevada, com raio de alcance menor possível para evitar aspersão fora do pavimento. Outra característica importante na escolha do aspensor foi a possibilidade de raio de rotação parcial (aspersor setorial), para adequação de posicionamento dos aspersores na geometria retangular evitando novamente a perda de água.

O aspensor escolhido foi o Aspensor Setorial 1” Bronze Macho. O aspensor, seus dados técnicos e gráfico de comportamento fornecidos pelo fabricante, são mostrados abaixo na tabela 6 e nas figuras 17 e 18.

Figura 17 – Aspersor Setorial 1” Bronze Macho



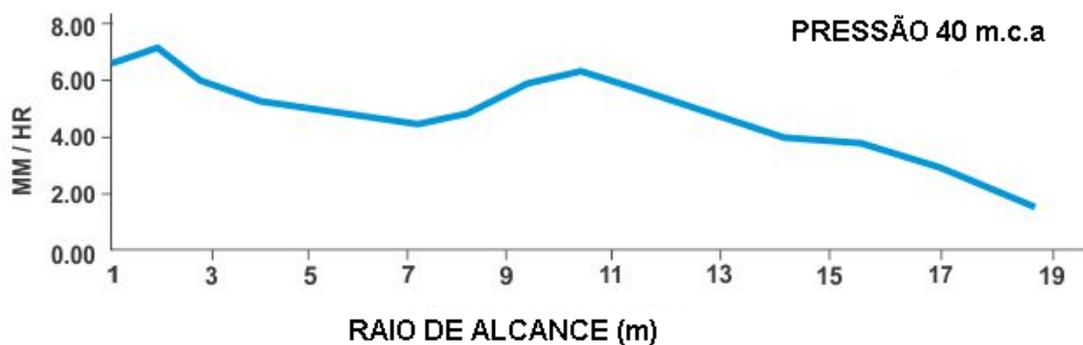
(fonte: foto do autor)

Tabela 6 – Características técnicas do aspersor setorial 1” bronze macho

Características técnicas			
Bocal (mm)	Pressão (m.c.a)	Raio de Alcance (m)	Vazão (L/h)
7,1 x 3,2	25	16,4	3560
	30	17	3920
	35	17,4	4160
	40	17,7	4450
	45	18,3	4770
	50	18,9	5030

(fonte: Gianni, 2016)

Figura 18 – Gráfico de comportamento do aspersor com giro completo e pressão de funcionamento de 40 m.c.a



(fonte: Adaptado de Gianni, 2016)

7.3.2 Tubulações

As tubulações utilizadas para o sistema foram tubulações de PVC de 6 m com engate roscável plástico, pois são bastante utilizadas em sistemas de irrigação móvel devido a maior rapidez na montagem e desmontagem do sistema, sendo comercializadas nesse tamanho padronizado. A figura 19 apresenta um tubo de PVC com engate roscável plástico.

Figura 19 – Tubo de PVC com engate roscável plástico



(fonte: Asperbras tubos e conexões, 2016)

7.3.3 Conexões

As conexões foram escolhidas de acordo com a necessidade de adequação a geometria do sistema, ligação do aspersor com a tubulação, e as conexões necessárias entre o reservatório e a tubulação de sucção, e na saída da tubulação de recalque da bomba até a ligação na linha principal. As conexões utilizadas no sistema são ilustradas abaixo nas figuras 20 a 24.

Figura 20 – União soldável



(fonte: Tigre, 2016)

Figura 21 – Adaptador soldável com flanges livres para caixa d'água



(fonte: Tigre, 2016)

Figura 22 – Registro gaveta



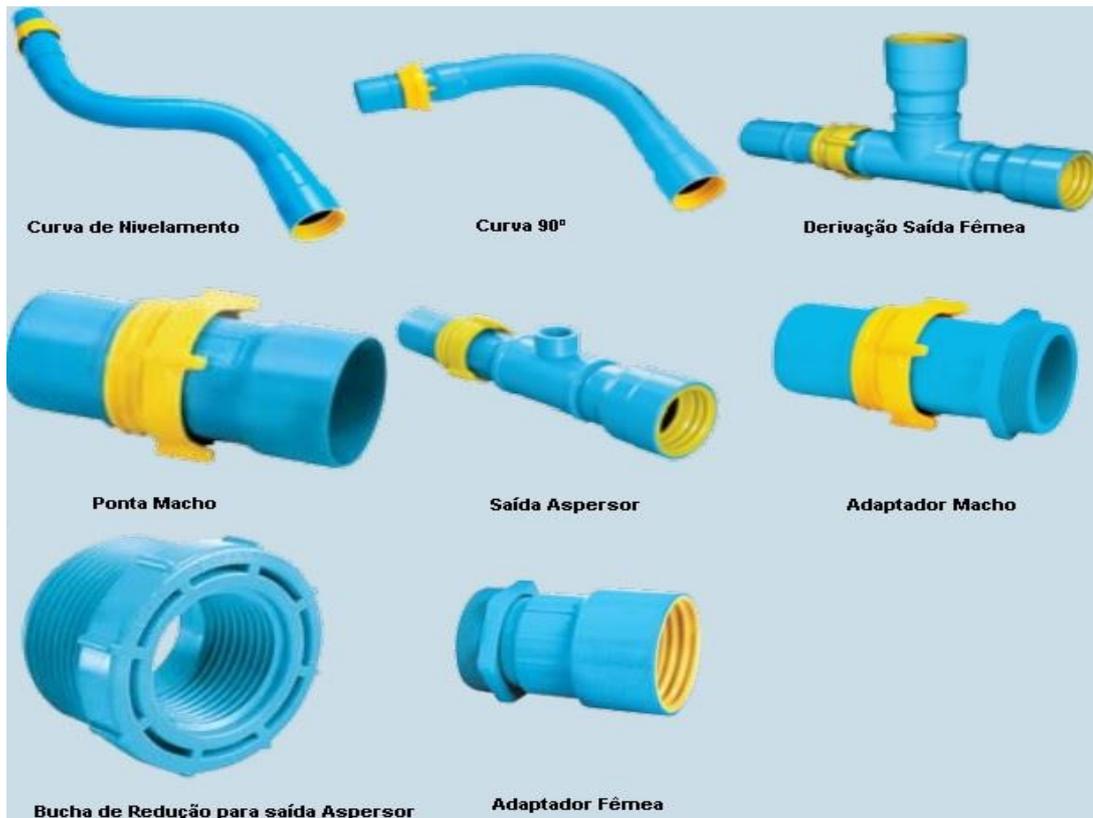
(fonte: Leroy Merlin, 2016)

Figura 23 – Niple rosca



(fonte: Leroy Merlin, 2016)

