

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PLANO DE INFILTRAÇÃO  
CONSTRUÍDO EM ESCALA REAL**

**NATÁLIA TECEDOR**

São Carlos

2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PLANO DE INFILTRAÇÃO  
CONSTRUÍDO EM ESCALA REAL**

**NATÁLIA TECEDOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Ademir Paceli Barbassa

São Carlos

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

T255mm Tecedor, Natália.  
Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de  
infiltração construído em escala real / Natália Tecedor. --  
São Carlos : UFSCar, 2014.  
92 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São  
Carlos, 2014.

1. Drenagem urbana. 2. Técnicas compensatórias. 3.  
Plano de infiltração. I. Título.

CDD: 628.21 (20ª)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

NATÁLIA TECEDOR

Dissertação defendida e aprovada em 10/06/2014  
pela Comissão Julgadora

---

Prof. Dr. Ademir Paceli Barbassa  
Orientador (PPGEU/UFSCar)

---

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi  
(PPGEU/UFSCar)

---

Prof.ª Dr.ª Priscilla Macedo Moura  
(UFMG)

---

Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva  
Coordenador do CPG-EU

*A toda minha família, especialmente aos meus pais e minha irmã, presentes em todos os momentos.*

*A todos que de maneira direta ou indireta incentivam os estudos e pesquisas essencialmente na área de drenagem urbana.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, oportunidades e por sua divina providência.

Aos meus amados pais, Sandra e José, por todo o amor, carinho, confiança, compreensão, apoio e dedicação e por não medirem esforços para me ajudarem em todas minhas conquistas.

A minha irmã Carolina por seu amor e doçura que me faz ser cada dia melhor.

A meu namorado e amigo, Caio, por toda ajuda, paciência e sabedoria.

A toda minha família, a qual sem ela não seria nada.

A meu orientador, Ademir, por todo conhecimento adquirido, paciência e dedicação para a realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do grupo G-Hidro: Rodrigo, Luciana, Bernardo, Luana, Mayara, Daniel, Sidnei, Thays, Tássia, Alexandre, Tiago e Fátima por toda ajuda e discussões que muito contribuíram para minha formação.

A Marina, Mayara, Luana e Beatriz pela amizade e ajuda sempre que preciso.

A todos os professores e funcionários do PPGEU por todo empenho em suas aulas e colaboração.

Aos técnicos de laboratório Marcos, Sidney, Bill e Jorge pelos ensinamentos e empréstimos de equipamentos.

Aos prestadores de serviço da UFSCar pela construção do plano de infiltração.

A CAPES e ao CNPQ pelas bolsas de estudo.

A Universidade Federal de São Carlos por todo o conhecimento proporcionado.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Alteração no escoamento superficial. Fonte: Schueler (1987). .....	17
Figura 2 - Tipo de Técnicas Compensatórias e estruturas pertencentes a cada grupo. Fonte: Angelini Sobrinha (2012). .....	21
Figura 3 - Trincheira de Infiltração vista em corte. Fonte: Lucas (2011). .....	30
Figura 4 - Vala e Trincheira de Infiltração construídos no campus da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Fonte: Gutierrez (2011). .....	30
Figura 5 - Vala de Infiltração. Fonte: Certu (1998) apud Brito (2006). .....	35
Figura 6 - Esquema de um Poço de Infiltração. Fonte: Reis, Oliveira & Sales (2005). .....	36
Figura 7 - Poço de Infiltração construído em uma área de recreação em Lyon, França. Fonte: Baptista et al. (2011). .....	38
Figura 8 - Plano de Infiltração. Fonte: Yazaki (2004) apud Kobayashi et al. (2008). .....	39
Figura 9 - Microbacia experimental (a) e edifício da Fisioterapia cujo escoamento pluvial será manejado com a área da técnica compensatória (b). Fonte: Grupo G-Hidro. ....	43
Figura 10 – Equipamentos usados no ensaio de Duplo Anel .....	45
Figura 11 - Plano de infiltração em planta. ....	47
Figura 12 - Instalação do sensor de nível em um tubo de PVC perfurado no interior do plano de infiltração. Fonte: Angelini Sobrinha (2012) .....	49
Figura 13 - Localização do tubo de PVC com o sensor de nível no interior do plano de infiltração ...	49
Figura 14 – Instalação de vertedor 120° em laboratório. ....	50
Figura 15 – Sensor de nível OTT modelo Orpheus Mini e recipiente para calibração do sensor em laboratório. ....	50
Figura 16 – Realização de ensaio de campo com chuva simulada .....	52
Figura 17 - Caixa de água de 5000L usada no ensaio de campo .....	52
Figura 18 - Canaleta receptora de água do caminhão pipa. ....	53
Figura 19 - Vertedor triangular de parede fina de 120° instalado na caixa de alvenaria .....	54
Figura 20 - Desenho vertedor triangular de parede fina com ângulo de 120°. ....	55
Figura 21– Sensor de nível e réguas para leitura do nível de água .....	55
Figura 22– Curva da taxa de infiltração do solo considerando o K variável. ....	56
Figura 23 – Curva envelope resultante do dimensionamento do plano de infiltração com período de retorno de 10 anos. ....	59
Figura 24 - Plano de Infiltração em planta (a), corte BB do canal em brita (b) e o corte AA do plano de infiltração (c) .....	60
Figura 25 - Área do Plano de Infiltração (1). Locação da Obra (2). Subsolação da área (3). Plantio de grama (4). Fonte: Grupo G-Hidro. ....	61

Figura 26 - Curvas de infiltração obtidas por meio dos ensaios de Duplo Anel realizadas no plano de infiltração. ....	63
Figura 27 - Localização dos ensaios de duplo anel realizados no plano de infiltração. Fonte: G-Hidro. ....	63
Figura 28 - Plano de Infiltração vazio (1) em funcionamento (2). Fonte: Grupo G-Hidro. ....	64
Figura 29 - Medidas da primeira calibração do vertedor em laboratório com Cd igual a 0,72 (27/05/2013). ....	64
Figura 3031 - Medidas da segunda calibração do vertedor em laboratório com Cd igual a 0,72 (11/06/2013). ....	65
Figura 32 – Resultado da calibração do sensor de nível através de medidas do sensor com medidas manuais para o equipamento com número de série 268331. ....	66
Figura 33 - Resultado da calibração do sensor de nível através de medidas do sensor com medidas manuais para o equipamento com número de série 268332. ....	66
Figura 34 – Linigramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa e reservatório de água dos três ensaios realizados. ....	67
Figura 35 – Hidrogramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa (a) e no reservatório de água (b) ....	68
Figura 36 – Hidrogramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa e reservatório de água dos três ensaios realizados. ....	69
Figura 37 – Ensaio de campo 1 com caixa de água e caminhão pipa: (a) início do ESD no plano (09:31), (b) momento com máxima área molhada (09:38), (c) final da infiltração no plano (09:56) ...	70
Figura 38 - Ensaio de campo 2 com caixa de água e caminhão pipa: (a) início do ESD no plano (10:52), (b) e (c) momento com máxima área molhada (10:59), (d) final da infiltração no plano (11:16).....	71
Figura 39 - Ensaio de campo 3 com caixa de água e caminhão pipa: (a) início do ESD no plano (12:08), (b) momento com máxima área molhada (12:14), (c) final da infiltração no plano (12:36) ...	71
Figura 40 - Modelagem do evento 1 para o nível máximo de 0,18 m e precipitação de 40,5 mm. ....	77
Figura 41 - Modelagem do evento 2 para o nível máximo de 0,12 m e precipitação de 17,1 mm. ....	77
Figura 42 - Modelagem do evento 3 para o nível máximo de 0,17 m e precipitação de 28,6 mm. ....	78
Figura 43 - Modelagem do evento 4 para o nível máximo de 0,14 m e precipitação de 21,4 mm. ....	78
Figura 44 - Modelagem do evento 5 para o nível máximo de 0,12 m e precipitação de 18,3 mm. ....	79
Figura 45 - Modelagem do evento 6 para o nível máximo de 0,24 m e precipitação de 43,2 mm. ....	79
Figura 46 - Modelagem do evento 7 para o nível máximo de 0,05 m e precipitação de 7,9 mm. ....	80

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das técnicas compensatórias .....	211
Tabela 2 - Classificação do solo local para projeto .....	577
Tabela 3 - Índices Físicos e grau de compactação do solo local para projeto .....	577
Tabela 4 - Critérios de escolha da técnica compensatória .....	588
Tabela 5 - Ensaios de permeabilidade com Duplo Anel .....	62
Tabela 6 - Resultados dos três ensaios de campos realizados.....	72
Tabela 7 – Resultado do monitoramento do plano de infiltração.....	72
Tabela 8 – Eventos principais monitorados no plano de infiltração.....	74
Tabela 9 - Resultados da modelagem pelo método de PULS para os principais eventos reais.....	76

## Índice

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
3.1 Urbanização e seus impactos.....	16
3.2. Drenagem Urbana e Técnicas Compensatórias .....	18
3.2.1. <i>Técnicas Compensatórias</i> .....	19
3.3. Estrutura de Infiltração .....	25
3.3.1 <i>Trincheira de Infiltração</i> .....	29
3.3.2 <i>Vala de Infiltração</i> .....	34
3.3.3 <i>Poço de Infiltração</i> .....	35
3.3.4 <i>Plano de Infiltração</i> .....	39
3.4 Infiltração da água no solo .....	40
3.4.1 <i>Método de Puls</i> .....	40
4. MATERIAIS E MÉTODO .....	43
4.1 Local para implantação .....	43
4.2 Caracterização do Solo .....	44
4.4.1 <i>Ensaio de Granulometria</i> .....	44
4.4.2 <i>Determinação dos Índices Físicos</i> .....	44
4.4.3 <i>Ensaio de Compactação</i> .....	44
4.4.4 <i>Ensaios de Infiltração de Duplo Anel</i> .....	44
4.3 Seleção da Técnica Compensatória.....	45
4.4 Dimensionamento e Projeto .....	46
4.6 Monitoramento do Plano de Infiltração .....	47
4.6.1 <i>Medidas de Precipitação</i> .....	48
4.6.2 <i>Vazões do escoamento superficial direto predial e sobre o plano</i> .....	48
4.6.3 <i>Medida do nível de água no interior do plano</i> .....	48
4.6.4 <i>Calibração dos equipamentos em laboratório</i> .....	49
4.6.5 <i>Cálculos dos tempos de esvaziamento, tempo de retardo e tempo de pico</i> .....	50

4.7.3	<i>Verificação das medidas de vazões de ensaio na entrada do plano de infiltração</i>	53
4.7.4	<i>Verificação das medidas de lâminas de água na crista do vertedor de 120° pelo sensor de nível</i>	55
4.9	Modelagem do Plano de Infiltração	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	Caracterização do Solo	57
5.2	Escolha e concepção da técnica compensatória	58
5.3	Dimensionamento e Projeto	59
5.4	Construção do Plano	60
5.5	Recuperação da taxa de infiltração do solo	62
5.6	Funcionamento do Plano de Infiltração	63
5.7	Calibração do Vertedor de 120° em laboratório	64
5.8	Calibração dos sensores de nível OTT em laboratório	65
5.9	Ensaio de Campo com chuva Simulada	66
5.9.1	<i>Medição do nível de água</i>	66
5.9.2	<i>Verificação das vazões medidas pelo vertedor de 120°</i>	67
5.9.3	<i>Área de inundação do ensaio de campo</i>	69
6.0	Monitoramento e Funcionamento do Plano de Infiltração	72
6.1	Modelagem das chuvas reais pelo Método de PULS	75
6.	CONCLUSÕES	81
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	83

## RESUMO

A intensa urbanização gerada a partir do século XX e o surgimento dos grandes centros urbanos ocasionou uma considerável mudança no uso e ocupação do solo; este passou a ser muito impermeabilizado resultando um aumento do escoamento superficial. Entre os problemas decorrentes do crescimento desse escoamento podemos citar as inundações, alterações climáticas, interferência no ciclo hidrológico e balanço hídrico. Desta problemática, com o decorrer do tempo foi-se aprimorando a drenagem urbana sustentável analisando que o controle desse escoamento tem que ser feito na fonte com infiltração, percolação e armazenamento. A importância deste trabalho é de conhecer as técnicas compensatórias para que estas possam ser aplicadas no campus da UFSCar - São Carlos - SP. Objetivou-se projetar, construir, monitorar e modelar um plano de infiltração, construído em escala real, para manejo de águas pluviais do prédio com área de 3.001,3 m<sup>2</sup>. Os recursos vieram do Projeto MCT/FINEP/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação 07/2009 – MAPLU2 – Manejo de Águas Pluviais Urbanas 2. A caracterização do solo foi realizada considerando-se seus índices físicos, granulometria, permeabilidade, grau de compactação e perfil desse solo. O levantamento da infiltração da água no solo realizou-se com ensaios de duplo anel. Verificou-se se técnica compensatória plano de infiltração atendia aos seis aspectos físicos, três aspectos urbanísticos e de infraestrutura, dois aspectos sanitários e ambientais e dois aspectos socioeconômicos. O método adotado para o dimensionamento foi o da curva-envelope, utilizando um período de retorno de 10 anos. Através de equipamentos eletrônicos e de medidas das precipitações foram monitorados 32 eventos de chuvas reais. Neste período não ocorreu nenhum extravasamento do plano de infiltração representando, nesses eventos, uma eficiência de 100% na redução do volume escoado. A modelagem da técnica foi utilizando-se o método de PULS. Esse modelo entretanto foi considerado difícil de ser aplicado nesta técnica, isto devido as incertezas em relação as áreas de infiltração pela alta capacidade de infiltração inicial do solo e ao fato da água ter áreas preferenciais no plano de infiltração.

**Palavras-Chave:** Drenagem Urbana, Técnicas Compensatórias, Plano de Infiltração.

## ABSTRACT

The intense urbanization generated from twentieth century and the emergence of large urban centers brought about a considerable change in the use and occupation of land ; this became very waterproof resulting in increased runoff . Problems resulting from the growth of this flow we mention floods , climate change , interference in the hydrological cycle and water balance . This problem , with the passage of time has been improving sustainable urban drainage analyzing the control flow that has to be done at source infiltration , percolation and storage . The importance of this work is to know the compensatory techniques so that they can be applied in the UFSCAR campus - São Carlos - SP . This study aimed to design, build , monitor and model a plan of infiltration, built in real scale, for stormwater management of the building with an area of 3001.3 m<sup>2</sup> . The funds came from Project MCT / FINEP / Action Cross Environmental and Housing 07 /2009 Drainage - MAPLU2 - . Stormwater Management Urban 2 The soil characterization was performed considering their fitness levels , grain size, permeability, degree of compaction and profile this soil. The lifting of water infiltration into the soil testing was conducted with double ring . There was an technical compensatory plan infiltration met the six physical aspects , three urban and infrastructure aspects , environmental aspects and two health and two socioeconomic aspects . The method adopted for the design was the envelope -curve , using a return period of 10 years. Through electronic equipment and measurements of precipitation 32 actual rainfall events were monitored . In this period there were no leakage of the infiltration plan representing these events , an efficiency of 100 % in reducing runoff volume. The modeling technique was using the method of PULS . This model however was considered difficult to apply this technique , that due to uncertainties regarding the areas of infiltration by high initial infiltration capacity of the soil and the fact that the water has preferred areas in infiltration plan.

**Keywords:** Drainage Urbana, Compensatory techniques, Infiltration Plan.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização acelerado ocorreu de uma forma mais acentuada depois da década de 60, originando uma população urbana com infraestrutura inadequada (TUCCI, 1997). E o aumento acelerado da população em áreas urbanas acarretou em problemas de ordem social, econômica e ambiental, determinando o final do século XX com imagens de cidades sobrecarregadas por assentamentos humanos precários, poluição das águas e do ar, enchentes e inundações, desmoronamentos, crianças abandonadas, violência, epidemias (MARICATO, 2013).

Esse veemente processo de urbanização implica em grandes alterações no meio ambiente e em processos hidrológicos, tais como a redução da interceptação, do armazenamento superficial e da infiltração, em função do aumento do escoamento superficial, fazendo os sistemas de micro e macro drenagem insustentáveis (BAPTISTA *et al.*, 2011).

A partir dos anos de 1970 surgiu na Europa e América do Norte uma nova abordagem para lidar com essas alterações ambientais e hidrológicas, as chamadas tecnologias alternativas ou compensatórias. Essas buscavam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, beneficiando a qualidade de vida e a preservação ambiental. Essas tecnologias utilizam a bacia hidrográfica como objeto de estudo e buscam compensar os efeitos da urbanização através do controle do excedente de água advindo da impermeabilização do solo e impossibilitando sua rápida transferência para jusante (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Entre as técnicas compensatórias existentes estão as estruturas de infiltração. Urbonas (1993) define essas estruturas como locais onde a água infiltra no solo e pode até chegar ao lençol freático, sendo elas valas, faixas de proteção gramadas, pavimento poroso, trincheiras de percolação, e bacias de infiltração.

As estruturas de infiltração são importantes tanto no controle dos volumes escoados quanto na redução das vazões máximas. Este tipo de dispositivo tem como vantagens (SOUZA, 2002): reduz inundações; recupera a vazão de base em rios urbanos; contribui para o controle das ilhas de calor; suprimento de água para o meio urbano.

Schueler (1987) ressalta que o bom desempenho dessas técnicas depende do tipo de vegetação e da declividade da superfície que influenciarão na velocidade do escoamento.