Figura 24 – Conexões das tubulações em PVC



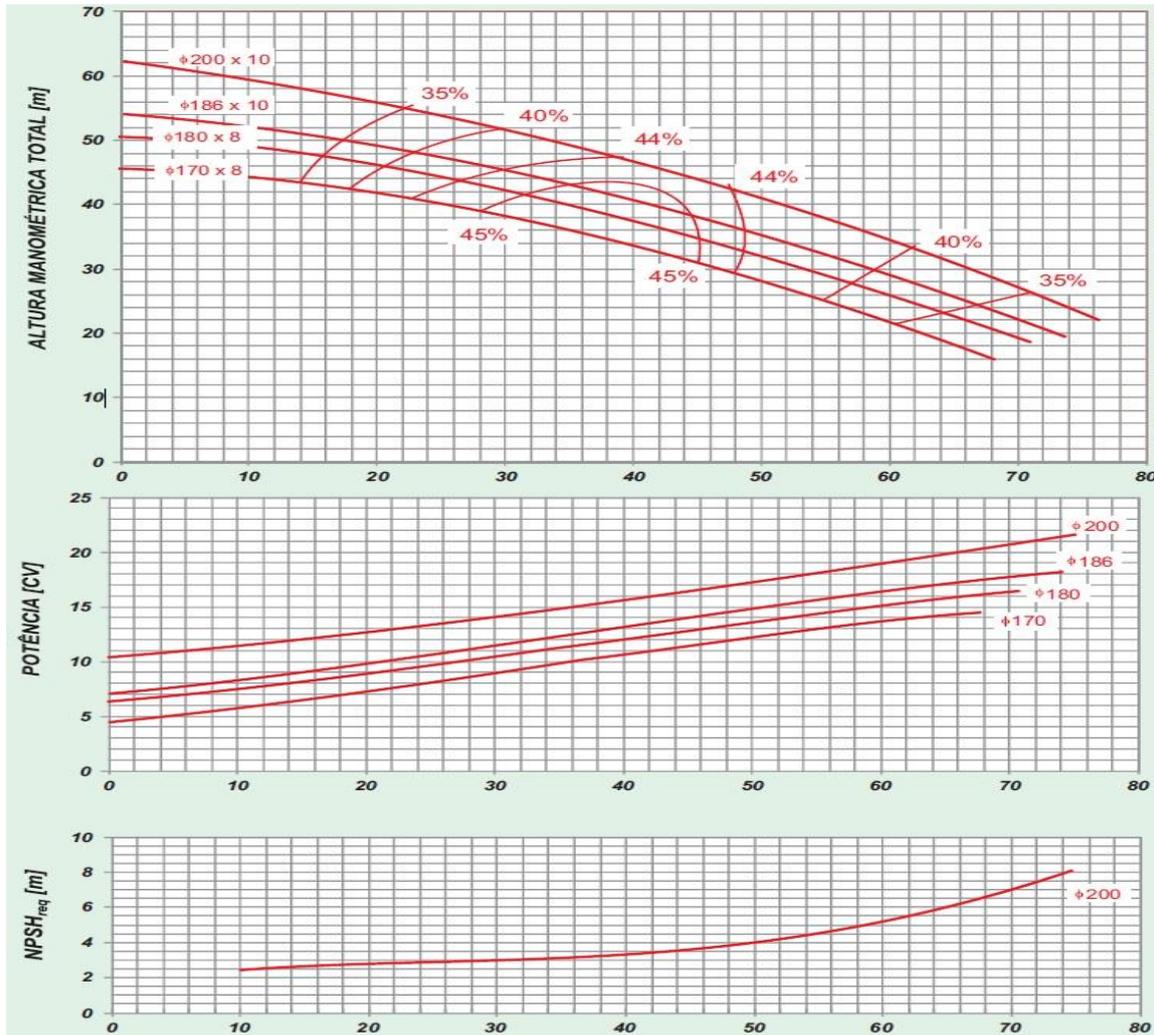
(fonte: Catálogo técnico Tigre, 2009)

7.3.4 Conjunto moto-bomba

O conjunto moto-bomba foi definido de acordo com as especificações técnicas desejadas de altura manométrica fornecida para possibilitar uma pressão de funcionamento adequada dos aspersores e, conseqüentemente, obter uma intensidade de chuva mais próxima possível da definida.

A bomba centrífuga foi uma monoestágio da marca Thebe modelo R-20 S, com 20 CV e rotor 200 x 10. A sucção tem diâmetro de 75 mm (3") e o recalque tem dimensão de 60 mm (2" ½). As curvas de altura manométrica, potência e $NPSH_R$ da bomba escolhida são mostrados na figura 25.

Figura 25 – Curvas características do conjunto moto-bomba



(fonte: Thebe, 2016)

7.3.5 Reservatório

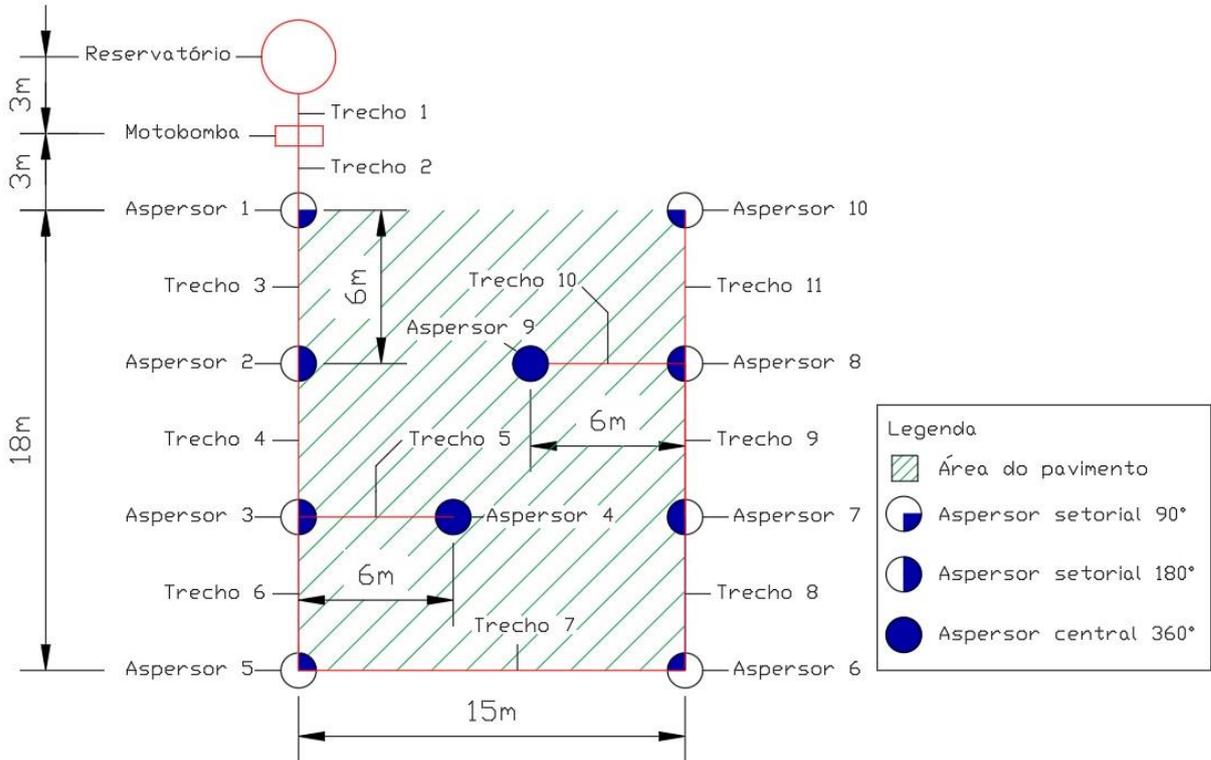
O reservatório necessário para uma simulação de 10 minutos de chuva com a intensidade desejada foi de capacidade de 7500 litros, altura de 2,2 m e saída da tubulação em 0,1 m acima da cota inferior do reservatório.

7.3.6 Planta baixa e detalhes do sistema de irrigação proposto

A composição do sistema final, utilizando os componentes previamente descritos, está ilustrada nas figuras 26 e 27. A configuração possui 10 aspersores e foi realizada uma divisão das tubulações em trechos para facilitar as posteriores verificações. Todos os trechos possuem

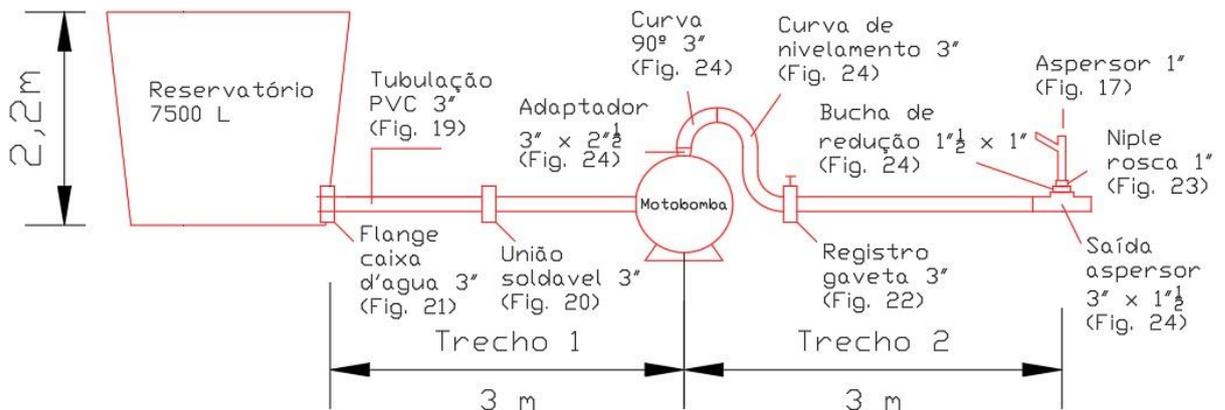
tubulação de PVC com engate roscável e DN 75 (3"). Os aspersores 1,5,6 e 10 são aspersores com função setorial de 90°, os aspersores 2,3,7 e 8 são aspersores com função setorial de 180° e os aspersores 4 e 9 tem seu funcionamento previsto em giro completo.

Figura 26 – Planta baixa do arranjo final



(fonte: Própria do autor)

Figura 27 – Detalhes dos trechos 1 e 2



(fonte: Própria do autor)

7.4 Verificações de desempenho do arranjo proposto

Para garantir que o sistema irá funcionar corretamente e proporcionar os resultados desejados foram realizadas diversas verificações, estimativas e cálculos detalhados nos próximos itens. Nas verificações admitiu-se que todos aspersores possuíam mesma vazão para obter resultados aproximados, e depois através de iterações foram definidas as características finais dos trechos do sistema.

7.4.1 Relação entre pressão e vazão e intensidade total

Através dos dados técnicos do aspersor fornecido foi estimado um coeficiente de descarga que obtivesse um bom ajuste pela equação 2 para os valores de vazão. Como o fabricante não fornece o coeficiente de descarga, utilizando a equação 2, estimou-se um coeficiente de descarga do bocal em 0,93, e esse apresentou uma boa aproximação entre pressão de funcionamento com vazão do aspersor, comparada a fornecida pelo fabricante. Também foi calculada a intensidade de precipitação considerando toda vazão incidente sobre o pavimento, denominada intensidade total.

Tabela 7 – Aproximação da vazão do aspersor e intensidade total sobre o pavimento

Características técnicas					
Bocal (mm)	Pressão (m.c.a)	Raio de Alcance (m)	Vazão fornecida (L/h)	Vazão calculada (L/h)	Intensidade total (mm/h)
7.1 x 3.2	25	16,4	3560	3530,248	130,750
	30	17	3920	3867,193	143,229
	35	17,4	4160	4177,046	154,705
	40	17,7	4450	4465,450	165,387
	45	18,3	4770	4736,324	175,419
	50	18,9	5030	4992,524	184,908

(fonte: Própria do autor)

7.4.2 Intensidade de precipitação efetiva

Utilizando a figura 18, e com a configuração proposta foi determinado para cada grupo de aspersores, a precipitação que efetivamente ocorrerá dentro da área a ser estudada. Para isso, assumindo-se uma pressão de funcionamento de 40 m.c.a em todos aspersores, utilizou-se um software CAD (*computer-aided design*) para definir raios de influência da precipitação a cada

2 m de alcance de 1 a 18 m, pois há uma variação da precipitação ao longo da distância. Através desse método foi possível definir a precipitação efetiva para essa configuração. Na tabela 8 são apresentados os resultados, sendo as intensidades utilizadas obtidas pelo gráfico de desempenho.

Tabela 8 – Intensidade efetiva

Aspersores Setoriais 90° (4 Unidades)							
Raio de influência (m)	Intensidade (mm/h)	Area irrigada (m ²)	Area fora do pavimento (m ²)	Irrigação efetiva (m ²)	Irrigação efetiva (%)	Vazão Total (m ³ /h)	Vazão efetiva (m ³ /h)
1	26	6,28	0,00	6,28	100,00%	0,15	0,15
3	23	12,57	0,00	12,57	100,00%	0,27	0,27
5	20	18,85	0,00	18,85	100,00%	0,36	0,36
7	18	25,13	0,00	25,13	100,00%	0,50	0,50
9	22	31,42	0,00	31,42	100,00%	0,72	0,72
11	24	37,70	0,00	37,70	100,00%	0,79	0,79
13	18	43,98	0,00	43,98	100,00%	0,75	0,75
15	16	50,27	10,80	39,47	78,52%	0,68	0,53
17	11	27,49	9,46	18,03	65,59%	0,26	0,17
18	8						
Σ		253,68	20,26	233,43		4,49	4,25
						Vazão efetiva	94,75%
						Intensidade unitária (mm/h)	15,74
Aspersores Setoriais 180° (4 Unidades)							
Raio de influência (m)	Intensidade (mm/h)	Area irrigada (m ²)	Area fora do pavimento (m ²)	Irrigação efetiva (m ²)	Irrigação efetiva (%)	Vazão Total (m ³ /h)	Vazão efetiva (m ³ /h)
1	13	12,57	0,00	12,57	100,00%	0,15	0,154
3	11,5	25,13	0,00	25,13	100,00%	0,27	0,270
5	10	37,70	2,44	35,26	93,53%	0,36	0,335
7	9	50,27	11,50	38,77	77,12%	0,50	0,388
9	11	62,83	18,53	44,30	70,51%	0,72	0,509
11	12	75,40	28,49	46,91	62,22%	0,79	0,493
13	9	87,96	46,61	41,35	47,01%	0,75	0,351
15	8	100,53	81,70	18,83	18,73%	0,68	0,127
17	5,5	54,98	51,21	3,77	6,85%	0,26	0,018
18	4						
Σ		507,37	240,48	266,89		4,49	2,65
						Vazão efetiva	58,96%
						Intensidade unitária (mm/h)	9,80