Martin et al. (2006) realizaram uma pesquisa francesa para avaliar o desempenho das diferentes estruturas de infiltração em escala nacional. Os resultados destacaram as principais razões que justificam o uso das estruturas, estas razões estão relacionadas principalmente a prevenção das inundações, o que supera em muito os incentivos econômicos. Contudo Ellis et. al. (2010) ressalta que os principais obstáculos e barreiras à implementação dessas técnicas não são dependentes da tecnologia, mas sim estão relacionadas a questões institucionais, sociais e de governo, nenhuma das quais têm sido bem tratada até o momento. A falta de instituição capaz de divulgar e abordar o papel da participação da comunidade e ambientalismo cívica fornece uma restrição considerável à implementação das BMPs generalizada de sucesso e um ambiente urbano sustentável com planejamento de infraestrutura de drenagem.

No Brasil há estudos sobre essas técnicas, como Souza (2002) e Lucas (2011) com trincheiras de infiltração, Reis et al. (2008) e Angelini Sobrinha (2012) com poços de infiltração, entre outros. Já no exterior há várias pesquisas francesas sobre o tema com Dechesne et al. (2005), Bourgogne (2010), Chahar et. al. (2012) e também Fuamba et. al. (2010) no Canadá. Porém estruturas como planos de infiltração necessitam ainda serem experimentadas.

Um dos métodos adotados para modelar hidrológicamente essas estruturas é o método de PULS utilizado entre outro por Vieira, Silva e Nascimento (2009), Lucas (2011) e Angelini Sobrinha (2012).

Esse método é um dos mais conhecidos na simulação da propagação de cheia em reservatório e supõe uma relação entre volume armazenado e vazão de saída. O PULS utiliza a equação da continuidade em que, a partir de valores das vazões de entrada são obtidas as vazões de saída e o volume de armazenamento na estrutura para cada intervalo de tempo (TUCCI,1998).

Neste trabalho abordou-se uma técnica compensatória denominada plano de infiltração definido por Moura (2005) e Baptista et al. (2011) como áreas

rebaixadas cobertas com gramados laterais que recebem água pluvial vindas de superfícies impermeáveis, com dimensões longitudinais não muito maiores que as transversais e profundidade reduzida, para drenagem do escoamento superficial direto predial. Os recursos vieram do Projeto MCT/FINEP/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação 07/2009 – MAPLU2 – Manejo de Águas Pluviais Urbanas 2.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral desse trabalho é monitorar e modelar um plano de infiltração concebido, projetado e construído em escala real para controlar o escoamento superficial direto da área impermeabilizada predial e uma área de expansão entre o prédio e o dispositivo.

Quanto aos objetivos específicos tem-se:

- Projetar e construir um plano de infiltração;
- Monitorar vazões de entrada, nível de água na técnica, tempos de funcionamento e esvaziamento;
- Realizar modelagem hidrológica.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Urbanização e seus impactos**

O Brasil apresentou, após a década de 60, um crescimento significativo da população urbana. Esse aumento acelerado acarretou em vários problemas de ordem social, econômica e ambiental, determinando o final do século XX com imagens de cidades sobrecarregadas por assentamentos humanos precários, poluição das águas e do ar, enchentes e inundações, desmoronamentos, crianças abandonadas, violência, epidemias (MARICATO, 2013).

O aumento de lugares com enchentes e inundações ocorre devido à grande impermeabilização do solo, isto porque as vias de circulação são constituídas de asfalto, as casas não têm quase áreas permeáveis, o índice de área verde urbana é baixo, há habitações e construções em áreas de várzeas dos rios. O grande desenvolvimento urbano brasileiro também tem agravado problemas socioambientais, impulsionando a maiores frequências de inundações, produções de sedimentos e danificação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas (PHILIPPI JR. e MALHEIROS, 2005). De acordo com Souza e Romualdo (2009), a impermeabilização e canalização nas cidades aumentam as vazões máximas e a produção de sedimentos e qualidade da água chega a ter 80% da carga de esgoto doméstico.

Para Tucci e Mendes (2006) o desenvolvimento urbano modifica a cobertura vegetal resultando em muitas consequências que mudam os componentes do ciclo hidrológico natural. A urbanização acaba impermeabilizando grande parte da bacia e assim instalando condutos para o escoamento pluvial que acarreta em:

- Redução da infiltração no solo;
- O volume que antes infiltraria acaba ficando retido na superfície, provocando um aumento no escoamento superficial. E também com a construção de condutos pluviais para esse escoamento, ele acaba tornando-se mais rápido, reduzindo o seu tempo de deslocamento e aumentando as vazões máximas, antecipando seus picos no tempo, como mostra a Figura 1;

- Reduzindo a infiltração, pode haver uma diminuição no nível do lençol freático por falta de alimentação, reduzindo o escoamento subterrâneo;

- Devido à substituição da cobertura natural há uma redução da evapotranspiração, visto que a superfície urbana não retém água como a cobertura vegetal e impossibilita a evapotranspiração das folhagens e do solo.

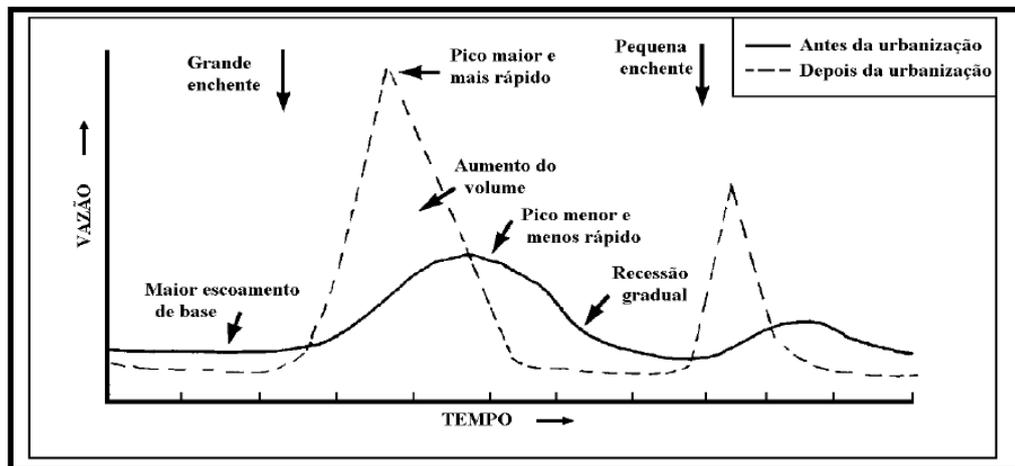


Figura 1 - Alteração no escoamento superficial. Fonte: Schueler (1987).

Jorge e Uehara (2001) explicam que o escoamento superficial é a parte da água precipitada que se conserva na superfície do terreno, sujeita a ação da gravidade que a encaminha para as cotas mais baixas. Saber sua ocorrência e seu comportamento são de muita importância para gerenciar e controlar as cheias urbanas, visto que conforme ocorre o seu deslocamento, as águas superficiais podem originar erosão nos solos e inundações em várzeas.

O escoamento superficial exibe um grave impacto nos países em desenvolvimento, em que a urbanização e obras de drenagem são executadas com metodologias inadequadas e insustentáveis e, por isso, foram sendo abandonadas pelos países desenvolvidos ao longo dos últimos trinta anos (BICHANÇA, 2006).

Canholi (2005) corrobora que a urbanização e o uso inadequado do solo originam uma redução na capacidade natural de armazenamento dos escoamentos, fazendo com que estes demandem outros locais para ocupar, o que pode acarretar com frequência inundações.

Barros (2005) explica que as inundações urbanas acontecem principalmente pelo excesso do escoamento superficial, chamada de chuva excedente ou chuva efetiva, causadas pelo aumento da impermeabilização do solo o que ocasiona em menor infiltração e retenção de água no mesmo. Quando o volume do escoamento superficial ultrapassa a capacidade de escoamento dos cursos de água que drenam as cidades geram as inundações.

Tucci e Mendes (2006) alegam que o escoamento superficial pode gerar inundações e impactos em áreas urbanas através de dois processos, que podem acontecer isolados ou combinados, sendo eles: Inundações de áreas ribeirinhas e Inundações resultantes da Urbanização. A primeira se refere a inundações naturais que acontecem no leito maior dos rios, advindas de variabilidades temporais e espaciais das precipitações e do escoamento na bacia, já a segunda são inundações que acontecem na drenagem urbana pelo efeito da impermeabilização do solo, da canalização de escoamentos ou de obstrução ao escoamento.

### **3.2. Drenagem Urbana e Técnicas Compensatórias**

No decorrer da história da humanidade sempre houve uma ligação das cidades com os cursos de água contribuindo para a sedentarização da população. Os cursos de água eram utilizados para o consumo e higiene bem como a evacuação dos dejetos e em algumas vezes tinham também um papel militar, pois favorecia a defesa da área urbana. Em compensação a estas vantagens, a proximidade com os cursos de água acarretava em problema de inundações, porém as populações consideravam que este era um 'preço a pagar' pela disponibilidade de água (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Porém foi com o surgimento do higienismo, no século XIX, priorizando a canalização e o controle dos cursos de água como forma de diminuir as doenças de veiculação hídrica, que a harmonia entre as cidades e os rios foi alterada. Com o higienismo, o aumento da população a partir do século XIX, as epidemias de cólera e tifo e o desenvolvimento da microbiologia e epidemiologia, resultaram em medidas que evacuassem rapidamente as águas pluviais.

Foi então que a partir da segunda metade do século XX intensificou-se a concentração da população em áreas urbanas, houve uma alteração no ciclo hidrológico; reduziu a interceptação, o armazenamento superficial e a infiltração; aumentou o volume de escoamento superficial.

Devido a esses impactos a carga de poluição das águas pluviais pode ser muitas vezes maiores que a carga de poluente de esgoto sanitário e com tudo isso a questão da drenagem urbana tornou-se muito complexa, envolvendo aspectos ambientais, sanitários, paisagísticos e técnicos (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Barros (2005) afirma que o sistema de drenagem tem que ser projetado para dar vazão ao excesso de chuvas e o seu dimensionamento depende da ocorrência do fenômeno natural. Este autor subdivide o sistema de drenagem em: medidas estruturais, que correspondem às obras hidráulicas essenciais para se obter uma boa drenagem do escoamento superficial; e medidas não estruturais, aquelas que correspondem a várias propostas para se minimizar os efeitos das chuvas intensas nas áreas urbanas. Canholi (2005) ressalta ainda que as medidas não estruturais podem ser eficazes a custos mais baixos e com horizontes mais amplos, procurando disciplinar a ocupação territorial, o comportamento com relação ao consumo das pessoas e atividades econômicas.

### **3.2.1. Técnicas Compensatórias**

Baptista *et al.* (2011) distinguem os sistemas de drenagem em “sistemas clássicos de drenagem” e “tecnologias alternativas” ou “compensatórias”. Para os mesmos autores os sistemas clássicos são formados por dispositivos de micro drenagem, que realizam o transporte das águas superficiais nas ruas, as sarjetas; captam essas águas quando sua capacidade de vazão é excedida, as bocas de lobo; e por fim os condutos, habitualmente enterrados, utilizados para transportar essas águas até seu lançamento ou até os sistemas de macrodrenagem. Sendo que, algumas vezes, podem ser utilizadas algumas obras complementares como bueiros, estações elevatórias de águas pluviais e dissipadores de energia.

O conceito de tecnologias alternativas ou compensatórias começou na Europa e na América do Norte como um novo conceito em drenagem urbana, estas ao contrário do conceito higienista tem uma compreensão ambiental.

Baptista *et al.* (2011) analisam que essas tecnologias utilizam a bacia hidrográfica como objeto de estudo e buscam compensar os efeitos da urbanização através do controle do excedente de água advindo da impermeabilização do solo e impedindo sua rápida transferência para jusante. Para os autores, entre as técnicas mais adotadas nesses procedimentos se destacam:

- Bacias ou reservatórios de retenção, ou também chamadas de bacias de amortecimento de cheias, que podem ser usadas em várias escalas;
- Estruturas para armazenamento temporário, efetuadas através de uma adequação topográfica em terrenos esportivos, áreas de estacionamento e em áreas livres em geral;
- Pavimentos Porosos, designado para infiltração ou armazenamento temporário da água em estacionamentos e no sistema viário;
- Estruturas que facilitam a infiltração e percolação, como as trincheiras, poços, valas, valetas;
- Canalização de cursos de água com técnicas que ajudam o escoamento lento;
- Tratamento de fundos de vale, com delimitação de áreas não construídas para armazenar temporariamente a água.

Ainda em relação aos mesmos autores, as técnicas compensatórias podem ser divididas considerando a posição de implantação do dispositivo e estas podem ser as bacias para controle centralizado, as obras lineares implantadas habitualmente junto a sistemas viários ou as obras pontuais para controle na fonte, integrada a pequenas superfícies de drenagem. As estruturas pertencentes a cada grupo são mostradas na Figura 2.



**Figura 2 - Tipo de Técnicas Compensatórias e estruturas pertencentes a cada grupo.**  
**Fonte: Angelini Sobrinha (2012).**

Entre as técnicas compensatórias há aquelas que são estruturas de infiltração, em que a saída final será o solo através da infiltração, e outras que não ocorrerão infiltração, chamadas de retenção. De acordo com Urbonas (1993), as bacias de retenção são aquelas que seguram temporariamente a água pluvial, isto porque após o fim do escoamento superficial, as águas são drenadas para fora desse dispositivo, fazendo com que essas bacias permaneçam secas até o próximo evento, por isso essas estruturas podem também ser chamadas de 'lagoa seca'. Já as bacias de infiltração podem diminuir o volume de escoamento das águas pluviais e pode conseguir até eliminar o escoamento superficial direto, além de contribuir para a remoção dos poluentes presentes nas águas pluviais.

As vantagens e desvantagens dessas técnicas são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das técnicas compensatórias**

TIPO DE TÉCNICA COMPENSATÓRIA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Valas, Valetas e Planos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo de construção e manutenção;</li> <li>- Redução das dimensões do sistema de drenagem a jusante;</li> <li>- Boa integração paisagística valorizando o espaço urbano;</li> <li>- Possibilidade de recarga do lençol freático;</li> <li>- Possibilidade de melhoria da qualidade das águas pluviais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de espaço específico para sua implantação;</li> <li>- Necessidade de manutenção periódica;</li> <li>- Restrição de eficiência em áreas de fortes declividades;</li> <li>- Possibilidade de estagnação das águas com implicações ambientais.</li> </ul>
Reservatório Individual	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilização das águas pluviais para uso doméstico e irrigação;</li> <li>- Reserva de água de abastecimento quando respeitados os critérios adequados;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalações da técnica geralmente em áreas privadas;</li> <li>- Dificuldade de manutenção;</li> <li>- Risco de poluição do lençol e colmatação da estrutura (no caso de infiltração).</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução dos picos de vazão à jusante.</li> </ul>	
Trincheiras de Infiltração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução dos picos de vazão à jusante;</li> <li>- Redução das dimensões dos sistemas de drenagem convencionais ou eliminação deste;</li> <li>- Boa integração com o fator paisagístico com possibilidade de valorização do espaço urbano;</li> <li>- Ganho ambiental, com possibilidade de recarga do lençol freático e melhoria da qualidade das águas pluviais;</li> <li>- Capacidade de retomar as características do balanço hídrico e do ciclo hidrológico mais próximo das condições naturais;</li> <li>- Possibilidade de utilização de diversos tipos de material, tais como: asfalto, concreto, grama ou cascalho;</li> <li>- Baixo custo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não podem ser utilizadas em áreas de fortes declividades devido à redução na sua eficiência;</li> <li>- Necessitam de manutenção constante e controle da colmatação;</li> <li>- Risco de poluição das águas subterrâneas.</li> </ul>
Bacias de retenção e Infiltração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controle de inundações através do amortecimento de cheias geradas no contexto urbano;</li> <li>- No caso de bacias de infiltração há a redução do escoamento superficial;</li> <li>- Redução da poluição difusa de origem pluvial;</li> <li>- Impactos sobre a qualidade de vida na região; sobre a paisagem urbana; sobre a qualidade das águas; e sobre o regime hidrológico;</li> <li>- Pode ser usada de diferentes combinações e arranjos;</li> <li>- A água armazenada pode ser usada para diversos fins, tais como: reserva para incêndios, ou irrigação de jardins em bacias pequenas.</li> <li>- Necessidade de pouco espaço, pois podem ser associados à pavimentação tradicional;</li> <li>- Reduções de 15% a 30% dos volumes escoados;</li> <li>- Impactos positivos na mitigação de problemas de inundação;</li> <li>- Redução no custo de implantação em relação ao custo de implantação do sistema tradicional;</li> <li>- Recarga das águas subterrâneas;</li> <li>- Melhoria da qualidade das águas por ação da filtração no corpo do pavimento;</li> <li>- Ganhos financeiros associados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risco de segurança dos moradores nas margens das bacias;</li> <li>- Risco de poluição do lençol no caso de bacias de infiltração;</li> <li>- Risco de proliferação de insetos e doenças de veiculação hídrica;</li> <li>- Necessita de áreas grandes.</li> <li>- O impacto sobre o lençol freático e sobre o escoamento subterrâneo devido à drenagem de águas contaminadas;</li> <li>- Entupimento dos dispositivos devido à falta de controle na construção e manutenção do sistema, tornando-o ineficiente;</li> <li>- A fragilidade dos revestimentos asfálticos permeáveis em áreas sujeitas a esforços de cisalhamento significativos;</li> <li>- Colmatação devido a finos.</li> </ul>
Bacias de retenção e infiltração		

	<p>à redução das dimensões do sistema de drenagem a jusante;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ganhos em termos de circulação viária, com melhoria e conforto devido à redução de poças de água e melhoria da aderência;</li> <li>- Redução da aquaplanagem, além da redução de ruídos.</li> </ul>	
<p>Telhados Armazenadores</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa integração no meio urbano;</li> <li>- Redução da vazão escoada a jusante;</li> <li>- Diminuição do risco de inundação, com a redução dos picos de vazões escoadas;</li> <li>- Não necessita muitos investimentos;</li> <li>- Ganho financeiro, com a redução das dimensões das tubulações a jusante;</li> <li>- Não há diferenças nas técnicas de construção em relação aos telhados convencionais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de uma manutenção regular;</li> <li>- Dificuldade da utilização em telhados com declividades elevadas;</li> <li>- Necessidade de precauções adicionais em relação à estanqueidade;</li> <li>- Necessidade de cuidados como cálculos de estabilidade para a utilização sobre telhados existentes.</li> </ul>

**Fonte: Adaptado de Urbonas & Stahre, (1993); Araújo, Tucci & Goldenfum, (2000); Baptista *et al.*, (2011); Matos, (2000) por Angelini Sobrinha (2012).**

Bourgogne (2010) cita como um exemplo na implantação dessas técnicas compensatórias a Comunidade Urbana de Bordeaux, na França, que por mais de 25 anos, impôs soluções de técnicas alternativas ou compensatórias de águas pluviais nas operações urbanísticas executadas em seu território. Esta política permitiu a conquista até hoje de mais de 10.000 instalações.