Aspersores Centrais 360° (2 Unidades)							
Raio de influência (m)	Intensidade (mm/h)	Area irrigada (m ²)	Area fora do pavimento (m ²)	Irrigação efetiva (m ²)	Irrigação efetiva (%)	Vazão Total (m ³ /h)	Vazão efetiva (m ³ /h)
1	6,5	25,13	0,00	25,13	100,00%	0,15	0,154
3	5,75	50,27	0,00	50,27	100,00%	0,27	0,270
5	5	75,40	9,76	65,64	87,05%	0,36	0,312
7	4,5	100,53	45,73	54,80	54,51%	0,50	0,274
9	5,5	125,66	85,64	40,02	31,85%	0,72	0,230
11	6	150,80	124,55	26,25	17,41%	0,79	0,138
13	4,5	175,93	171,17	4,76	2,70%	0,75	0,020
15	4	201,06	201,06	0,00	0,00%	0,68	0,000
17	2,75	109,96	109,96	0,00	0,00%	0,26	0,000
18	2						
Σ		1014,73	747,88	266,86		4,49	1,40
						Vazão efetiva	31,16%
						Intensidade unitária (mm/h)	5,18
						Intensidade efetiva total (mm/h)	112,52

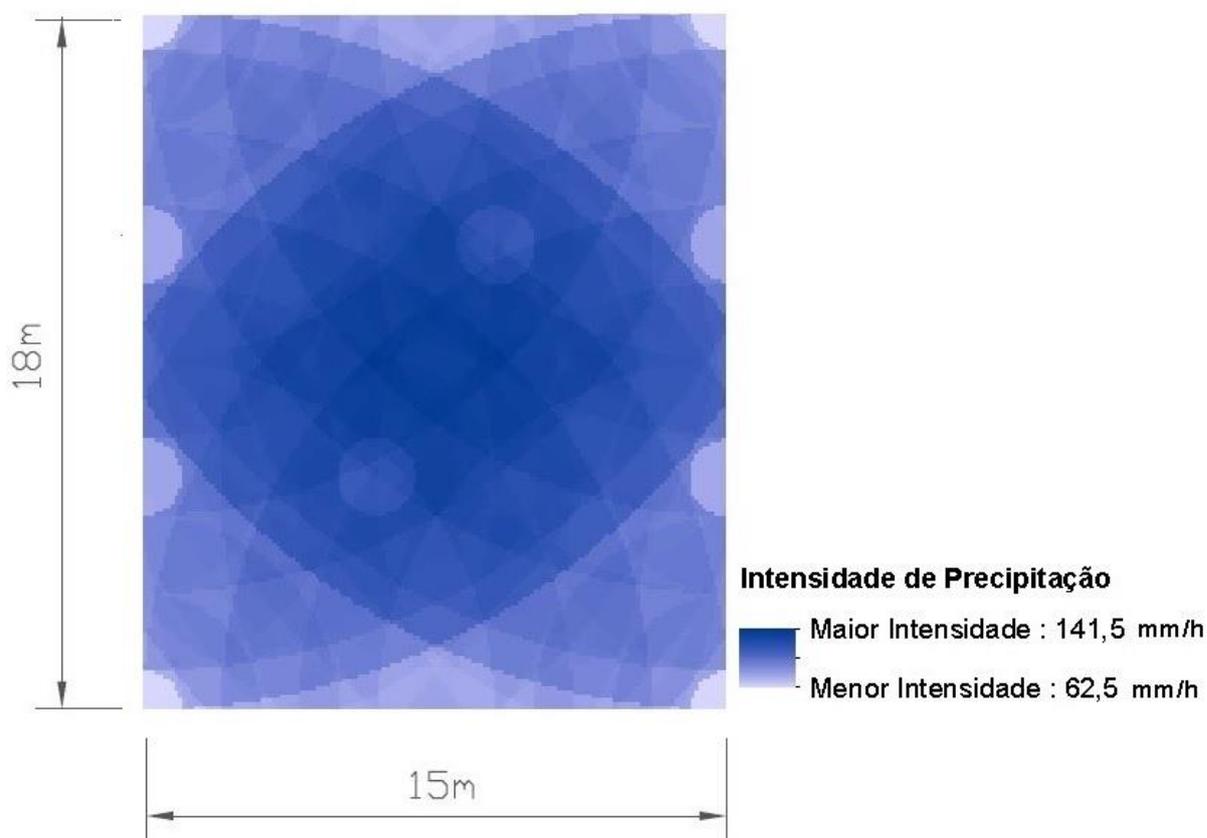
(fonte: Própria do autor)

A intensidade efetiva total encontrada com essa configuração de aspersores, e pressão de funcionamento de todos aspersores de 40 m.c.a foi de 112,52 mm/h. Esse valor corresponde a 68,03% da intensidade total observada na tabela 7.

7.4.3 Coeficiente de Uniformidade

A uniformidade de precipitação da configuração foi definida pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen, de acordo com a equação 4. A metodologia utilizada para determinar o coeficiente foi a sobreposição de efeitos da lâmina d'água dos aspersores, com pressão de 40 m.c.a, sem a consideração da interação entre seus jatos, com a utilização de um *software* de geoprocessamento. No *software* foram determinados raios de influência do aspersor a cada 2 m, com intensidades de precipitação entre raios equivalente à média dos valores de cada distancia ao aspersor, obtidas pela figura 18. A figura 28 mostra a sobreposição total quando todos os aspersores estiverem em funcionamento.

Figura 28 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen



(fonte: Própria do autor)

A partir da equação 4 o CUC encontrado foi de 88,9%, superior ao mínimo estabelecido anteriormente de 80% e considerado como bom pela classificação adotada. Uma avaliação efetiva do valor real do CUC poderá ser efetuada durante as simulações de chuva experimentalmente. Os valores do coeficiente de uniformidade podem diminuir devido ao efeito do vento.