Isto porque, historicamente, o Bordeaux sofreu grandes inundações durante a chuva, no entanto nos anos 1980 foi criada uma mobilização excepcional de todos os municípios da região metropolitana. Em 1982, duas tempestades consecutivas de intensidade muito alta, seguida por inundações extremamente prejudiciais, trouxe a Comunidade Urbana de Bordeaux a implementar um programa de prioridade muito importante de luta contra as inundações, com dois princípios orientadores: a implementação de grandes instalações estruturais adaptadas à urbanização e implementação de tecnologias alternativas ou compensatórias de águas pluviais para o desenvolvimento da urbanização sobre áreas naturais, sem aumentar o escoamento.

O primeiro princípio, as instalações estruturais, levou, a Comunidade Urbana de Bordeaux, a ter uma herança excepcional: 82 reservatórios para armazenar mais de 2.545.000 m<sup>3</sup> de água pluvial, 61 estações de bombeamento com um fluxo total de 480.000 m<sup>3</sup>/h, mais de 2.000 km de bueiros, sendo o maior de 4,5 m de diâmetro. E este programa estrutural continua nos dias atuais, porém com uma forma mais distribuída ao longo do tempo de planejamento.

A primeira estrutura de controle instalada foi reconhecida como eficiente quando as exigências para construção e o volume de armazenamento foram alcançados. Posteriormente, em 1985, as primeiras experiências com revestimento poroso trouxeram uma nova geração de soluções compensatórias: revestimento poroso deu origem a inúmeras aplicações com trincheiras e valas de infiltração. O dimensionamento adotado para a construção das estruturas era derivado da Instrução Técnica 1977 Região II- 10 anos e os coeficientes adotados eram: 0,2 para superfícies não impermeabilizadas e 0,9 para as superfícies impermeabilizadas.

Com isso, após 25 anos de operação, as soluções compensatórias tem provado sua eficácia ao cumprir a missão para a qual foram implementadas, ou seja, evitar inundações prejudiciais a jusante.

O estudo desses sistemas também foi desenvolvido por alguns autores essencialmente na Europa e América do Norte. Entre eles tem-se: Butler & Davies (2000), Daywater (2003), Dechesne (2002), STU (1991) e STU & Agences de l'Eau (1994) na Europa; nos Estados Unidos, Urbonas & Stahre (1993), USEPA (1999), Freni *et. al.* (2010) e Gonzalez *et. al.* (2010).

No Brasil o estudo de técnicas compensatórias teve início fundamentalmente no início dos anos de 1990. Souza e Goldenfum (1999) instalaram um módulo experimental composto por um trincheira de infiltração no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS e comprovaram a eficiência desse módulo no controle do escoamento superficial, visto que não houve escoamento remanescente, ou seja, a área drenada pela trincheira não contribui para as cheias urbanas.

Souza (2002) fez um estudo experimental no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde foram implantadas duas trincheiras de

infiltração. As trincheiras conseguiram controlar todo o volume escoado até mesmo para eventos com períodos de retorno superiores a 10 anos, valor este utilizado no projeto.

Lucas (2011) construiu em escala real uma trincheira de infiltração no campus da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar e verificou que o dispositivo retinha todo o volume escoado gerado por uma área impermeabilizada em eventos de período de retorno de até 48 anos.

Angelini Sobrinha (2012) avaliou um poço de infiltração construído em escala real no campus da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar em relação à redução do volume escoado por um prédio da universidade. A autora constatou que no período de análise do estudo não houve extravasamento do poço.

Rezende *et al.* (2013) realizaram um estudo sobre algumas medidas de intervenção para o controle de inundações na bacia dos rios Pilar-Calombé em Duque de Caxias – RJ. A primeira opção era a canalização do rio e a segunda denominada pelos autores como “solução sustentável”, sendo ela: limpeza, desassoreamento e implantação de seção trapezoidal em solo natural; implantação de reservatórios em praças urbanas; reabilitação de áreas de várzeas e implantação de Parque Fluvial inundável ao longo da margem direita do rio Pilar e alguns trechos do rio Calombé; recomposição da cobertura vegetal em áreas de encostas e topos de morro. O resultado conseguido no combate as inundações com a “solução sustentável” foi melhor em relação à solução de canalização, porém os autores afirmam que o controle exercido sobre o processo de urbanização colocando limites para o percentual de impermeabilização nos lotes obteve resultados ainda melhores na redução de futuros problemas de inundações gerados pelo crescimento urbano.

### **3.3. Estrutura de Infiltração**

Urbanas (1993) define estruturas de infiltração como locais onde a água infiltra no solo e pode até chegar ao lençol freático, sendo elas valas, faixas de proteção gramadas, pavimento permeável, trincheiras de percolação, e bacias de infiltração.

As estruturas de infiltração são importantes tanto no controle dos volumes escoados quanto na redução das vazões máximas. Este tipo de dispositivo tem as seguintes vantagens (SOUZA, 2002):

- reduz inundações;
- recupera a vazão de base em rios urbanos;
- contribui para o controle das ilhas de calor;
- suprimento de água para o meio urbano.

Martin *et al.* (2006) realizaram uma pesquisa francesa para avaliar o desempenho das diferentes estruturas de infiltração em escala nacional. Os resultados destacaram as principais razões que justificam o uso das estruturas, estas razões estão relacionadas principalmente a prevenção das inundações, o que supera em muito os incentivos econômicos.

Como desvantagem Souza (2002) menciona a necessidade frequente de manutenção, isto devido à colmatação reduzir a eficiência do sistema e poder haver risco de contaminação do solo e do lençol freático. Martin *et al.* (2006), com uma pesquisa realizada na França, concluíram que os aspectos de operação e manutenção são muitas vezes visto como obstáculo para a aplicação dessas técnicas.

Porém com a realização de manutenção nos sistemas, estes podem ser eficientes por muito tempo. Dechesne *et al.* (2005) estudaram a avaliação, a longo prazo, a colmatação de quatro bacias de infiltração em Lyon, na França. Estas estruturas tinham de 10 a 21 anos e ainda apresentavam boa capacidade de infiltração.

Já Ellis *et al.* (2010) ressaltam que os principais obstáculos e barreiras à implementação das BMP (Best Management Practices) e técnicas compensatórias não são dependentes da tecnologia, mas sim estão relacionadas a questões institucionais, sociais e de governo, nenhuma das quais têm sido bem tratadas até o momento, dada a ênfase em questões de tecnologia e de planejamento no setor de água que são frequentemente impulsionadas por metas legais e de mercado. No entanto, o autor menciona que muitos estudos sugerem que as barreiras de aquisição institucionais compreendem o mais integrado e difícil quanto a reforma, e a questão do governo institucional é talvez o problema mais intratável de todos. A falta de

instituição capaz de divulgar e abordar o papel da participação da comunidade e ambientalismo cívica fornece uma restrição considerável à implementação das BMPs generalizada de sucesso e um ambiente urbano sustentável com planejamento de infraestrutura de drenagem.

Carvalho (2008) ressalta que as estruturas de infiltração com grande profundidade devem ser evitadas, pois podem gerar grandes gradientes hidráulicos, aumentando o risco de erosão interna. A autora ainda comenta que instalação de estruturas de infiltração próximas a edificações pode aumentar a zona de saturação do solo e gerar um colapso do solo, prejudicando estruturas vizinhas e modificando as resistências de fustes, bases, contenções laterais ou outras estruturas do subsolo, comprometendo suas funções e estabilidade.

Um aspecto relevante nessas estruturas é a cobertura vegetal. Bruno *et al.* (2013) comparou a eficiência de cinco tipos diferentes de superfícies na redução do escoamento superficial, sendo essas superfícies: solo gramado, solo exposto, blocos de concreto vazados, blocos de concreto maciço e concreto convencional. Dessas alternativas avaliadas, a superfície gramada foi a que apresentou resultados mais satisfatórios; para essa aplicação, não houve geração do escoamento superficial nas simulações de chuvas com intensidade de precipitação de 79 mm/h e para a intensidade de 121 mm/h o coeficiente de escoamento foi de apenas 0,15, mostrando o potencial das superfícies cobertas com vegetação na redução do escoamento superficial. Entretanto, para a parcela com solo exposto nas chuvas simuladas com intensidade de 121 mm/h, o coeficiente de escoamento foi de 0,62, correspondendo um aumento de 4,1 vezes em relação à geração do escoamento superficial observado na superfície gramada, com a mesma intensidade.

Na França esses tipos tem estruturas tem sido muito utilizadas, isto devido ao aumento das cidades e da população o sistema pluvial tradicional frances tornou-se ineficiente e antieconômico. Com isso as autoridades começaram a procurar outras melhores práticas de gestão que são mais eficientes e mais adaptáveis as áreas de drenagem lineares. Assim, as autoridades locais de Lyon adotaram práticas alternativas de gestão tais como bacias de retenção e infiltração. Atualmente 100 desses dispositivos existem

na área da cidade, que estão a gerir  $10^6$  m<sup>3</sup> de águas pluviais (CHAHAR *et. al.*, 2012).

Com relação aos custos de implantação dessas estruturas, Holz e Tassi (2007) realizaram um estudo no Loteamento Monte Bello, localizado no município de Flores da Cunha – RS, em que foram analisadas a utilização de estruturas de infiltração juntamente com o sistema de drenagem convencional. Com esse projeto houve uma economia de mais de R\$100.000,00, sem considerar a maior proteção à população, viabilizando essas construções tanto tecnicamente como também economicamente.

Fuamba *et. al.* (2010) descreve uma metodologia a ser utilizada quando se pretende implementar BMPs em um setor urbano. Esta metodologia foi testada em um estudo de caso de um setor de desenvolvimento residencial no município de Quebec, Canadá. Essa análise visa dois critérios: a análise de desempenho que possibilita um ganho hidrológico de cada BMP a ser determinado em comparação com práticas tradicionais e a análise econômica, mostrando que o estabelecimento de algumas BMP em Quebec, com base em alguns objetivos de gestão de águas pluviais sustentável é ao mesmo tempo possível e vantajoso.

A metodologia desenvolvida pelos autores é descrita em um procedimento de nove passos. A cada passo, objetivos claros são definidos, bem como os meios para a sua realização e sugestões úteis. Os passos são: explorar o local analisado, limitar metas específicas para os critérios de controle de águas pluviais definidas para melhor gestão dessas águas, identificar a BMP potencial para ser implementada no local, determinar o custo dessas BMP e seu investimento, determinar orçamentos futuros ou o melhor funcionamento de cada BMP, identificar todas as fontes de financiamento para apoiar a implementação BMP, fazer a melhor escolha de BMP a partir de todas as opções possíveis, medir o desempenho hidrológico e hidráulico de cada técnica e arquivar todos os resultados obtidos.

O estudo demonstra que as BMPs selecionadas estão conseguindo reduzir o volume do escoamento de águas pluviais e as taxas de poluentes da água. A breve análise econômica feita para informação mostra que a

implementação da potencial BMP é viável e benéfica. No entanto, os autores destacam que uma análise técnica aprofundada ainda é necessária para identificar a melhor BMP para melhorar as condições de drenagem urbana.

### **3.3.1 Trincheira de Infiltração**

Conforme Baptista *et al.*(2011) as trincheiras são técnicas compensatórias lineares implantadas junto à superfície ou com pequena profundidade. Estas possuem pequena largura e profundidade, porém com dimensões longitudinais mais significativas. Podem ser usadas em canteiros centrais e passeios, ao longo do sistema viário, em jardins, áreas verdes ou terrenos esportivos.

Segundo Lucas (2011), as trincheiras são estruturas de infiltração que tem como finalidade receber a água de escoamento superficial e armazená-la provisoriamente, facilitando a infiltração desta no solo, fazendo com que diminua as vazões e os volumes de escoamento para a drenagem convencional e contribuindo também para a melhoria da qualidade da água pluvial. Graciosa e Mendiondo (2007) analisam que com essas funções, esse dispositivo contribui para o conceito de “impacto hidrológico zero”.

Trincheiras de infiltração são valetas com material granular (brita, pedra de mão) com porosidade de aproximadamente 40%. O material granular é preenchido com geotêxtil que tem uma função estrutural e também impede a passagem de finos pelo sistema evitando sua colmatação (SOUZA e GOLDENFUM, 1999). A Figura 3 apresenta uma trincheira de infiltração vista em corte e a Figura 4 mostra a aplicação de uma trincheira construída em um ambiente urbano.

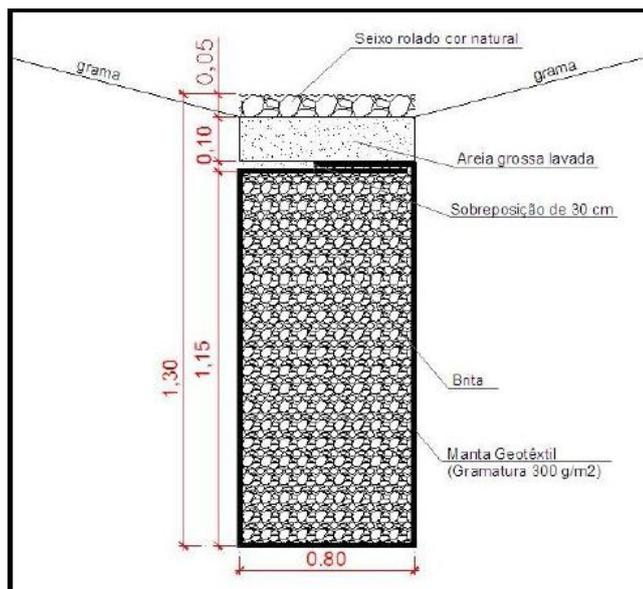


Figura 3 - Trincheira de Infiltração vista em corte. Fonte: Lucas (2011).



Figura 4 - Vala e Trincheira de Infiltração construídos no campus da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Fonte: Gutierrez (2011).

Gutierrez et al. (2009) ressalta ainda que as trincheiras de infiltração, bem como algumas outras técnicas compensatórias, possuem restrições nas suas utilizações, como por exemplo as características físicas do solo e as dimensões estruturais. Dependendo das características físicas do solo, este apresenta baixo valor do coeficiente de permeabilidade, restringindo ou inviabilizando o emprego dos dispositivos de infiltração, podendo estas funcionar como trincheiras de detenção e grandes dimensões também podem inviabilizar a utilização das trincheiras, isto pela falta de áreas disponíveis.

Souza e Goldenfum (1999) instalaram no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS uma trincheira de infiltração, com período de retorno de 5 anos, que foi monitorada por linígrafos que registraram a vazão de entrada e o nível de água na estrutura. Foram observados três eventos, sendo que dois destes resultaram em um armazenamento de água, não havendo extravasamento da trincheira. Os autores ainda ressaltam que para precipitações mais intensas, este dispositivo pode ser usado como infiltração parcial.

Graciosa e Mendiondo (2007) desenvolveram um estudo sobre trincheiras na cidade de São Carlos. A metodologia aplicada para o dimensionamento fundamenta-se no balanço hídrico no interior da estrutura, em que o volume de entrada é calculado utilizando a curva idf (índice – duração – frequência), a chuva de projeto e a área de contribuição de chuva para a mesma, já o volume de saída é calculado com relação à taxa de infiltração do solo.

Com relação ao dimensionamento, os autores determinaram as dimensões da trincheira levando-se em consideração a vazão de projeto e vazão infiltrada. A vazão de projeto foi calculada com base na área de contribuição do escoamento superficial para a estrutura e na chuva de projeto; a vazão infiltrada foi calculada com base no modelo de infiltração unidimensional de Philip e nas propriedades físicas do solo. O período de retorno adotado foi de 5 anos. A metodologia e o dimensionamento utilizado foram considerados adequados, visto que a estrutura estava sendo monitorada a quase dois anos e não havia sido registrado extravasamento do sistema.

Para se calcular a vazão de infiltração no solo, Graciosa, Mendiondo e Chaudhry (2008<sub>a</sub>) realizaram um estudo comparativo entre o modelo unidimensional de Philip e o modelo bidimensional de Richards. O modelo de Richards calcula o volume de infiltração e também descreve o movimento da água no solo, considerando suas condições iniciais de umidade. Já o modelo de infiltração horizontal de Philip mostrou-se adequado para cálculos aproximados de pré-dimensionamento, em situações em que não se tem dados precisos sobre as características físicas do solo, essenciais à aplicação do modelo de Richards. O estudo realizado pelos autores demonstrou que para o dimensionamento de trincheiras de infiltração, baseada no cálculo do volume

de armazenamento da trincheira a partir do cálculo do volume infiltrado, os modelos apresentaram valores semelhantes para os volumes infiltrados.

Graciosa, Mendiondo e Chaudhry (2008b) analisaram resultados de uma simulação realizada em trincheira de infiltração e revelaram que mesmo com a pior hipótese considerada, isto é, a condição de saturação do solo, as trincheiras podem infiltrar até 40% da chuva de projeto. Esta simulação consistiu em considerar uma condição crítica de operação da trincheira, referindo a todos os pontos do domínio umidade inicial de saturação.

Lucas (2011) construiu um sistema Filtro-Vala-Trincheira (FVT), em escala real, na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O monitoramento do sistema foi feito segundo medidas de precipitação, vazões afluentes e o nível de água no interior da estrutura. Para a modelagem do sistema foram utilizados os métodos de PULS e modelo SWMM, sendo que o método de PULS foi o que melhor apresentou resultados satisfatórios de modelagem. O autor monitorou 60 eventos de chuva, em que ocorreu armazenamento de água no sistema FVT em 29 casos, não ocorrendo extravasamento no sistema. O trabalho demonstrou que as estruturas de infiltração são alternativas potenciais para a drenagem das águas pluviais, bem como o controle do escoamento superficial na fonte.

Chahar *et. al.* (2012) construíram em escala real uma trincheira de infiltração em Lyon, na França, tendo uma área de contribuição de cerca de 2,2 hectares. Antes de chegar na trincheira de infiltração, a água da chuva era armazenada em uma bacia de detenção, com 60 m<sup>3</sup>, coberta com uma geomembrana impermeável. Os níveis de água na trincheira foram medidos com sensores de pressão submerso. O dispositivo possui forma trapezoidal com profundidade de 1,0 m, largura de 0,8 m, inclinações laterais de 0,45 (1 Vertical: 0,45 horizontal) e comprimento de 12 m. Com os dados observados, a profundidade da água variou entre 0,62m e 0,75m e o tempo de esvaziamento de 60 a 150 minutos. O autor concluiu que a trincheira é uma boa técnica para controlar a quantidade das águas pluviais urbanas.

Chahar *et. al.* (2012) ressaltam ainda que as trincheiras de infiltração também podem ter problemas de colmatção devido a deposição das partículas de areia fina no solo. Para minimizar isso, o escoamento deve ser

passado por filtros de sedimentos ou bacias de detenção antes da entrada para a trincheira de infiltração.

Vieira, Silva e Nascimento (2009) também utilizaram como modelo de propagação o método de PULS em um experimento instalado no campus da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Esse experimento analisou duas técnicas alternativas de drenagem urbana, uma trincheira de infiltração e uma vala de detenção. Pretendendo determinar a eficiência do método de PULS para o dimensionamento das estruturas foi feita uma análise estatística para comparar os dados projetados com os observados. Com os resultados dessa análise constatou-se que o método de PULS se enquadrou melhor para a vala de retenção do que para a trincheira de infiltração, levando-se em conta somente a infiltração nas laterais. Isto porque, a trincheira contém maior quantidade de premissas e incógnitas de previsões difíceis como à taxa de umidade do solo e também o processo de colmatação.

Silva (2007) realizou um estudo no campus da Universidade de Brasília – UnB, em que comparou a instalação de trincheiras de infiltração com preenchimento tradicional de areia e brita com trincheiras com preenchimento de garrafa PET. A autora analisa que o uso de PET no preenchimento de trincheiras de infiltração abrange aspectos ambientais, ao dar uma destinação as garrafas; sociais, ao valorizar o trabalho de catadores e técnico, possibilitando maior capacidade de acumulação nas trincheiras e menor sobrecarga no solo suporte. Considerando o custo, o uso de PET encarece em até 154% em relação a trincheiras convencionais, isto devido à mão-de-obra na produção manual de corte das garrafas. Porém em relação ao sistema construtivo o estudo mostra que a utilização de material PET pode auxiliar na solução de problemas de colapso e aumento na capacidade de armazenamento de água.

Com relação aos custos de implantação, Baptista *et al.* (2011) ressaltam que este dispositivo não apresentam valores significativos, e que estes custos variam de acordo com os materiais utilizados e as dimensões adotadas em projeto. Considerando a redução de custo no sistema de drenagem a jusante, este tipo de dispositivo é bastante viável, porém levando-se em conta o risco de colmatação, o gasto com manutenção pode ser considerável.

### **3.3.2 Vala de Infiltração**

As valas de infiltração são técnicas compensatórias constituídas por simples depressões escavadas no solo e tem como finalidade armazenar temporariamente as águas pluviais, favorecendo a sua infiltração, sendo suas dimensões longitudinais maiores que transversais (ALMEIDA *et al.*, 2005).

Canholi (2005) explica que é de muita importância o revestimento com vegetação nesse tipo de estrutura, isto porque a vegetação ajuda na conservação da superfície mais permeável do solo e também evita colmatação. Schueler (1987) ressalta que o bom desempenho dessas valas depende do tipo de vegetação e da declividade da superfície que influenciarão na velocidade do escoamento.

Segundo Urbonas (1993) quanto mais lento o fluxo em uma vala gramada, mais poluentes podem ser removidos por sedimentação. Além disso, o fluxo mais lento proporciona maior tempo de infiltração das águas pluviais.

Souza (2002) analisa que as valas de infiltração com um bom efeito paisagístico podem ser integrada ao espaço urbano. Uma vantagem é o baixo custo em sua execução (HOLZ e TASSI, 2007), como desvantagem é o fato de se precisar de grandes áreas e de manutenção.

Baptista *et al.* (2011) citam algumas outras vantagens, como o benefício financeiro (diminuição das dimensões do sistema de drenagem a jusante ou até mesmo a eliminação do mesmo), ganho paisagístico (valorizando o espaço urbano) e benefícios ambientais (possibilidade de recarga do lençol freático). Como desvantagens os autores citam a restrição de sua eficiência em grandes declividades e possibilidade de não fluidez das águas. Na Figura 5 mostra-se uma utilização de uma vala de infiltração.



Figura 5 - Vala de Infiltração. Fonte: Certu (1998) apud Brito (2006).

### **3.3.3 Poço de Infiltração**

Poços de infiltração são estruturas pontuais de controle na fonte e caracterizam-se por necessitar de pequenas áreas para sua implantação. Tem função de minimizar as vazões de pico e fazer com que a água infiltre no solo e diminuir o volume do escoamento superficial (ANGELINI SOBRINHA, 2012).

Martin *et al.* (2006) explicam que o controle na fonte de águas pluviais tornou-se, na França, uma solução alternativa popular para o gerenciamento de águas pluviais em áreas urbanas. Esse controle constitui uma variante de melhores práticas de gestão, que pode ser avaliada em relação a vários critérios, incluindo: eficiência hidráulica, retenção de poluição, impacto ambiental, operação e manutenção, investimento econômico e social e vida urbana sustentável.

O esvaziamento da água neste dispositivo pode ser por infiltração no solo ou pelo lençol freático. Em locais onde a camada superficial é pouco permeável e as camadas mais profundas permeáveis, este dispositivo é uma solução adequada (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Mostra-se na Figura 6 esquematicamente um poço de infiltração. O sistema é formado por um poço escavado no solo e revestido por tubos de concreto perfurados ou tijolos assentados em crivo, envolvido por manta geotêxtil entre a interface do solo e do tubo, e o fundo revestido por agregados

graúdos, também envoltos por geotêxtil, permitindo a infiltração para o solo do volume de água escoado para o interior.

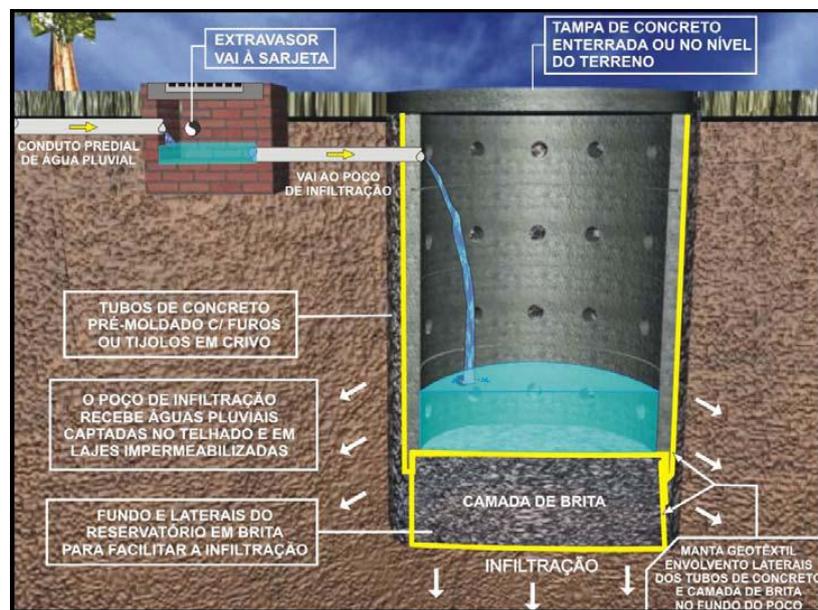


Figura 6 - Esquema de um Poço de Infiltração. Fonte: Reis, Oliveira & Sales (2005).

Carvalho (2008) realizou uma pesquisa no Condomínio Alto da Boa Vista, região metropolitana de Goiânia, em que foram analisadas algumas estruturas de infiltração incluindo poços construídos em escala real. No estudo foi monitorado o nível de água dentro desse dispositivo. O modelo numérico utilizado na pesquisa foi o programa FlexPDE que reproduziu bem a situação de campo. Através dos resultados obtidos pelo programa pode-se observar que a infiltração ocorre com mais intensidade na porção inferior do poço. A autora verificou que a completa infiltração do volume armazenado no poço poderá ocorrer depois de vários dias, portanto para dias consecutivos de chuvas o poço não atenderia a demanda necessária, tendo o poço 19% de eficiência quanto à capacidade de infiltração do volume de chuvas na área.

Reis *et al.* (2008) realizaram a construção de um poço de infiltração, com período de retorno de 1 ano, na Universidade Federal de Goiás (UFG) e compararam o comportamento deste em relação a um poço escavado a trado sem revestimento. Ambos foram monitorados levando-se em conta as taxas de infiltração de água no solo. Em todos os ensaios realizados o desempenho do poço de infiltração mostrou-se maior que do poço escavado a trado. Pode-se

avaliar que devido ao “efeito escala” enquanto um volume maior de água infiltra em uma área proporcionalmente menor no poço de infiltração, o mesmo não acontece no poço escavado a trado, pois um volume menor infiltra em uma área proporcionalmente maior. Esse fator faz este último poço mais sensível às alterações que possam acontecer na área de entorno, como por exemplo, a influência do grau de saturação do solo sobre a sua capacidade de infiltração. Já com relação à permeabilidade, durante a realização dos ensaios, o poço de infiltração obteve um desempenho, na capacidade de infiltração de água, de 4 a 19 vezes maior que a do poço sem revestimento e escavado a trado, com a mesma profundidade.

Angelini Sobrinha (2012) estudou um poço de infiltração construído no campus da Universidade Federal de São Carlos. O poço foi construído com anéis de concreto perfurado e revestido com manta geotêxtil. As laterais externas e internas do poço foram cobertas com tijolos furados e manta geotêxtil. A base foi assegurada com bloco de concreto, e no fundo do poço foi colocada uma camada de brita nº 3. O dispositivo de entrada do poço foi feito com uma tampa de metal, manta geotêxtil, uma camada de areia grossa e uma camada superficial de brita nº 3.

Para o referido estudo foram monitoradas precipitações, vazões afluentes ao sistema e a medida do nível de água dentro da estrutura, sendo que as vazões de entrada e os níveis de água medidos foram modelados através do método de PULS. A autora monitorou 22 eventos de chuva, sendo 11 eventos com chuvas reais e 11 com chuvas simuladas. O poço de infiltração foi considerado 100% eficiente, visto que toda água advinda da parte selecionada do prédio em estudo foi infiltrada no poço e não extravasando para fora do sistema. O período de retorno usado pela autora foi de 1 ano.

Contudo, Reis *et al.* (2008) alertam que a adoção de poços de infiltração sem um apropriado estudo dos parâmetros locais pode originar em um sistema sem finalidade, já que este possui várias limitações relacionadas com as particularidades do local. Portanto, a definição prévia de parâmetros locais fundamentais ao dimensionamento e execução desses poços tem o objetivo de suprir as limitações do sistema de drenagem, oferecendo maior desempenho, dimensionamento econômico e funcional. Logo, os autores, bem como Baptista

*et al.* (2011) sugerem alguns parâmetros a serem levantados antecipadamente, sendo eles:

- nível do lençol freático mais elevado no período sazonal;
- as águas escoadas não serem fortemente poluídas;
- classificação e caracterização dos índices físicos do solo;
- perfil do solo até a profundidade correspondente a infiltração;
- subsolo não impermeável até grande profundidade, pois não se recomenda poços muito profundos;
- coeficiente médio de permeabilidade ( $k$ ) e taxa média de infiltração ( $I$ );
- potencial de colapsibilidade do solo;
- tempo de retorno ( $T$ ) e tempo de concentração ( $t_c$ );
- índices pluviométricos regionais ( $i$ );
- áreas de contribuição e coeficiente de escoamento superficial ( $c$ );
- vazão de projeto ( $Q$ ).

Com boa integração na paisagem e ocupar pequenas áreas superficiais, o incomodo seria a manutenção frequente, devido ao fato de reduzir sua vida útil com o processo de colmatação (SOUZA, 2002). A Figura 7 apresenta um exemplo de aplicação de um poço de infiltração em uma área construída.



**Figura 7 - Poço de Infiltração construído em uma área de recreação em Lyon, França.  
Fonte: Baptista et al. (2011).**

Os custos de implantação desse dispositivo não são considerados significativos, sendo semelhante aos de poços tradicionais. Contudo levando-se em consideração os riscos de colmatação o custo com manutenção pode

ser considerável (BAPTISTA *et al.*, 2011). Na construção de um poço realizado por Angelini Sobrinha (2012) o custo foi totalizado em R\$ 3.730,00 relativo a compra de materiais construtivos.

### **3.3.4 Plano de Infiltração**

Define-se plano de infiltração comumente áreas rebaixadas cobertas com gramados laterais que recebem água pluvial vindas de superfícies impermeáveis. Esses planos reduzem os poluentes, necessitando a construção de estruturas de drenagem urbana sustentável a jusante desses planos (MOURA, 2005). Baptista *et al.* (2011) definem planos quando suas dimensões longitudinais não são muito maiores que as transversais e com profundidade reduzida.

Esse tipo de estrutura deve ser utilizado em terrenos com baixa declividade, visto que em terrenos acidentados a água ganha velocidade e permanece pouco tempo em contato com o solo não permitindo sua adequada infiltração, principal característica deste dispositivo (HOLZ e TASSI, 2007). A Figura 8 apresenta um plano de infiltração.



**Figura 8 - Plano de Infiltração. Fonte: Yazaki (2004) apud Kobayashi et al. (2008).**

Kobayashi *et al.* (2008) mencionam como pontos positivos desse tipo de estrutura, o fato de permitir a infiltração de parte da água para o subsolo, retardar o deflúvio superficial direto e ser esteticamente agradável. Como

aspectos negativos o autor menciona que os planos com declividade maior que 0,1% não devem ser usados, isto por o transporte de material sólido para a área de infiltração poder reduzir sua capacidade de infiltração; o acúmulo de água no plano durante o período chuvoso impede o trânsito sobre a área; áreas gramadas devem ser podadas periodicamente, incluindo custos de manutenção.

Existem poucos estudos na literatura repostando-se aos planos de infiltração, mostrando que essas estruturas necessitam ainda serem experimentadas.

### **3.4 Infiltração da água no solo**

A infiltração é a passagem da água superficial para o interior do solo, dependendo assim da água disponível para infiltrar, da natureza do solo (umidade, permeabilidade, profundidade, temperatura) das quantidades de água e ar no interior do solo, e das condições da superfície (TUCCI, 1993; VILLELA & MATTOS, 1975).

O processo de infiltração inicia-se quando a precipitação chega ao solo e conforme a água se infiltra na superfície, as camadas superiores do solo são umedecidas de cima para baixo modificando gradativamente o perfil de umedecimento, sendo portanto a superfície a primeira camada de solo a saturar e posteriormente as camadas inferiores (TUCCI, 1993).

#### **3.4.1 Método de Puls**

De acordo com Puls (1928) apud Cudworth (1989) o Método de Puls original desenvolvido por L. G. Puls é chamado também de Método de Inflow Storage Discharge Curves, e o método de Puls modificado é semelhante ao original, contudo o processo de propagação é simplificado usando apenas uma curva Cota x Vazão de Saída.

O Modelo de Puls é um dos métodos mais conhecidos para simulação da propagação de cheia em reservatório, caracterizado por supor que existe uma relação entre o volume armazenado e a vazão de saída, sendo que esta independe da vazão de entrada. O método utiliza-se da equação da continuidade que traduz o princípio de conservação da massa, e sua aplicação

é realizada por meio da curva cota-vazão e pela equação em si. A primeira equação (Equação 1) utilizada no método é a equação da continuidade:

$$I - Q = dS/dt \quad (1)$$

Em que:

I = Vazão de entrada (m<sup>3</sup>/s);

Q = Vazão de saída (m<sup>3</sup>/s);

S = Volume armazenado dentro da estrutura (m<sup>3</sup>);

t = Tempo (s).