7.4.4 Perdas de carga no sistema

Para determinar as perdas de carga no sistema foram utilizadas as metodologias de cálculo de perda de carga distribuída e localizada, respectivamente pela equações de Hazen-Williams e método dos comprimentos equivalentes. Para o cálculo das perdas do sistema proposto foram adotados os seguintes valores e considerações, resultando na equação 16: Coeficiente de Hazen-Williams igual a 140 (Conduitos de PVC); diâmetro externo de 75,5 mm e espessura de 2,5 mm,

segundo NBR 15282:2005; 25% de perdas de carga localizadas adicionais devido a perdas dos engates.

$$\Delta H_T = \sum_{i=1}^{11} \left(\frac{10,64}{C^{1,85}} \times \frac{Q_i^{1,85}}{D_i^{4,87}} \right) \times (L_i + L_{ie} \times 1,25) \quad \text{Equação 16}$$

$$Q_i = Q_u \times N_R \quad \text{Equação 17}$$

$$D_i = D_e - 2 \times E_S \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

ΔH_T = Perda de carga total na tubulação (m);

i = Trechos do sistema de simulação de chuva;

C = Coeficiente de Hazen-Williams;

Q_i = Vazão em cada trecho do conduto ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

D_i = Diâmetro interno em cada trecho do conduto (m);

L_i = Comprimento real de cada trecho do conduto (m);

L_{ei} = Comprimento equivalente de todas singularidades de cada trecho do conduto (m);

Q_u = Vazão unitária do aspersor ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

N_R = Número de aspersores restantes;

D_e = Diâmetro externo do conduto (m);

E_S = espessura da parede do conduto (m).

A equação 16 foi utilizada para obter a perda de carga total aproximada e sua curva do sistema de tubulação, assumindo a mesma pressão durante o trecho, para cenários de 20 m.c.a a 50 m.c.a, combinada a vazão correspondente a cada pressão, obtida através da relação obtida anteriormente no item 7.4.1. As características dos trechos utilizadas, os comprimentos

equivalentes para cada singularidade, e o resumo dos resultados estão mostrados a seguir nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Comprimentos equivalentes (L_e) das singularidades utilizadas

Comprimentos equivalentes (m)					
Diâmetro Nominal	Tê saída lateral	Curva 90°	Entrada de Borda	Joelho 90°	Registro Gaveta Aberto
DN 75 - 3"	8	1,5	3,7	3,9	0,9

(fonte: NBR 5626/82 apud Baptista 2005, p. 105)

Tabela 10 – Perda de carga total do sistema com pressões de funcionamento constantes

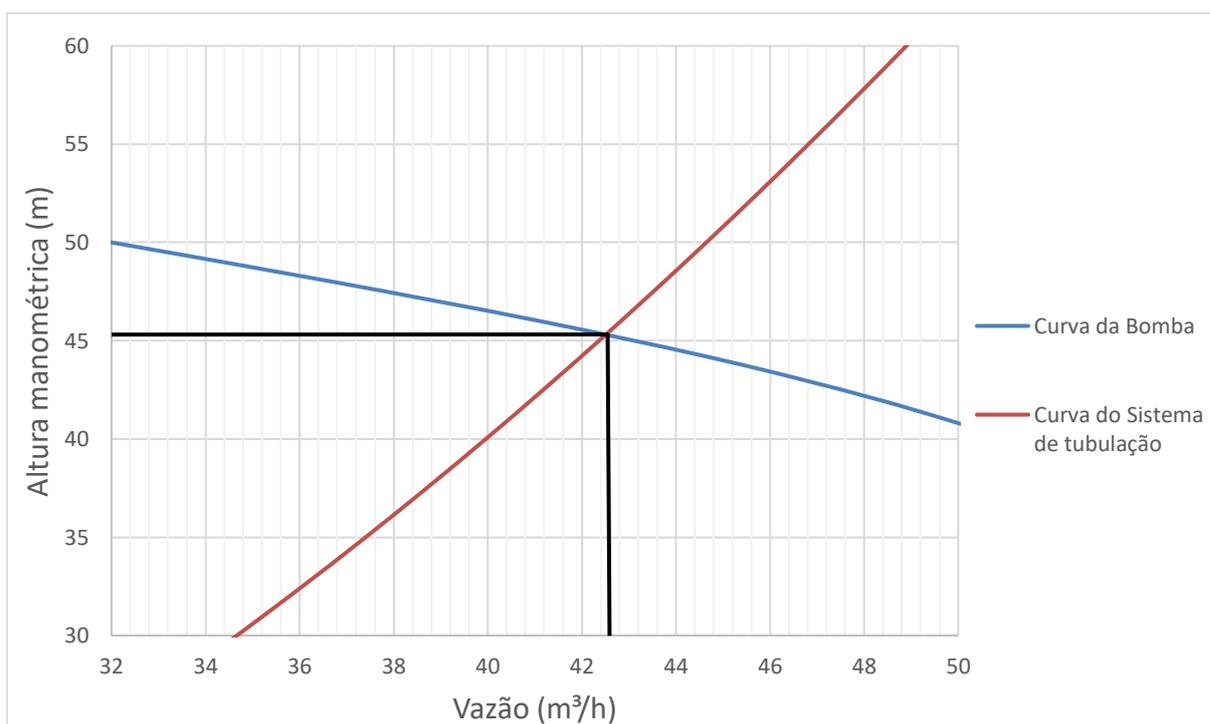
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
Aspersores restantes	10	10	9	8	1	6	5	4	3	1	1
Comprimento Real (m)	3	3	6	6	6	6	15	6	6	6	6
Diâmetro interno (m)	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705	0,0705
Singularidades	1 x Entrada de borda	1 x Joelho 90º 1x Registro gaveta 2x Curva 90º 1x Tê saída lateral	1x Tê saída lateral	2x Tê saída lateral	1x Tê saída lateral	1x Tê saída lateral 1x Curva 90º	1x Tê saída lateral 1x Curva 90º	1x Tê saída lateral	2x Tê saída lateral	1x Tê saída lateral	1x Tê saída lateral
Comprimento Equivalente (m)	4,625	19,75	10	20	10	11,875	11,875	10	20	10	10
Pressão = 20 m.c.a											
Vazão (m³/s)	0,0088	0,0088	0,0079	0,0070	0,0009	0,0053	0,0044	0,0035	0,0026	0,0009	0,0009
Perda de Carga (m)	0,542	1,619	0,937	1,224	0,016	0,494	0,530	0,209	0,199	0,016	0,016
Pressão = 30 m.c.a										∑ΔHt	5,800
Vazão (m³/s)	0,0107	0,0107	0,0097	0,0086	0,0011	0,0064	0,0054	0,0043	0,0032	0,0011	0,0011
Perda de Carga (m)	0,7897	2,3561	1,3633	1,7812	0,0233	0,7188	0,7710	0,3036	0,2896	0,0233	0,0233
Pressão = 40 m.c.a										∑ΔHt	8,443
Vazão (m³/s)	0,0124	0,0124	0,0112	0,0099	0,0012	0,0074	0,0062	0,0050	0,0037	0,0012	0,0012
Perda de Carga (m)	1,0307	3,0753	1,7795	2,3249	0,0304	0,9382	1,0064	0,3963	0,3780	0,0304	0,0304
Pressão = 50 m.c.a										∑ΔHt	11,021
Vazão (m³/s)	0,0139	0,0139	0,0125	0,0111	0,0014	0,0083	0,0069	0,0055	0,0042	0,0014	0,0014
Perda de Carga (m)	1,2673	3,7812	2,1879	2,8585	0,0374	1,1535	1,2373	0,4873	0,4648	0,0374	0,0374
										∑ΔHt	13,550