De acordo com Canholi (2005) e Baptista, Nascimento & Barraud (2011) a Equação 1 pode ser descrita e rearranjada de várias maneiras. A expressão discretizada da equação da continuidade para se obter o hidrograma de saída pode ser conseguido pela Equação 2:

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (2)$$

Em que:

t , t+1 = Índices de tempo (min);

I = Vazão de entrada (m<sup>3</sup>/s);

Q = Vazão de saída (m<sup>3</sup>/s);

S = Volume armazenado (m<sup>3</sup>).

As incógnitas, volume no instante 2 (S<sub>(t+1)</sub>) e vazão no instante 2 (Q<sub>(t+1)</sub>), são obtidas pelo traçado da curva cota x vazão de saída, ou seja, na abscissa tem-se os valores de ((2 S<sub>(t+1)</sub>)/ Δt + Q<sub>s(t+1)</sub>) e na ordenada tem-se os valores (Q<sub>s(t+1)</sub>). Através de uma função matemática que melhor represente a curva, obtêm-se os valores de (Q<sub>s(t+1)</sub>). Conhecendo o valor de (Q<sub>s(t+1)</sub>) calcula-se o volume dentro da estrutura e o nível de água.

O método de Puls foi aplicado para alguns estudos, dentre eles: Hernandez (2007) propondo uma metodologia de cálculo de Puls simplificada

utilizando-se das facilidades computacionais existentes para que estas possibilitem a substituição de metodologias tradicionais; Tomaz (2002) aplicou do método de Puls modificado para um caso combinado de vertedor e orifício no dimensionamento do reservatório de retenção do Pacaembu em São Paulo.

Já Canholi (2005) apresenta o método de Puls considerando diferentes estruturas de saída de bacias de retenção, com exemplos de aplicação no controle de inundações urbanas.

Lucas (2011) utilizou o Puls para modelar dados monitorados em um sistema Filtro-Vala-Trincheira de infiltração. O autor considerou as etapas de funcionamento do sistema (Filtro+Vala+Trincheira) e o nível de armazenamento de água na estrutura. Angelini Sobrinha (2012) também utilizou o método do Puls para modelar um poço de infiltração construído em escala real, considerando o nível de armazenamento de água no poço.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODO

Neste trabalho propõe-se construir e avaliar um plano de infiltração, construído em escala real, para manejo do escoamento superficial direto predial. Descrevem-se a seguir a concepção, construção, monitoramento e modelagem desta técnica compensatória.

Os recursos para o estudo vieram do Projeto MCT/FINEP/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação 07/2009 – MAPLU2 – Manejo de Águas Pluviais Urbanas 2.

##### 4.1 Local para implantação

O local destinado à implantação da técnica compensatória possui uma área de 908,7 m<sup>2</sup> e se localiza no campus da UFSCar em São Carlos - SP, em uma microbacia experimental, na zona norte da universidade, conforme Figura 9. A técnica compensatória tem a função de reter o escoamento superficial direto predial do edifício do Departamento de Fisioterapia.

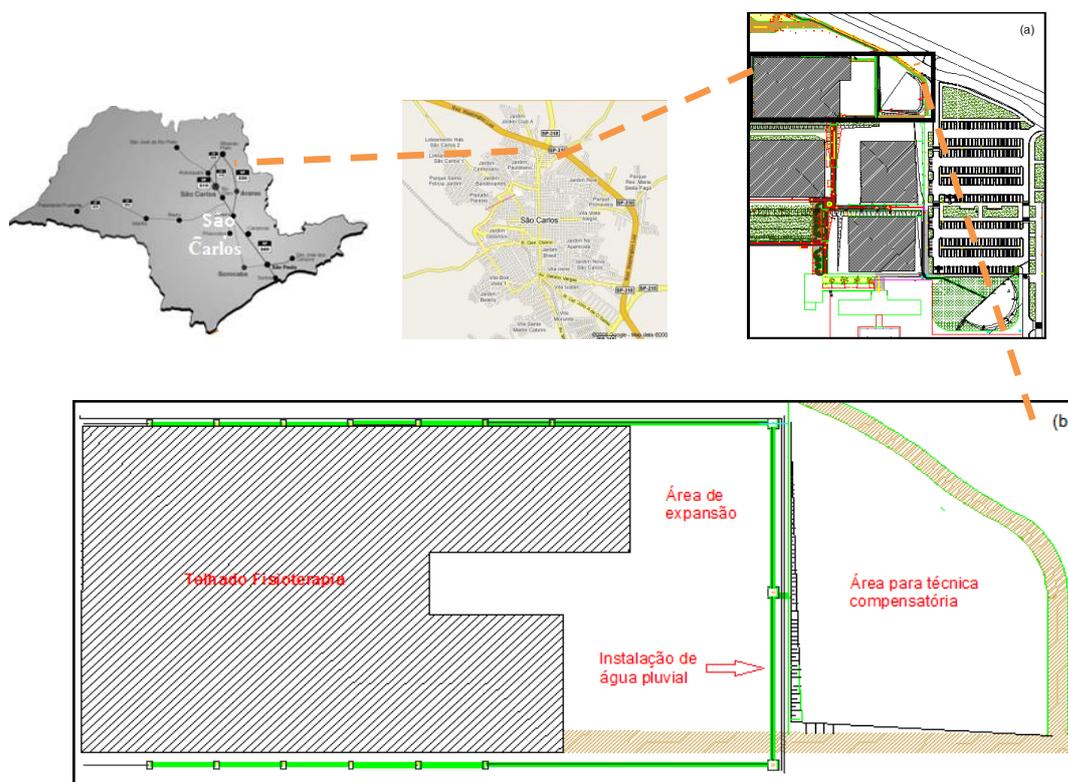


Figura 9 - Microbacia experimental (a) e edifício da Fisioterapia cujo escoamento pluvial será manejado com a área da técnica compensatória (b). Fonte: Grupo G-Hidro.

## **4.2 Caracterização do Solo**

Para a caracterização do solo foram realizados ensaios para obtenção da granulometria, compactação e índices físicos desse solo. Os ensaios foram realizados com quatro amostras: superficial, a 0,30m; 0,60m e 0,90m de profundidade.

Para obtenção da taxa de infiltração superficial foram realizados ensaios de Duplo Anel antes e após a construção do plano de infiltração.

Todos os ensaios foram feitos em triplicata.

### **4.4.1 Ensaio de Granulometria**

A análise granulométrica tem a finalidade de classificar a amostra de solo e examinar os valores de infiltração conseguidos. Os ensaios foram realizados segundo as normas NBR 7181 (ABNT, 1984b) e NBR 6502 (ABNT, 1995).

### **4.4.2 Determinação dos Índices Físicos**

A Determinação dos Índices Físicos tem por objetivo determinar a massa específica do solo, a massa específica do solo seco, índices de vazios, porosidade e grau de saturação do solo. A determinação da massa específica do solo seco é importante por consentir a correlação com o ensaio de compactação para se conseguir o grau de compactação do solo. Para a obtenção dos índices físicos seguiram a norma NBR 6508 (ABNT, 1984a).

### **4.4.3 Ensaio de Compactação**

O Ensaio de Compactação tem por finalidade obter o grau de compactação do solo da área do sistema de infiltração e também interferências na permeabilidade. Esse ensaio indica a relação entre teor de umidade e massa específica do solo seco quando este está compactado. Os ensaios de compactação acompanharam a NBR 6457 (ABNT, 1986a) e a NBR 7182 (ABNT, 1986b).

### **4.4.4 Ensaios de Infiltração de Duplo Anel**

O ensaio de duplo anel consiste em fixar dois anéis de diferentes diâmetros, preenchidos com água, em que é registrada a variação do nível de

água para certo intervalo de tempo, conforme citado por Cauduro & Dorfman (s/d), conforme Figura 10.

Manteve-se uma lâmina de 5 cm sobre a superfície do anel interno através de uma torre de PVC com água. O volume infiltrado foi medido através de leitura de nível da torre de PVC de 200mm com escala graduada externa.

Foram realizados quatro ensaios de Duplo Anel, sendo um na fase de projeto e três após a construção.



Figura 10 – Equipamentos usados no ensaio de Duplo Anel

#### 4.3 Seleção da Técnica Compensatória

Previamente foi escolhido a implantação de um plano de infiltração devido a disponibilidade de área. Verificou-se, entretanto se a técnica compensatória plano de infiltração atendia aos seguintes critérios para poder ser implantada: aspectos físicos (topografia, aporte permanente de água, existência de exutório permanente e nível do lençol freático, infiltração no solo e estabilidade do subsolo), aspectos urbanísticos e de infraestrutura (disponibilidade de espaço e existência de redes no local), aspectos sanitários e ambientais (risco de poluição e risco sanitário) e aspectos socioeconômicos (aceitação dos usuários, manutenção e custo) (BAPTISTA et al., 2011).

Os valores dos custos do plano de infiltração são de agosto de 2012, data da construção do plano, e todos os valores para efeito comparativo também foram ajustados para esta data.

#### 4.4 Dimensionamento e Projeto

O dispositivo foi dimensionado para receber as águas procedentes do telhado de chapa galvanizada do prédio do departamento de Fisioterapia, com uma área de 1.747,54 m<sup>2</sup> e uma área de expansão entre o prédio e o dispositivo, com 1.253,76 m<sup>2</sup>, somando uma área de 3.001,30 m<sup>2</sup>.

Usou-se para o dimensionamento da técnica compensatória o método das chuvas (BAPTISTA *et al.* 2011) com um período de retorno de 10 anos. Para calcular as intensidades das precipitações foi empregada a equação de chuva da cidade de São Carlos conforme Barbassa (1991), descrita na Equação 3.

$$I = \frac{28,03 \times Tr^{0,199}}{(t+16)^{0,936}} \quad (3)$$

Em que:

I = intensidade da precipitação (mm/min)

Tr = período de retorno (anos)

t = duração da precipitação (minutos)

O ensaio de permeabilidade por duplo anel constatou um solo praticamente impermeável. O mesmo foi observado quando da amostragem a diferentes profundidades, pois a extração manual das amostras foi substituída pela mecanizada. Adotou-se então um K saturado igual  $3,75 \times 10^{-5}$  m/s determinado por ensaio de Duplo Anel em uma área a 100m do local de implantação da técnica. Mostra-se na Figura 11 o plano de infiltração em planta.

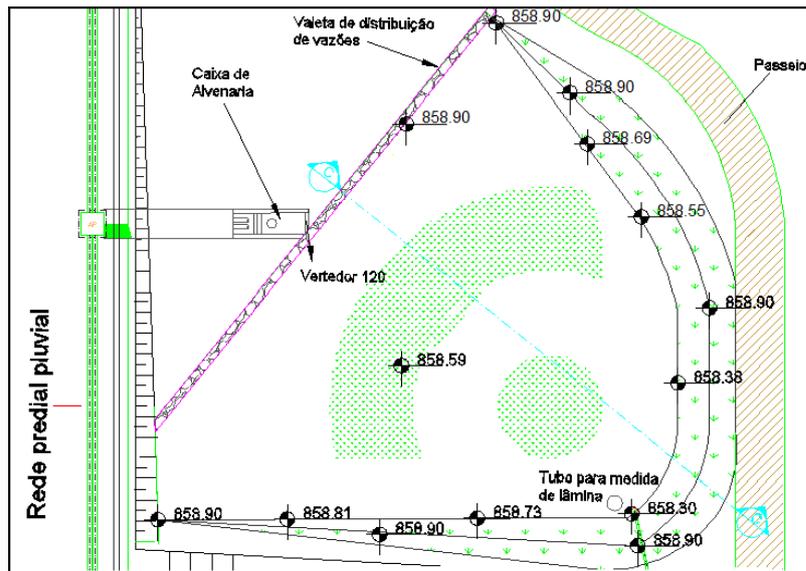


Figura 11 - Plano de infiltração em planta

#### 4.5 Construção do Plano

A construção da técnica compensatória foi realizada por empresa privada e seguiu as seguintes etapas:

- Locação: utilizou-se trenas e estacas para demarcar os pontos e o formato do plano de infiltração;
- Terraplanagem: removeu-se com uma retroescavadeira 0,30m de solo para obtenção das cotas desejadas em projeto;
- Subsolação: o solo foi subsolado até 0,50m de profundidade para tentar se recuperar a permeabilidade do solo;
- Verificação do atendimento das cotas e dimensões de projeto: após a subsolação foi feita medição com aparelho de nível para verificar se as cotas e dimensões de projeto continuavam corretas;
- Cobertura vegetal com grama e instalação de saída de fundo.

#### 4.6 Monitoramento do Plano de Infiltração

Foram executadas as medidas de precipitação, vazões de entrada e nível de água no interior do plano de infiltração, como se segue.

#### **4.6.1 Medidas de Precipitação**

A precipitação foi monitorada através de um pluviógrafo digital localizado na estação climatológica da UFSCar, a uma distância vetorial de 525,3 m da técnica compensatória.

O equipamento foi calibrado em laboratório por Lucas (2011), com simulação de precipitações de diferentes intensidades, através do esvaziamento por gotejamento de um balão volumétrico de 500 ml e registro do tempo de esvaziamento do recipiente.

#### **4.6.2 Vazões do escoamento superficial direto predial e sobre o plano**

As medidas das vazões a montante do plano de infiltração foram realizadas com auxílio do vertedor triangular de 120° e de um medidor de nível OTT, modelo Orpheus Mini.

A precipitação sobre a área do plano de infiltração também foi transformada em vazão, de modo que a vazão total do plano de infiltração é a soma da vazão do vertedor com a vazão sobre o plano.

#### **4.6.3 Medida do nível de água no interior do plano**

O nível de água no interior do plano foi monitorado por um sensor de nível eletrônico “OTT”, modelo Orpheus Mini, este foi inserido no plano em um tubo perfurado, conforme Figura 12. O sensor de nível foi instalado na cota mais baixa do terreno, ou seja, no final do plano de infiltração (Figura 13).



Figura 12 - Instalação do sensor de nível em um tubo de PVC perfurado no interior do plano de infiltração. Fonte: Angelini Sobrinha (2012)



Figura 13 - Localização do tubo de PVC com o sensor de nível no interior do plano de infiltração

#### **4.6.4 Calibração dos equipamentos em laboratório**

Foi realizada no laboratório de Hidráulica da UFSCar a calibração do vertedor triangular de  $120^\circ$  e dos dois sensores de níveis OTT, modelo Orpheus Mini anteriormente as suas instalações em campo.

Calibrou-se o vertedor de  $120^\circ$  em canal retangular no laboratório, comparando-se as medidas feitas com o vertedor triangular de  $120^\circ$  com as medidas direta de massa por unidade de tempo, conforme figura 14. Observou-se que a largura do canal retangular é de 0,30m e a largura do vertedor é de 1,30m, então conseguiu-se em laboratório apenas pequenas lâminas.



Figura 14 – Instalação de vertedor 120° em laboratório

Os sensores de níveis foram calibrados comparando-se as medidas de nível de água registradas pelos equipamentos com aquelas obtidas manualmente, através de régua limnimétrica e recipiente, conforme Figura 15.

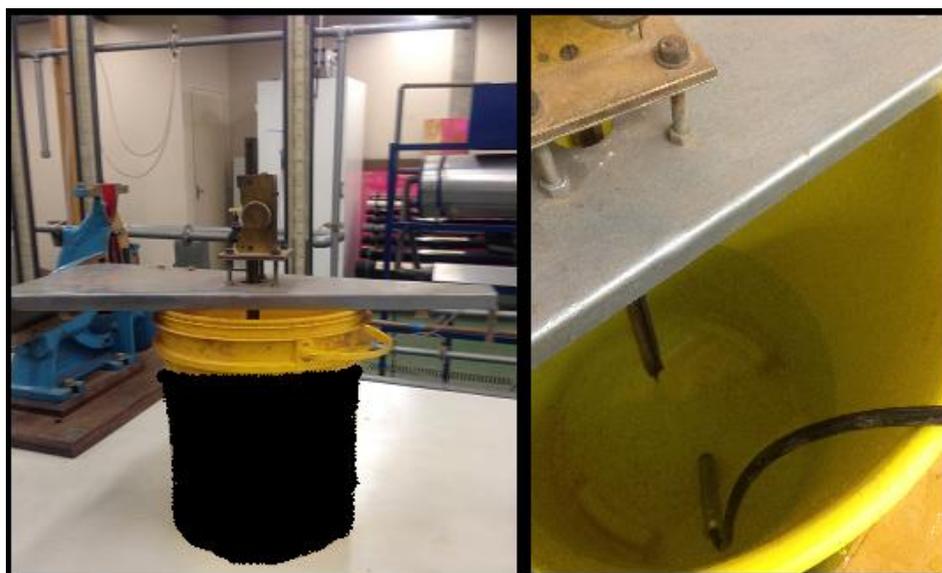


Figura 15 – Sensor de nível OTT modelo Orpheus Mini e recipiente para calibração do sensor em laboratório.

#### ***4.6.5 Cálculos dos tempos de esvaziamento, tempo de retardo e tempo de pico***

Para todos os eventos de chuva monitorados foram calculados os tempos de esvaziamento, tempo de retardo e tempo de pico. De acordo com Baptista

*et al.* (2011) o tempo de esvaziamento ( $D_v$ ) de uma estrutura representa o tempo do seu funcionamento subtraído do tempo necessário para o seu enchimento, sendo calculado pela fórmula 4 (Baptista *et al.*, 2011):

$$D_v = DP \text{ máx. } (q_s, T) / q_s \quad (4)$$

Em que:

DP máx. ( $q_s, T$ ): a diferença máxima entre altura precipitada e altura infiltrada (m)

$q_s$ : a vazão específica da área de drenagem (m/s).

Os tempos de retardo e de pico foram calculados subtraindo o centro de gravidade da vazão e do nível de água, respectivamente, do centro de gravidade da chuva, conforme fórmula 5:

$$t \text{ retardo} = (\sum(t * N.A.) / \sum N.A.) - (\sum(t * \text{precipitação}) / \sum \text{precipitação}) \quad (5)$$

Em que:

$t$  = tempo do evento (min)

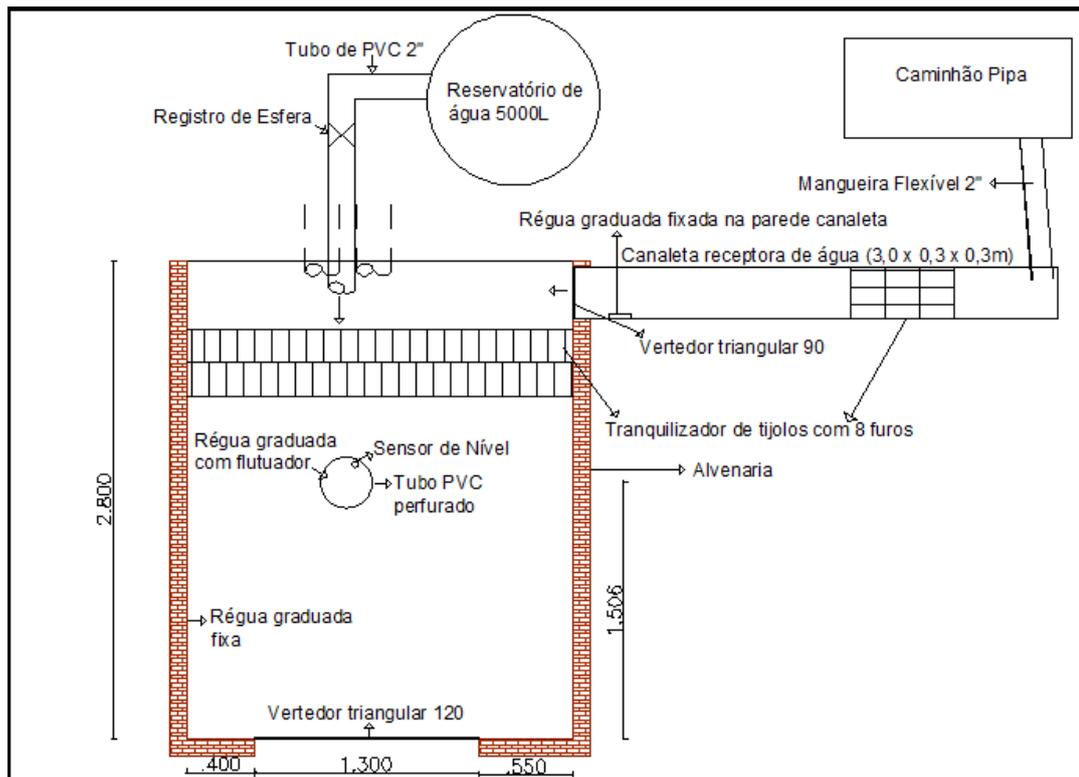
N.A = nível de água (m)

Precipitação: altura precipitada (mm)

#### **4.7 Ensaios de Campo com chuva Simulada**

Foram realizados três ensaios de campo para verificar a qualidade das medidas de nível de água realizada por sensores instalados a montante do vertedor de 120° e no interior do plano de infiltração. Avaliou-se também as medidas de vazão obtidas pelo vertedor de 120°. Adicionalmente registrou-se por meio fotográfico a área de inundação no interior do plano de infiltração.

As vazões dos ensaios foram produzidas através do esvaziamento de um reservatório de água de 5000L e de um caminhão pipa localizados a montante do plano de infiltração, conforme Figura 16. A descrição da medição dessas vazões é apresentada a seguir. Os ensaios foram realizados em triplicata.



**Figura 16 – Realização de ensaio de campo com chuva simulada**

#### **4.7.1 Vazão gerada pela caixa de água de 5000L**

A vazão gerada pelo reservatório de 5000L foi obtida através do seu esvaziamento. A água ao sair da caixa de água era conduzida para o plano através de um tubo de PVC de 2”, conforme Figura 17. Os níveis de água e o tempo foram medidos através de um sensor de nível OTT, modelo Orpheus Mini. O hidrograma de esvaziamento da caixa de água de 5000L foi realizado anteriormente ao ensaio por Felipe (2014) sob as mesmas condições usadas nesse experimento.



**Figura 17 - Caixa de água de 5000L usada no ensaio de campo**

#### 4.7.2 Vazão gerada pelo caminhão pipa

A vazão gerada pelo caminhão pipa durante o esvaziamento foi conduzida até a canaleta por meio de uma mangueira flexível de 2". Nesta canaleta, após o tranquilizador, instalou-se uma régua graduada fixada na parede para medição dos níveis de água com leitura manual. No final da canaleta montou-se um vertedor triangular de 90° de parede fina. Este vertedor foi calibrado em laboratório por Lucas (2011), atestando a Equação 6 de Thomson (PORTO,2006) (Figura 18).

$$Q = 1,4 \times h^{2,5} \quad (6)$$

Em que:

Q = vazão (m<sup>3</sup>/s)

h = altura ou lâmina de água acima da crista do vertedor (m).



Figura 18 - Canaleta receptora de água do caminhão pipa

#### 4.7.3 Verificação das medidas de vazões de ensaio na entrada do plano de infiltração

As vazões de ensaio correspondem a soma do hidrograma produzido pelo esvaziamento da caixa de água de 5000L (item 4.7.1) com o hidrograma gerado pelo esvaziamento do caminhão pipa (item 4.7.2). Essas vazões

consideradas conhecidas foram usadas para verificação das medidas do vertedor triangular de 120°.

O vertedor de 120° foi instalado em uma caixa de alvenaria na entrada do plano, conforme Figura 19. O vertedor foi construído de chapa de alumínio de 5 mm de espessura, com um ângulo de abertura de  $\alpha = 120^\circ$  (Figura 20). A vazão no vertedor foi calculada pela Equação 7 (LENCASTRE, 1983).

$$Q = 1,32 \times \tan(\alpha/2) \times h^{2,47} \quad (7)$$

Em que:

Q = vazão (m<sup>3</sup>/s)

$\alpha$  = ângulo de abertura do vertedor em graus

h = altura ou lâmina de água acima da crista do vertedor (m).

O nível de água acima da crista foi monitorado por um sensor de nível OTT, modelo Orpheus Mini instalado na mesma caixa de alvenaria onde se localiza o vertedor de 120°, dentro de um tubo de PVC a uma distância de 1,50m do vertedor, ou seja, seis vezes a máxima carga esperada (25 cm), distância recomendada por Porto (2006), conforme Figura 19.



Figura 19 - Vertedor triangular de parede fina de 120° instalado na caixa de alvenaria

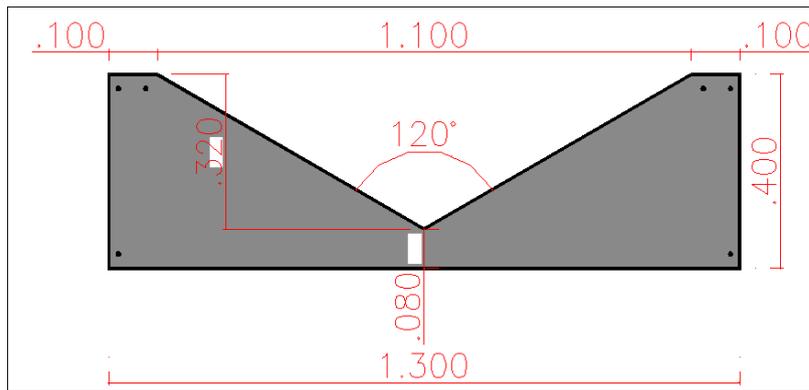


Figura 20 - Desenho vertedor triangular de parede fina com ângulo de 120°.

#### 4.7.4 Verificação das medidas de lâminas de água na crista do vertedor de 120° pelo sensor de nível

As lâminas de água na crista do vertedor na entrada do plano de infiltração foram registrados através de um sensor de nível OTT modelo Orpheus Mini, instalado dentro de um tubo de PVC perfurado localizado a montante do vertedor de 120° conforme Figura 21.

Estas medidas de lâmina também foram realizadas manualmente de duas maneiras, uma com régua graduada com um flutuador instalada dentro do tubo de PVC perfurado e outra medida realizada na parede da caixa de alvenaria através de uma régua fixa.



Figura 21– Sensor de nível e réguas para leitura do nível de água

#### 4.9 Modelagem do Plano de Infiltração

Para a realização da modelagem foi utilizado o método de PULS. Esse método é um dos mais conhecidos na simulação da propagação de cheia em reservatório e supõe uma relação entre volume armazenado e vazão de saída. O PULS utiliza a equação da continuidade em que, a partir de valores das vazões de entrada são obtidas as vazões de saída e o volume de armazenamento na estrutura para cada intervalo de tempo (TUCCI,1998). Este método já foi aplicado, entre outros, por Vieira, Silva e Nascimento (2009), Lucas (2011) e Angelini Sobrinha (2012).

O modelo foi realizado considerando o valor de K do solo saturado e variável. O valor K do solo variável foi considerado dividindo a taxa de infiltração em duas (Figura 22): a primeira de 356mm/h (média das taxas até os 14 minutos) e outra de 181 mm/h (K saturado). Foi utilizado o tempo de 14 minutos por ser quando a taxa de infiltração do solo passa a ser constante.

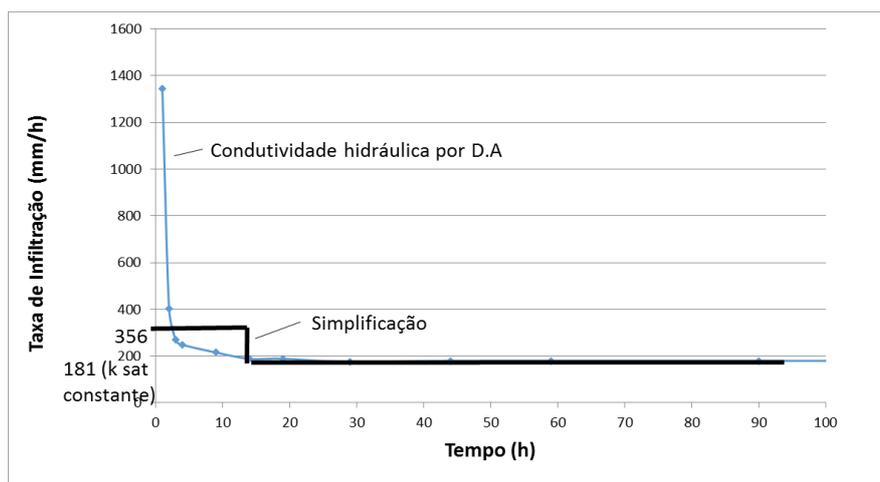


Figura 22– Curva da taxa de infiltração do solo considerando o K variável

O plano de infiltração foi modelado com duas saídas: apenas pela vala de distribuição (pequena trincheira) se o NA for menor que a profundidade de 0,30m e enquanto houver vazão de entrada. Quando o NA ultrapassa 0,3m inicia-se o escoamento para o plano, calculado como um vertedor retangular com largura igual a extensão da vala de distribuição de 25m, conforme Porto (2006).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização do Solo

O solo foi caracterizado como Areia Média a Fina Argilosa, segundo a Classificação Unificada mencionada por Souza Pinto (2000), conforme Tabela 2.

**Tabela 2 - Classificação do solo local para projeto**

Profundidade	% Argila	% Silte	% Areia Fina	% Areia Média	% Areia Grossa	% Pedregulho	Classificação do Solo
Superficial	27	5	18	44	6	0	Areia Média a Fina argilosa
30 cm	28	4	18	48	2	0	Areia Média a Fina argilosa
60 cm	31	3	21	35	10	0	Areia Média a Fina argilosa
90 cm	27	5	20	38	10	0	Areia Média a Fina argilosa

O grau de compactação do solo, como mostra Tabela 3, variou entre 92,5% na superfície e 72,3% na profundidade de 0,90m, observando que o solo encontrava-se compactado superficialmente e já nas camadas inferiores em condições naturais.

A permeabilidade resultante de um ensaio de duplo anel foi praticamente nula antes da construção. O terreno apresentou uma declividade constante de 3% e não há redes de infraestrutura passando pelo local.

**Tabela 3 - Índices Físicos e grau de compactação do solo local para projeto**

Profundidade	y natural (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade natural (%)	Umidade Ótima (%)	yd (g/cm <sup>3</sup> )	yd máximo (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de Compactação (%)
Superficial	1,895	13,08	14,5	1,675	1,812	92,5
30 cm	1,774	17,69	14,6	1,507	1,810	83,3
60 cm	1,657	17,31	14,8	1,412	1,840	76,7
90cm	1,522	17,69	16,6	1,293	1,790	72,3

## 5.2 Escolha e concepção da técnica compensatória

Apresenta-se na tabela 4 a avaliação dos parâmetros usados para implantação da técnica compensatória na microbacia em estudo. De acordo com os aspectos físicos e por se tratar de uma área grande ajardinada, não seria possível implantar: pavimentos permeáveis e revestimento permeável. Pelo fato do prédio de Fisioterapia já estar construído não era viável implantar telhados armazenadores. Os aspectos urbanísticos e de infraestrutura excluem as trincheiras de infiltração e as valas e valetas de infiltração e retenção, isto devido a uma disponibilidade de área praticamente quadrada. Os poços também não se enquadram pela disponibilidade de área e por serem mais dispendiosos. Chegou-se então em um plano de infiltração, considerando que o seu custo é mais baixo por envolver pequena movimentação de terra e sua integração na paisagem.

Tabela 4 - Critérios de escolha da técnica compensatória

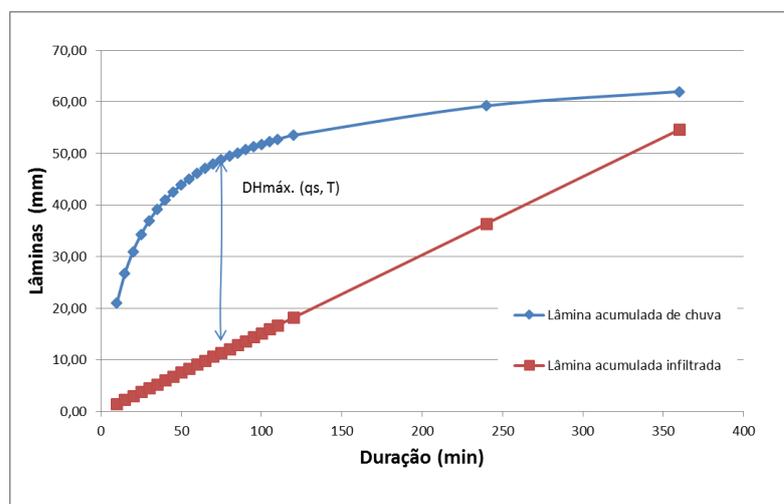
	VARIÁVEIS	CARACTERÍSTICA DA ÁREA
<b>ASPECTOS FÍSICOS</b>	<b>Topografia</b>	Declividade de 3%
	<b>Aporte permanente de água</b>	Não
	<b>Exutório permanente</b>	Sim: solo ou jusante
	<b>Nível do lençol freático</b>	Abaixo de 10 m do nível do terreno*
	<b>Infiltração do solo</b>	Sim, se houver recuperação do solo
	<b>Estabilidade do subsolo</b>	Colapsível
<b>ASPECTOS URBANÍSTICOS E DE INFRAESTUTURA</b>	<b>Disponibilidade de espaço</b>	Sim (19m x 25m)
	<b>Inclinação e forma do telhado</b>	Não aplica
	<b>Existência de rede no local</b>	Não
<b>ASPECTOS SANITÁRIOS E AMBIENTAIS</b>	<b>Risco de Poluição</b>	Não, pois não há cursos de água próximos e o lençol freático é abaixo de 10m. Água advinda do telhado não é altamente poluidora.
	<b>Risco Sanitário</b>	Não, pois não terá água estagnada no local não sendo

		possível o desenvolvimento de organismos vetores de doenças. **
<b>ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS</b>	<b>Aceitação dos usuários</b>	Boa percepção em relação as técnicas
	<b>Manutenção e Custo</b>	Boa Possibilidade de manutenção futura

\*Lucas (2011) \*\* Baptista *et al.* (2011)

### 5.3 Dimensionamento e Projeto

Para o dimensionamento do plano de infiltração realizado através do método das chuvas ou curva envelope utilizou-se um período de retorno de 10 anos e K saturado de  $3,75 \times 10^{-5}$  m/s. A intensidade de chuva resultante foi de 41,1 mm/h com uma duração de 70 minutos e uma altura máxima de armazenamento de 37,4 mm. O volume total a ser armazenado na estrutura é de 106,5 m<sup>3</sup> e o volume disponível de 111,34 m<sup>3</sup>. A curva envelope obtida no dimensionamento do plano é apresentada na Figura 23.



**Figura 23 – Curva envelope resultante do dimensionamento do plano de infiltração com período de retorno de 10 anos.**

Mostra-se na Figura 24(a) a planta do plano de infiltração na forma de arco de elipse, sendo a dimensão do semieixo maior de 25,8 metros e do semieixo menor de 19,9 metros. A área total do plano é de 384,7 m<sup>2</sup>. Tem-se na Figura 24(b) o corte BB do canal em brita e na Figura 24(c) o corte AA do plano, sendo a lâmina máxima de água de 0,59 m.