(fonte: Própria do autor)

7.4.5 Características do conjunto moto-bomba

Para definir o ponto de funcionamento da bomba utilizou-se a curva do sistema, obtida através do item anterior e características geométricas, e da curva vazão por altura manométrica fornecida pelo fabricante. As duas curvas são graficadas na figura 29, onde seu ponto de encontro define o ponto de funcionamento da bomba.

Figura 29 – Curva do sistema x Curva da carga manométrica da bomba



(fonte: Própria do autor)

A vazão de funcionamento encontrada foi aproximadamente 42,46 m³/h com altura manométrica da bomba de 45,16 m.

Como há uma variação de energia no sistema, os aspersores não funcionarão com a mesma pressão. Para determinar a diferença de pressão de funcionamento do primeiro ao último aspersor, foi utilizada a vazão aproximada encontrada como inicial no sistema e sua energia hidráulica acrescida ao sistema, e calculado em cada trecho a pressão inicial e final, através da equação 16, e assim determinado a variação de vazões entre o primeiro e último aspersor.

O resultado encontrado da vazão de funcionamento do sistema nessa primeira determinação foi 1,9% superior ao encontrado com a suposição de vazão constante nos 10 aspersores. Essa

diferença ocorre porque na verdade os aspersores iniciais trabalham com maiores pressões que a média do sistema acarretando perdas de carga maiores, deslocando a curva do sistema para a direita.

Então para definir o ponto final de funcionamento da bomba foram realizadas iterações calculando através da equação 16 a vazão total, para as combinações de vazão e altura manométrica da bomba até que houvesse convergência entre os valores. A vazão de funcionamento média final obtida foi de 43,07 m³/h com altura manométrica da bomba de 44,85 m.

Com a vazão obtida foi possível determinar a potência do conjunto moto-bomba assim como seu NPSH_R a partir da figura 24, resultando respectivamente em aproximadamente 15,2 CV e 3,5 m.

O NPSH_D pode ser cálculo através da equação 12 e resulta, para uma altitude de 80m e temperatura de 30°C em 9,68 m, atendendo as recomendações dadas pelas inequações 2 e 3 evitando assim a cavitação.

7.4.6 Resultados

A partir do ponto de funcionamento da bomba foi possível determinar as pressões dos aspersores, considerando um nível médio do reservatório, variando entre 42,06 m.c.a e 35,30 m.c.a. Essa perda de carga correspondente a 16,1% de variação entre o primeiro e o último aspersor, respeitando o limite de 20% recomendado por Biscaro (2009).

A vazão total média obtida de 43,07 m³/h representa em uma chuva de 10 minutos um volume de 7178 L de água, portanto o reservatório escolhido será suficiente. Utilizando a aproximação para intensidade efetiva encontrada de 68,03% para o sistema final, a intensidade de precipitação final do sistema resulta em 108,5 mm/h, valor muito próximo aos 110,8 mm/h da intensidade desejada de 25 anos de retorno com 10 minutos de duração. Considerando essa aproximação para intensidade efetiva, durante a simulação será precipitado aproximadamente 4880 L de água sobre o revestimento, valor correspondente a 59,2% do volume máximo de armazenamento do reservatório do módulo do pavimento permeável , 8250 L.

As parâmetros hidráulicos finais de cada trecho, obtidos através de iterações, são resumidos nas tabelas 11,12 e 13, respectivamente, para três situação durante a simulação; início da simulação, onde o reservatório encontra-se com nível máximo (2,1 m); nível médio do reservatório (1,05 m); próximo ao nível mínimo do reservatório (0,1 m).

Tabela 11 – Parâmetros hidráulicos considerando nível máximo no reservatório

	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
Vazão (m ³ /h)	43,47	43,47	38,85	34,33	4,38	25,56	21,23	16,95	12,70	4,23	4,23
Velocidade (m/s)	3,09	3,09	2,76	2,44	0,31	1,82	1,51	1,20	0,90	0,30	0,30
Pressão no conduto (m.c.a)	2,10	45,77	42,84	40,77	38,40	38,37	37,50	36,53	36,16	35,81	35,81
Perda de Carga Total (m)	0,98	2,93	1,90	2,38	0,03	0,91	0,97	0,37	0,35	0,03	0,03
Características do aspersor	Aspersor 1	Aspersor 2	Aspersor 3	Aspersor 4	Aspersor 5	Aspersor 6	Aspersor 7	Aspersor 8	Aspersor 9	Aspersor 10	∑
Pressão de funcionamento (m.c.a)	42,84	40,95	38,57	38,54	37,66	36,69	36,32	35,97	35,97	35,97	-
Vazão (m ³ /h)	4,62	4,52	4,38	4,38	4,33	4,28	4,25	4,23	4,23	4,23	43,48

Tabela 12 – Parâmetros hidráulicos considerando nível médio no reservatório

	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
Vazão (m ³ /h)	43,08	43,08	38,50	34,02	4,34	25,34	21,04	16,81	12,59	4,19	4,19
Velocidade (m/s)	3,07	3,07	2,74	2,44	0,31	1,82	1,51	1,20	0,90	0,30	0,30
Pressão no conduto (m.c.a)	1,05	44,94	42,06	40,77	38,40	38,37	37,50	36,53	36,16	35,81	35,81
Perda de Carga Total (m)	0,96	2,88	1,86	2,34	0,03	0,89	0,96	0,37	0,34	0,03	0,03
Características do aspersor	Aspersor 1	Aspersor 2	Aspersor 3	Aspersor 4	Aspersor 5	Aspersor 6	Aspersor 7	Aspersor 8	Aspersor 9	Aspersor 10	∑
Pressão de funcionamento (m.c.a)	42,06	40,19	37,86	37,83	36,97	36,01	35,64	35,30	35,30	35,30	-
Vazão (m ³ /h)	4,58	4,48	4,34	4,34	4,29	4,24	4,22	4,19	4,19	4,19	43,07

Tabela 13 – Parâmetros hidráulicos considerando nível próximo do mínimo no reservatório