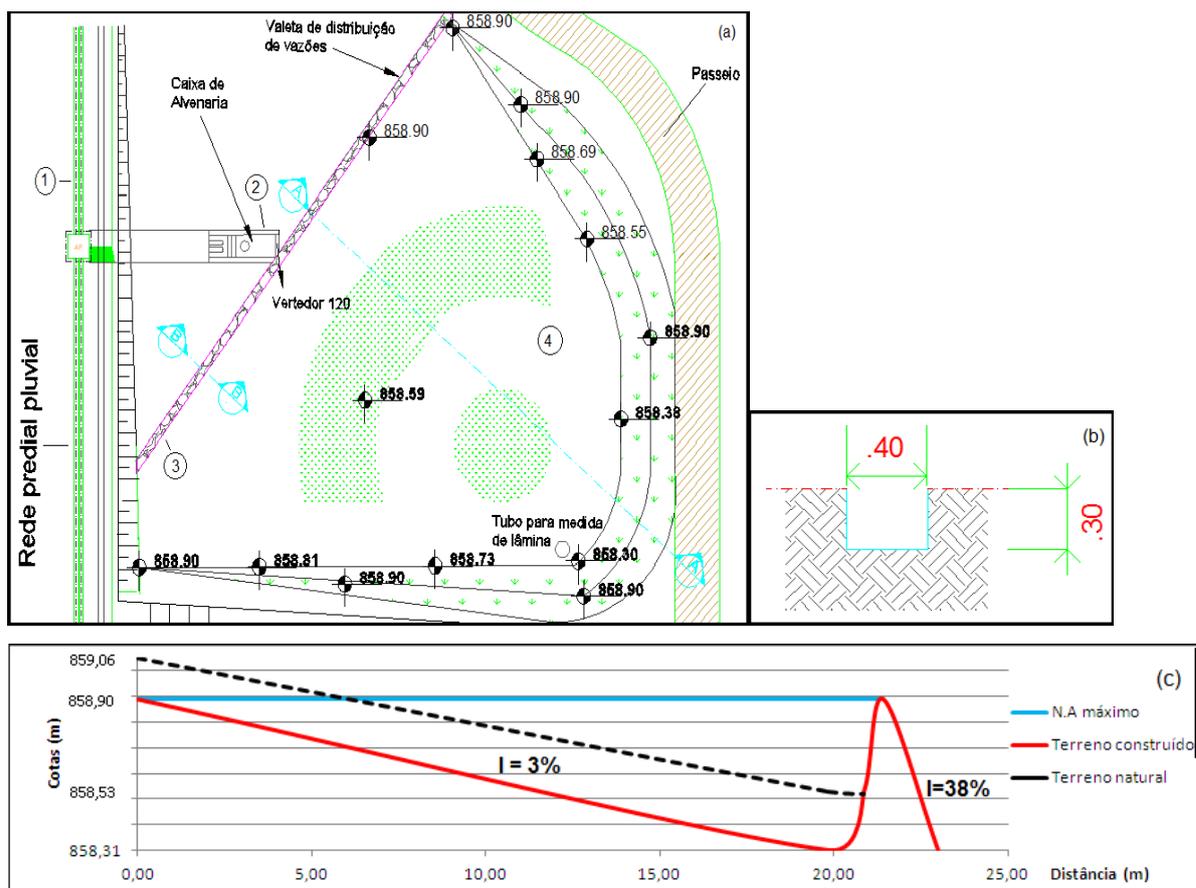


Figura 24 - Plano de Infiltração em planta (a), corte BB do canal em brita (b) e o corte AA do plano de infiltração (c)

#### 5.4 Construção do Plano

As etapas da construção do plano de infiltração, conforme Figura 24(a) são: a primeira etapa foi à locação da obra. As cotas e áreas projetadas foram locadas com equipamento de nível. Para conseguir as cotas desejadas em projeto foi necessário, com uma retro escavadeira, rebaixar o terreno em 0,30 m. Após o corte do terreno foi realizado um levantamento topográfico para verificação das cotas requeridas. Em seguida houve a subsolação do solo até 0,50 m, com posterior acerto manual para não compactar o solo, isto porque a subsolação aumentou o nível do terreno perdendo as cotas de projeto. A conexão da instalação predial com o plano foi feita por uma caixa de alvenaria (2). Após essas etapas fez-se o plantio da grama. Foi instalado um vertedor na entrada do dispositivo para conseguir medir a vazão do escoamento superficial

direto predial. Mostram-se na Figura 25 algumas etapas da construção do plano de infiltração.



**Figura 25 - Área do Plano de Infiltração (1). Localização da Obra (2). Subsolação da área (3). Plantio de grama (4). Fonte: Grupo G-Hidro.**

Os custos para a construção do plano de infiltração foram de R\$ 8.500,29, resultando em R\$ 76,34/m<sup>3</sup>. Entretanto deste valor total, R\$ 3.596,85 foi para o plantio de grama. A planilha dos custos da construção do plano encontra-se no Anexo 1.

Baptista *et. al.* (2011) avaliaram os poços de infiltração a um custo médio de implantação de R\$ 256,26/m<sup>3</sup>. Com relação as trincheiras, o custo médio de implantação é de R\$ 150,22/m<sup>3</sup>. Angelini Sobrinha (2012) avaliou o custo total de implantação de um poço de infiltração na cidade de São Carlos com um custo de R\$ 4.157,93.

Com os resultados anteriores conclui-se que como esperado os planos de infiltração são menos dispendiosos que outras técnicas compensatórias, como poços de infiltração e trincheiras de infiltração.

### 5.5 Recuperação da taxa de infiltração do solo

Verificou-se que a taxa de infiltração, anterior a construção, impedia de usar o solo como exutório, conforme Tabela 3. Portanto após o rebaixamento na área do plano de infiltração de 0,30m foi realizado a subsolação (técnica agrícola para recuperar a capacidade de infiltração do solo) até 0,50m de profundidade. Com o corte do terreno e subsolação conseguiu-se recuperar a capacidade de infiltração do terreno, como mostra-se na Tabela 5. Apresentam-se na Figura 26 as curvas de infiltração e na Figura 27 a localização dos ensaios de Duplo Anel. Como o projeto foi dimensionado com um K saturado de  $3,75 \times 10^{-5}$  m/s e após o rebaixamento da área de infiltração e posterior subsolação a taxa de infiltração do solo aumentou em 33,3% o volume projetado foi atendido com folga.

**Tabela 5 - Ensaios de permeabilidade com Duplo Anel**

<b>Ensaios de Duplo Anel</b>	<b>K saturado (m/s)</b>
(1) Anterior ao projeto	Praticamente 0,0
(2) Após construção da técnica compensatória	$5,0 \times 10^{-5}$
(3) Após construção da técnica compensatória	$5,0 \times 10^{-5}$
(4) Após construção da técnica compensatória	$4,5 \times 10^{-5}$

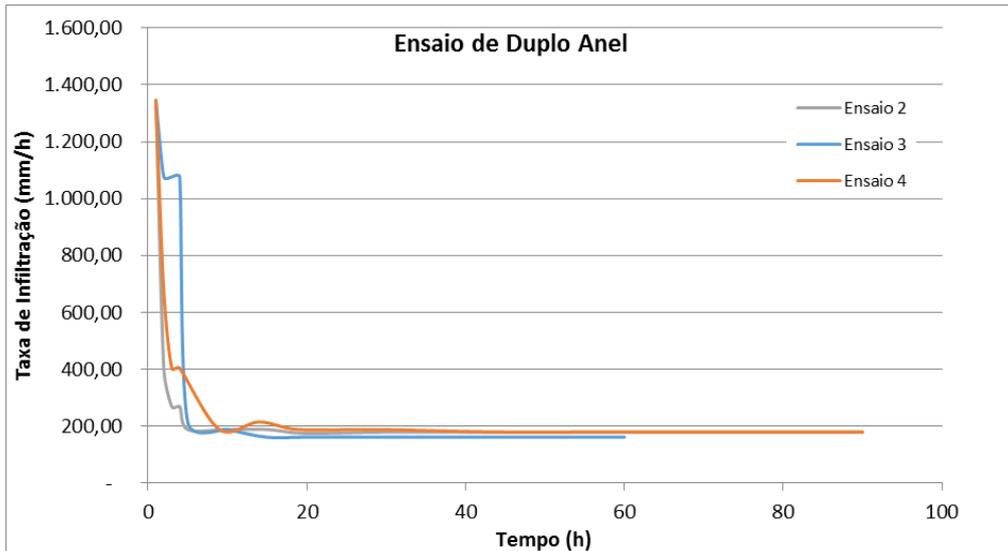


Figura 26 - Curvas de infiltração obtidas por meio dos ensaios de Duplo Anel realizadas no plano de infiltração.

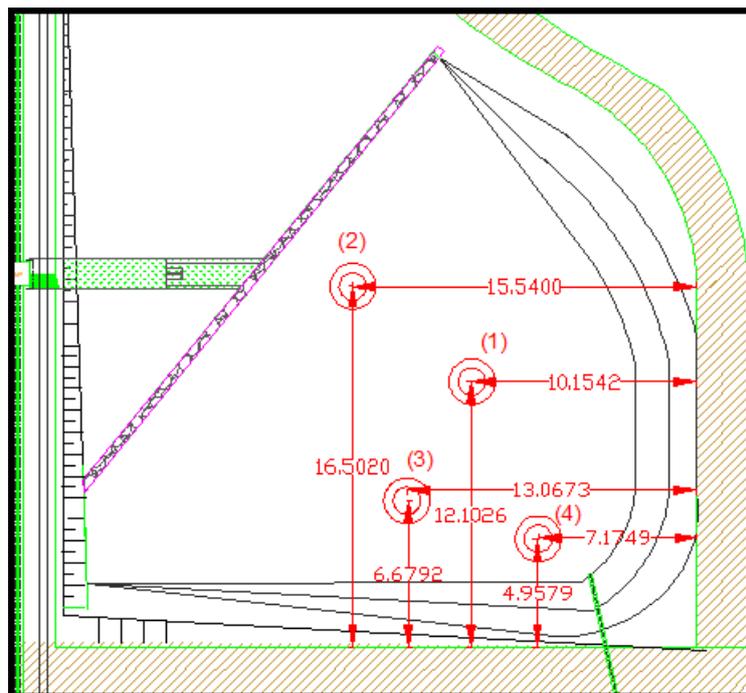


Figura 27 - Localização dos ensaios de duplo anel realizados no plano de infiltração.  
Fonte: G-Hidro.

### 5.6 Funcionamento do Plano de Infiltração

O funcionamento do Plano de Infiltração, conforme Figura 24(a), ocorre seguindo as seguintes etapas: 1ª etapa – a água precipitada no telhado é dirigida pela instalação predial pluvial até uma canaleta; 2ª etapa – conexão da

instalação pluvial com o plano e medição da vazão de entrada; 3ª etapa – a água então é direcionada para uma canaleta preenchida com brita com a função de distribuí-la e evitar caminho preferencial no plano; 4ª etapa – após a canaleta de brita, a água é distribuída ao plano onde ficará armazenada temporariamente até sua infiltração no solo; 5ª etapa – a saída de emergência do plano pela crista do barramento. Mostra-se na Figura 28 o plano de infiltração construído e em funcionamento.

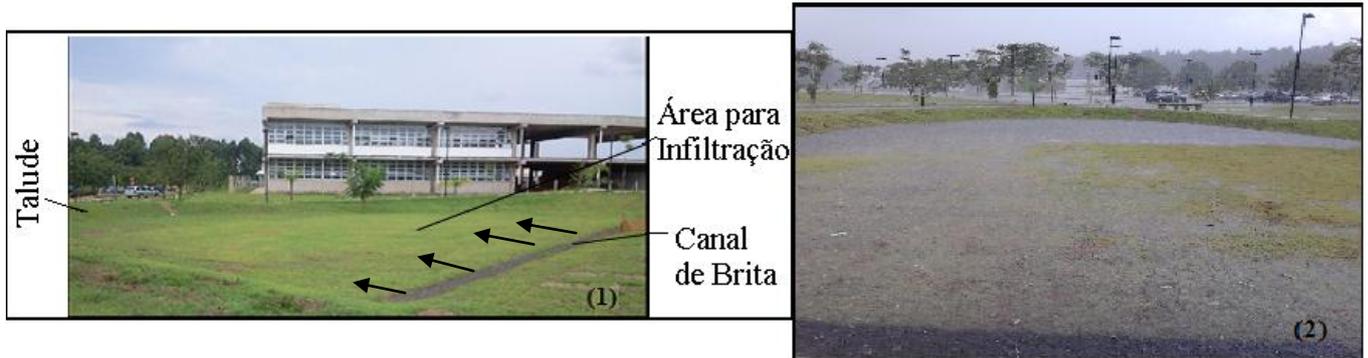


Figura 28 - Plano de Infiltração vazio (1) em funcionamento (2). Fonte: Grupo G-Hidro.

### 5.7 Calibração do Vertedor de 120° em laboratório

Nas Figuras 29 e 30 encontram-se os gráficos resultantes das calibrações realizadas em laboratório. O vertedor foi calibrado duas vezes obtendo-se pequenas vazões, isto devido às limitações das estruturas presentes no laboratório. Como resultado obteve-se um coeficiente de descarga ( $C_d$ ) igual 0,72. Com este  $C_d$ , a primeira calibração apresentou um erro percentual médio de 3,4% e a segunda de 13,3% da vazão teórica em relação a vazão de laboratório.

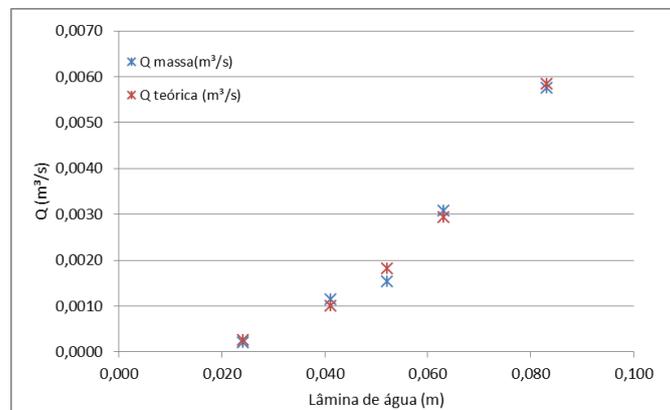
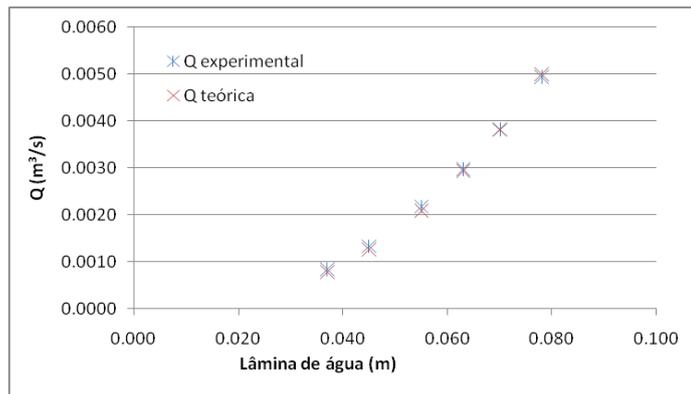


Figura 29 - Medidas da primeira calibração do vertedor em laboratório com  $C_d$  igual a 0,72 (27/05/2013).



**Figura 3031 - Medidas da segunda calibração do vertedor em laboratório com Cd igual a 0,72 (11/06/2013).**

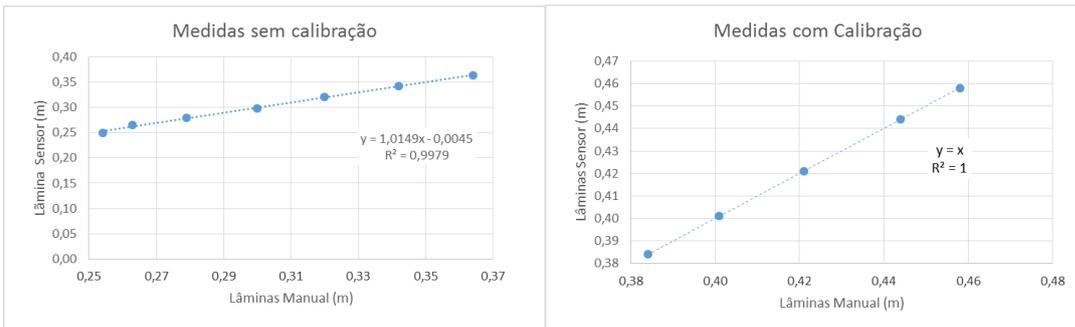
Adotou-se um Cd de 0,58, conforme Lencastre (1983), isto devido à calibração feita em laboratório ter sido realizada sem contração lateral, condição presente em campo, e conforme Porto (2006) a contração lateral diminui a vazão em até 20%. Streeter e Wylie (1958) afirmam que as contrações e perdas reduzem a vazão real a mais ou menos 60% da teórica. O resultado conseguido em laboratório variou 24%.

Outro fator considerável foi à altura do vertedor (p) ser inferior ao usualmente adotado na literatura, influenciando também na vazão. Posteriormente a instalação deste vertedor em campo foi realizado um ensaio de campo para se verificar a qualidade das medidas realizadas por este vertedor.