	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
Vazão (m ³ /h)	42,70	42,70	38,16	33,72	4,31	25,11	20,85	16,65	12,47	4,16	4,16
Velocidade (m/s)	3,04	3,04	2,72	2,44	0,31	1,82	1,51	1,20	0,90	0,30	0,30
Pressão no conduto (m.c.a)	0,10	44,19	41,36	40,77	38,40	38,37	37,50	36,53	36,16	35,81	35,81
Perda de Carga Total (m)	0,95	2,83	1,84	2,30	0,03	0,88	0,94	0,36	0,34	0,03	0,03
Características do aspersor	Aspersor 1	Aspersor 2	Aspersor 3	Aspersor 4	Aspersor 5	Aspersor 6	Aspersor 7	Aspersor 8	Aspersor 9	Aspersor 10	∑
Pressão de funcionamento (m.c.a)	41,36	39,52	37,23	37,20	36,35	35,41	35,04	34,71	34,71	34,71	-
Vazão (m ³ /h)	4,54	4,44	4,31	4,31	4,26	4,20	4,18	4,16	4,16	4,16	42,71

(fonte: Própria do autor)

8. ORÇAMENTO DETALHADO

Para montar o orçamento do projeto foram pesquisados valores estimados dos principais componentes do sistema, em empresas especializadas, no estado do Rio Grande do Sul no mês de outubro de 2016.

O orçamento foi organizado separadamente na tabela 14 pois existe a possibilidade de utilização de reservatórios e bombas similares existentes do IPH, que atendam o mesmo objetivo, diminuindo assim o custo estimado, aumentando assim viabilidade do projeto. A mão de obra necessária para a realização do projeto será disponibilizada pelo IPH.

Tabela 14 – Orçamento dos componentes do sistema de simulação de chuva proposto (valores obtidos em outubro de 2016)

Aspersores, Tubos e conexões				
Descrição do Item	Diâmetro (pol)	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Aspersor Setorial Bronze Macho	1"	10	206,00	2.060,00
Tubo PVC com engate roscável plástico 6 m	3"	12	48,00	576,00
Saída aspersor com engate rápido	3" x 1"1/2	10	38,00	380,00
Derivação saída fêmea	3"	2	41,00	82,00
Curva de nivelamento	3"	1	60,00	60,00
Curva 90º	3"	3	35,00	105,00
Adaptador Macho	3"	2	11,00	22,00
Adaptador Fêmea	3"	2	12,00	24,00
Adaptador	3" x 2"1/2	1	13,00	13,00
Ponta Macho	3"	3	12,00	36,00
Bucha de redução para saída aspersor	1"1/2 x 1"	10	5,00	50,00
Niple Rosca	1"	10	2,50	25,00
Registro Gaveta	3"	1	270,00	270,00
União soldável	3"	1	160,00	160,00
Adaptador soldável com flanges livres para caixa d'água	3"	1	170,00	170,00
Total				4.033,00
Reservatório				
Descrição do Item		Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Caixa d'água 7500 L		1	2150,00	2.150,00
Conjunto Motobomba				
Descrição do Item		Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Moto-bomba Thebe RL-20 S 20 CV monoestágio		1	6850,00	6.850,00
			Valor Total (R\$)	13.033,00

(fonte: Própria do autor)

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou apresentar uma proposta de simulação de chuva que combinasse de maneira adequada a técnica, características do sistema de irrigação por aspersão apropriados para análise de pavimentos permeáveis, com a viabilidade, considerando custos e disponibilidade de materiais que possibilitassem um sistema portátil.

O projeto foi concebido para o estacionamento de veículos leves do IPH com objetivo de realizar simulações de chuva com condições controladas, em termos de condições iniciais como umidade do solo e temperatura. A configuração proposta permite acompanhar de forma detalhada a evolução de comportamento do revestimento em termos de redução de capacidade de infiltração, além de possibilitar demonstrações de desempenho sem necessidade de chuvas naturais

Os resultados encontrados de intensidade de precipitação e coeficiente de uniformidade foram satisfatórios com relação aos valores determinados como apropriados para avaliação da capacidade de infiltração da camada superficial do módulo experimental. As verificações também mostraram que o sistema irá funcionar corretamente, sem ocorrência de cavitação na bomba, com uma potência de 15,2 CV e com uma diferença de pressão entre o primeiro e o último aspersor de 16,1%. A vazão total dos aspersores encontrada foi de 43,07 m³/h com uma altura manométrica fornecida pelo conjunto moto-bomba de 44,85 m, resultando em uma intensidade efetiva sobre a superfície em 108,5 mm/h.

O custo total dos principais componentes do sistema resultou em R\$ 13.033,00, sendo que 69% do custo oriunda do reservatório e conjunto moto-bomba. Sugere-se que seja dada continuidade com esse trabalho através da implementação do projeto proposto, e comparação entre resultados teóricos obtidos com medidos durante simulações, com objetivo de avaliar a validade das equações e considerações propostas para esse caso específico. Também sugere-se estudar o comportamento do pavimento permeável frente a chuvas de longa duração, onde seu fator crítico seria o volume de armazenamento, adaptando o arranjo desse trabalho para essa finalidade. Além disso poderia ser estudado a influência de diferentes tamanhos de gotas dos aspersores nos resultados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Programa Soluções para Cidades. Projeto Técnico: reservatórios de detenção.** Disponível em http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/09/AF_Reservatorios%20Deten_web.pdf. Acesso em 17 dezembro 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626: Instalação predial de água fria.** 1998
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15282: Sistemas móveis de irrigação – Tubos de PVC rígido com junta engate rápido PN 80.** 2005
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos.** 2015
- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle de escoamento superficial na fonte.** 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/5843>>. Acesso em 30 maio 2016
- Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas: guia do profissional em treinamento: nível 2 e 3 /** Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte: ReCESA, 2007. 52 p. Disponível em <<http://nucase.desa.ufmg.br/wp-content/uploads/2013/08/APU-TCCU.2-e-3.pdf>>. Acesso em 30 maio 2016
- ALESSI, F et al. **Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso.** Da Vinci. Curitiba 3.1 (2006): 139-156. Disponível em: <http://www.up.edu.br/davinci/3/310_comparacao_do_escoamento_superficial.pdf>. Acesso em 22 Outubro 2016
- ARAÚJO, P.R. **Análise experimental da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 1999.
- ARAÚJO, P. R. et al. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial.** 2000. Disponível em: <<http://www.rhama.net/download/artigos/artigo10.pdf>>. Acesso em 30 maio 2016
- ASCE. **Stormwater Detention Outlet Control Structures.** Task Committee on the Design of Outlet Structures. American Society of Civil Engineers, New York. 1985
- ASPERBRAS TUBOS E CONEXÕES. [http://www.asperbrastuboseconexoes.com.br/produto/TUBO-IRRIGACAO-SISTEMA-MOVEL---ENGATE-ROSCA-\(ER\)/95/](http://www.asperbrastuboseconexoes.com.br/produto/TUBO-IRRIGACAO-SISTEMA-MOVEL---ENGATE-ROSCA-(ER)/95/). 2016

BAPTISTA, M. B. et al. **Hidráulica Aplicada**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 621 p.(Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 8)

BAPTISTA, M. et al. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BISCARO, G.A. **Sistemas de Irrigação por Aspersão**. Editora UFGD Dourado-MS, 2009. Disponível em: <http://200.129.209.183/arquivos/arquivos/78/EDITORIA/catalogo/sistemas-de-irrigacao-por-aspersao.pdf>>. Acesso em 22 Outubro 2016

CANHOLI, P.A **Drenagem urbana e controle de enchentes**.1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2005

CANHOLI, P.A.**Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 142 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/55975>>. Acesso em: 30 maio 2016

CASTRO, N. M. dos R. **Apostila de Irrigação**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005

DESBORDES, M. **Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain**; Montpellier: Académie de Montpellier. 242 p. Thèse 1987.

ELTZ, F. L. F. et al. **Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva**. Revista Brasileira de Ciência do Solo 25.2 (2001): 485-493. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v25n2/24.pdf>>. Acesso em 19 Outubro 2016

EPA. **Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement**. Office of Water, Washington, D.C. 1999

GIANNI. http://gianni-rs.com.br/aspersor_setorial.html. 2016

GLOBO RURAL. <http://revistagloborural.globo.com/Revista/GloboRural/>. 2016

GOLDENFUM, J. A. et al. **Chuvas intensas em Porto Alegre determinação de curvas i-d-f**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidraulicas da UFRGS, 1990. 26 f.

IBGE. **Perfil dos municípios brasileiros-2013**. 2014. 282p. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Perfil_Municipios/2013/munic2013.pdf>. Acesso em 30 maio de 2016

JABUR, A. S. et al. **Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 2015. P. 937-945.

LEROY MERLIN. www.leroymerlin.com.br. 2016

MAKINO AGRICOLA E IRRIGAÇÃO. 2016. <https://makino.com.br/irrigacao-aspersores>

MANTOVANI, E. C. **AVALIA: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada**. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MARTÍNEZ-MENA M. et al. 2001. **Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta**. Cuaternario y Geomorfología 15: 31–43. Disponível em: <[http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol15/Cuaternario15\(1-2\)_04.pdf](http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol15/Cuaternario15(1-2)_04.pdf)>. Acesso em 19 Outubro 2016

MELLO, G.X. **Relatório Final de Estágio Supervisionado**. 2014

MONTEBELLER, Claudinei A. et al. **Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 1-5, Apr. 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662001000100001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 19 outubro 2016.

NETTO, J.M.A. et al. **Manual de Hidráulica. 8.ed atual**. (3. Reimpr) São Paulo: Edgard Blücher, 1998 (reimpr. 2003).

NEVES, M. et al. **Propostas de melhorias nos reservatórios para controle de cheias urbanas**. 2005. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/mgn/PropostasDeMelhoriasNosReservatóriosParaControleDeCheiasUrbanas.pdf>>. Acesso em 17 dezembro 2016

PANORAMIO. <http://www.panoramio.com/photo/24265468>. 2016

PARKINSON, J. et al. **Drenagem Urbana Sustentável no Brasil**. Relatório do Workshop em Goiania 2003. Departmente for Internacional Develpment (DFID). Water Engineering and Develpment Centre (WEDC). Loughborough University, Reino Unido. Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás – GO. Disponível em: <www.semrah.se.gov.br/modules/wfdwnloads/visit.php?cid=1&lid=185>. Acesso em 30 maio 2016

PELLIZZARI, V. **Avaliação da eficácia na restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos**. 2013. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96305/000915023.pdf?sequence=1>>. Acesso em 30 maio 2016

PEREIRA, M.C.S. **Relação de eficiência e custos dos reservatórios de retenção e pavimento permeável na bacia hidrográfica do rio Pirajuçara**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-16112015-152507/en.php>>. Acesso em 30 maio 2016

RAIMBAULT, G. et al. **Infiltration des eaux pluviales à travers les surfaces urbaines – Des revêtements imperméables aux structures-réservoirs** In: Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 2002 pp 39-50

ReCESA - Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas – Guia do profissional em treinamento: nível 2 e 3**. 2005. Disponível em: <<http://nucase.desa.ufmg.br/wp-content/uploads/2013/08/APU-TCCU.2-e-3.pdf>>. Acesso em 30 maio 2016

RIGHETTO, A. M. et al.. **Manejo de águas pluviais urbanas**. In: RIGHETTO, A. M. (Coord.). Manejo de águas pluviais urbanas. 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_4.pdf>. Acesso em 30 maio 2016

SILVA ,D.G. et al. **Irrigação por Aspersão**- Niterói: Programa Rio Rural, 2012. Disponível em: <http://www.microbacias.rj.gov.br/conteudo/compartilhados/pesquisa_participativa_apoio_tecnico/33%20-%20Irrigação%20por%20Aspersão.pdf>. Acesso em 22 Outubro 2016

SILVEIRA, A. L. L. (1996), **Contribution à l'étude hydrologique d'un bassin semi-urbanisé dans le Brésil subtropical, bassin de l'Arroio Dilúvio à Porto Alegre**. Thèse, 240 p., Académie de Montpellier, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc. Disponível em: <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-12/010025086.pdf>. Acesso em 30 maio 2016

SILVEIRA, A.L.L. **Drenagem Urbana – Aspectos de Gestão**. 2002. Disponível em: <<ftp://ftp.cefetes.br/cursos/transportes/Zorzal/Drenagem%20Urbana/Apostila%20de%20drenagem%20urbana%20do%20prof%20Silveira.pdf>>. Acesso em 30 maio 2016

SPXFLOW. www.spxflow.com/en/johnson-pump/pd-mp-centrifugal-pump-combinorm. 2016

TIGRE. **Catalogo técnico Tigre**. Disponível em: <http://www.cfg.com.br/up_catalogos/catalogo_predial_aguafria.pdf> Acesso em 25 outubro

TIGRE. www.tigre.com.br. 2016

THEBE BOMBAS HIDRÁULICAS. www.thebe.com.br/produtos/detalhes/-mono-estagio/rl-20b-r-rl-20b-f. 2016

TUCCI, C.E.M., COLLISHONN, W. **Drenagem urbana e controle de erosão**. In: Tucci, C.E.M. e Marques, D.M.L.M. Avaliação e controle da drenagem urbana – Porto Alegre: Ed. Universidade, pp. 119 – 127. 2000. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/arroiodiluvio/abacia-hidrografica/artigos/SED.PDF>>. Acesso em 30 maio 2016

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. 1 ed. Porto Alegre: ABRH; RHAMA, 2007.

URBONAS, B. e STAHRÉ, P. **Stormwater Best Management Practices and Detention**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1993. 450p.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-122549/en.php>>. Acesso em 30 maio 2016