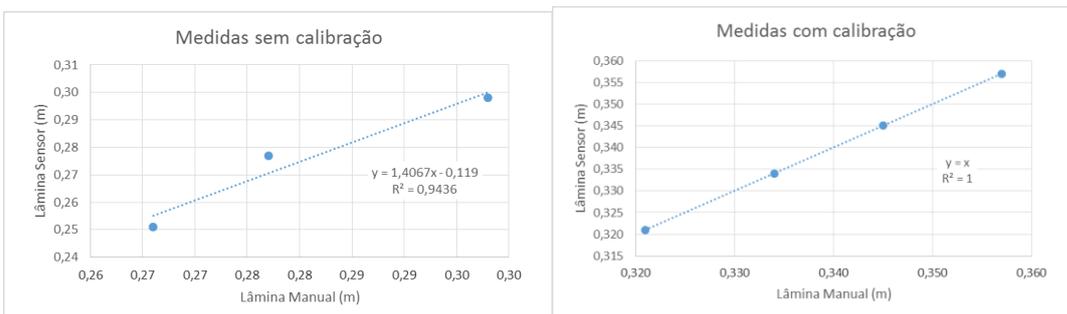
### **5.8 Calibração dos sensores de nível OTT em laboratório**

Os resultados dos testes para verificar as medidas dos níveis dos dois sensores de níveis OTT modelo Orpheus Mini realizado em laboratório são mostradas nas Figuras de 31 e 32.

Para a calibração dos sensores comparou-se as medidas disponibilizadas pelo sensor e as medidas realizadas manualmente através de uma régua graduada. O primeiro equipamento apresentou acurácia nas medidas de níveis com coeficientes de explicação de 0,99 e 1 respectivamente e o segundo com 0,94 e 1 respectivamente.



**Figura 32 – Resultado da calibração do sensor de nível através de medidas do sensor com medidas manuais para o equipamento com número de série 268331.**



**Figura 33 - Resultado da calibração do sensor de nível através de medidas do sensor com medidas manuais para o equipamento com número de série 268332.**

## 5.9 Ensaio de Campo com chuva Simulada

O objetivo deste ensaio, em triplicata, foi verificar em campo a qualidade das medidas dos níveis de água coletados a montante do plano de infiltração e de vazão pelo vertedor de 120°.

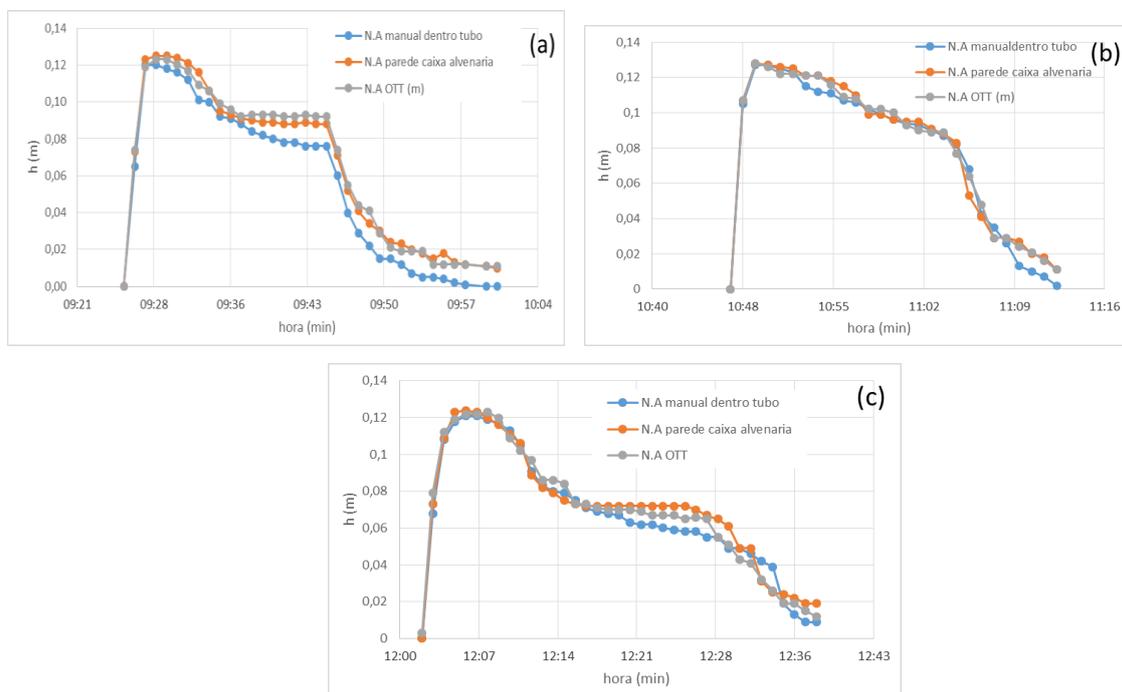
### 5.9.1 Medição do nível de água

Os resultados da medição dos níveis de água realizados a montante do vertedor de 120°, conforme descritos no item 4.7.4, são mostrados na Figura 34.

Representa-se na Figura 34(a) o primeiro ensaio realizado que apresentou um erro absoluto médio de 3mm e um erro máximo de 19mm entre os níveis de água nas réguas graduadas e o medido pelo sensor de nível. No segundo ensaio, Figura 34(b) o erro absoluto médio foi de 2mm e um erro máximo de 11mm. Já o terceiro ensaio, Figura 34(c) apresentou um erro absoluto médio de 4mm e um erro máximo de 13mm.

Outro resultado importante do ensaio foi a confirmação do zero da lâmina de água que corresponde a 5cm. Como o sensor de nível foi instalado em um tubo de PVC perfurado enterrado no solo 20 cm, o zero das medidas do sensor de nível corresponde a 25 cm. Observou-se que os zeros do sensor de nível e das réguas utilizadas, que correspondem ao nível de água da cota da crista do vertedor de 120°, mostraram valores menores que 1 mm.

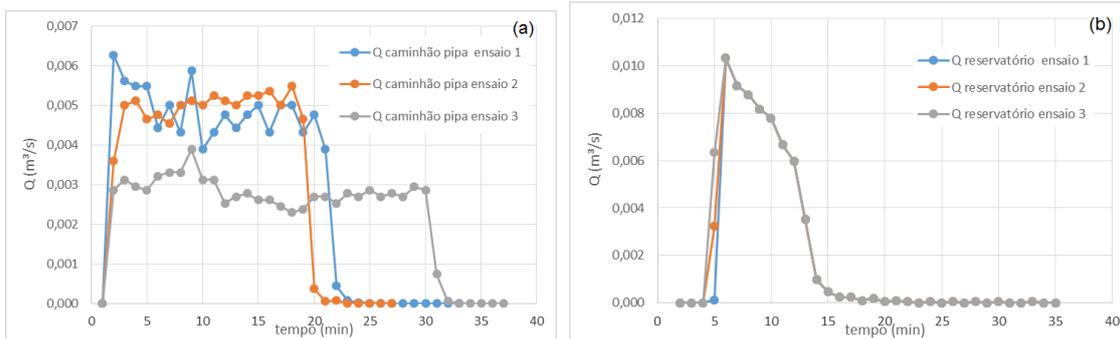
O sensor de nível instalado no interior do plano de infiltração não registrou variações nos níveis de água, isto porque o volume de água utilizado no ensaio não chegou até o final do plano, devido à alta taxa de infiltração do solo.



**Figura 34 – Linigramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa e reservatório de água dos três ensaios realizados.**

### **5.9.2 Verificação das vazões medidas pelo vertedor de 120°**

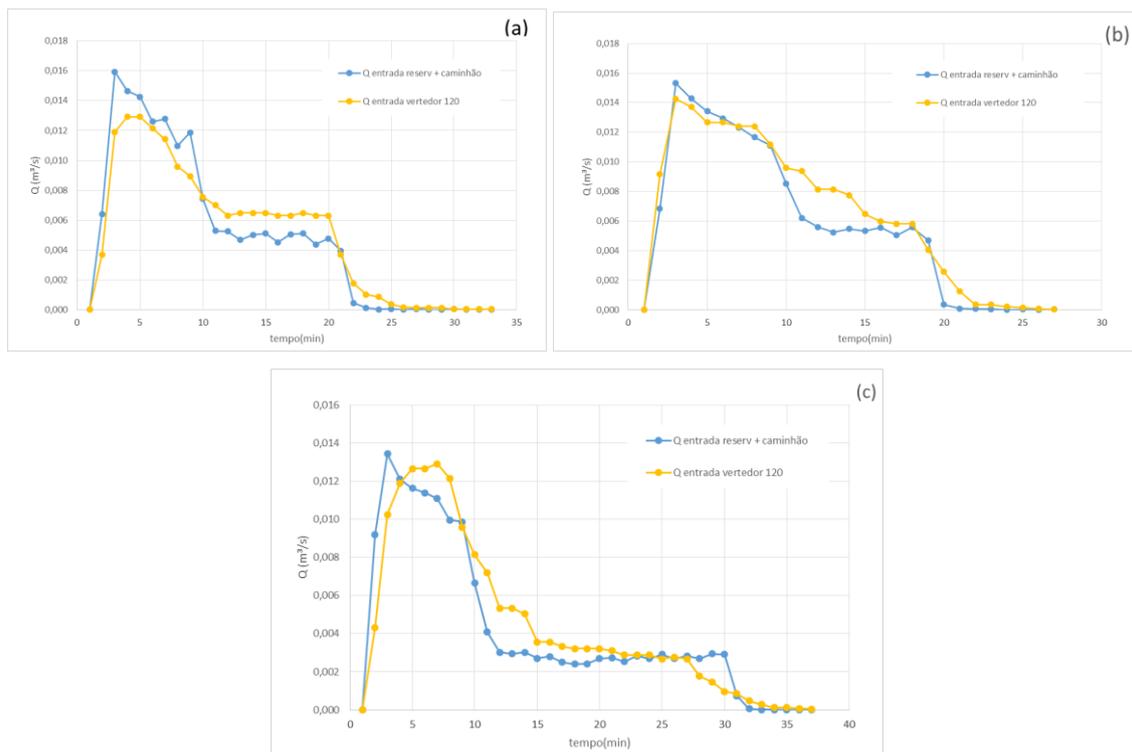
Para obter essas vazões nos três ensaios realizados lançaram-se volumes do reservatório de água de 4,1 m<sup>3</sup>, 4,3 m<sup>3</sup> e 4,5 m<sup>3</sup> e volumes de água no caminhão pipa de 5,5 m<sup>3</sup>, 5,0 m<sup>3</sup> e 4,6 m<sup>3</sup>, nos ensaios 1, 2 e 3 respectivamente. Apresenta-se na Figura 35 os hidrogramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa e do reservatório de água nos três ensaios realizados. Os hidrogramas gerados pelos esvaziamentos foram somados e apresentados na Figura 36, com volumes de 9,6 m<sup>3</sup>, 9,3 m<sup>3</sup> e 9,1 m<sup>3</sup>.



**Figura 35 – Hidrogramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa (a) e no reservatório de água (b)**

O primeiro ensaio, Figura 36(a), obteve-se um erro absoluto médio de 0,06 m<sup>3</sup> e um erro máximo de 0,24 m<sup>3</sup> entre as vazões calculadas pelo esvaziamento da caixa de água juntamente com o caminhão pipa com as vazões calculadas pelo vertedor de 120°. No segundo ensaio, Figura 36(b) o erro absoluto médio foi de 0,08 m<sup>3</sup> e um erro máximo de 0,55 m<sup>3</sup>. No terceiro ensaio, Figura 36(c), verificou-se um erro absoluto médio de 0,06 m<sup>3</sup> e um erro máximo de 0,29 m<sup>3</sup>.

Com relação a comparação dos volumes, o primeiro ensaio apresentou um erro absoluto percentual de 2,1%, o segundo ensaio de 12,0% e o terceiro de 7,2%, entre os volumes resultantes do esvaziamento da caixa de água juntamente com o caminhão pipa com os volumes calculados pelo vertedor de 120°, resultando em um erro absoluto percentual médio de 7,1%, valores aceitáveis para as análises hidrológicas realizadas.



**Figura 36 – Hidrogramas resultantes do esvaziamento do caminhão pipa e reservatório de água dos três ensaios realizados.**

### **5.9.3 Área de inundação do ensaio de campo**

O monitoramento do escoamento superficial e da formação de lâmina foi feito por meio de 113 fotos do plano desde o início do ensaio até o desaparecimento da lâmina formada. Para se ter alguma referência de área com lâmina o plano de infiltração foi estaqueado de 3m em 3m. Com isso constatou-se que a área de inundação do plano de infiltração é variável no tempo e também com relação a intensidade e a duração dos eventos de chuva, e que a água possui áreas preferenciais.

Estimou-se a área de inundação máxima (presença visual de lâmina), nos três ensaios, sendo de 90m<sup>2</sup> (9+27+27+18+9), conforme Figura 38. O processo para infiltração pode ser calculado como a diferença entre o início do escoamento (Figura 38(a)) e o desaparecimento de lâmina (Figura 38(d)), sendo neste caso de 24 minutos. Isto ocorre devido à alta taxa de infiltração do solo e a detenção e retenção superficial. Para os outros dois ensaios, o tempo de funcionamento do plano de infiltração foi de 25 (Figura 37) e 28 minutos (Figura 39). Com o volume de água destes três ensaios o PULS não funciona,

pois não se obteve lâmina de água no interior do plano que chegasse até onde está instalado o medidor de nível do plano de infiltração, conforme Tabela 6.



**Figura 37 – Ensaio de campo 1 com caixa de água e caminhão pipa: (a) início do ESD no plano (09:31), (b) momento com máxima área molhada (09:38), (c) final da infiltração no plano (09:56)**



**Figura 38 - Ensaio de campo 2 com caixa de água e caminhão pipa: (a) início do ESD no plano (10:52), (b) e (c) momento com máxima área molhada (10:59), (d) final da infiltração no plano (11:16)**



**Figura 39 - Ensaio de campo 3 com caixa de água e caminhão pipa: (a) início do ESD no plano (12:08), (b) momento com máxima área molhada (12:14), (c) final da infiltração no plano (12:36)**

**Tabela 6 - Resultados dos três ensaios de campos realizados**

<b>Ensaio</b>	<b>Volume lançado (m³)</b>	<b>Vol. cal. Vertedor 120° (m³)</b>	<b>Área inundada (m²)</b>	<b>Tempo funcionamento (min)</b>	<b>Observação</b>
<b>1</b>	9,6	9,8	Aprox. 90	25	Sem registro de lâmina no final do P.I
<b>2</b>	9,3	10,4	Aprox. 90	24	Sem registro de lâmina no final do P.I
<b>3</b>	9,1	9,8	Aprox. 90	28	Sem registro de lâmina no final do P.I

### **6.0 Monitoramento e Funcionamento do Plano de Infiltração**

O monitoramento das precipitações, vazões afluentes e dos níveis de água no plano de infiltração foi realizado de 16/12/2013 a 18/03/2014, conforme Tabela 7. No total foram monitorados trinta e dois eventos de chuvas, sendo que desses eventos sete obtiveram nível de água no plano de infiltração. Os eventos grifados na Tabela 7 são os que apresentaram nível de água no interior do plano.

**Tabela 7 – Resultado do monitoramento do plano de infiltração**

<b>Evento</b>	<b>Prec. (mm)</b>	<b>D (h)</b>	<b>I (mm/h)</b>	<b>H máximo (m)</b>	<b>Vol. prec. (m³)</b>	<b>Vol. escoado (m³)</b>	<b>c</b>	<b>tempo esvaz. (min)</b>	<b>Tr (anos)</b>	<b>t retardo (min)</b>	<b>t pico (min)</b>
16/12/2013	8,4	2,6	3,2	----	14,6	14,2	0,97	64	< 0,1	----	----
23/12/2013 24/12/2013	10,4	7,3	1,4	----	18,2	17,7	0,97	31	< 0,1	----	----
25/12/2013	1,2	0,1	12,0	----	2,1	1,3	0,63	129	< 0,1	----	----
26/12/2013	0,4	0,02	24,0	----	0,7	0,6	0,84	116	< 0,1	----	----
28/12/2013	2,4	0,1	28,8	----	4,2	3,9	0,92	115	< 0,1	----	----
30/12/2013	22,8	10,2	2,2	----	39,8	38,2	0,96	109	0,1	----	----
<b>31/12/2013</b>	<b>45,0</b>	<b>4,7</b>	<b>9,5</b>	<b>0,18</b>	<b>78,6</b>	<b>73,7</b>	<b>0,94</b>	<b>150</b>	<b>2,4</b>	<b>0,0</b>	<b>16,2</b>
01/01/2014 02/01/2014	1,6	3,4	0,5	----	2,8	2,09	0,75	146	< 0,1	----	----
<b>05/01/2014</b>	<b>17,1</b>	<b>0,4</b>	<b>68,8</b>	<b>0,12</b>	<b>29,8</b>	<b>29,0</b>	<b>0,97</b>	<b>71</b>	<b>0,32</b>	<b>0,3</b>	<b>18,5</b>

Evento	Prec. (mm)	D (h)	I (mm/h)	H máximo (m)	Vol. prec. (m³)	Vol. escoado (m³)	c	tempo esvaz. (min)	Tr (anos)	t retardo (min)	t pico (min)
14/01/2014	28,6	0,4	3,3	0,17	50,1	38,7	0,77	112	4,1	9,9	19,3
14/01/2014 15/01/2014	21,4	6,5	68,7	0,14	37,4	33,1	0,88	90	0,03	16,4	30,1
17/01/2014 18/01/2014	9,2	8,2	1,1	----	16,1	14,9	0,93	127	< 0,1	----	----
21/01/2014	0,6	0,02	36,0	----	1,1	1,0	0,94	77	< 0,1	----	----
23/01/2014	5,2	2,2	2,4	----	9,1	8,5	0,94	76	< 0,1	----	----
24/01/2014 25/01/2014	1,0	1,8	0,5	----	1,7	0,6	0,36	35	< 0,1	----	----
08/02/2014	21,8	0,8	27,3	----	38,1	37,9	0,99	58	0,3	----	----
14/02/2014	5,1	2,4	2,1	----	8,9	5,4	0,61	155	< 0,1	----	----
15/02/2014	2,8	2,4	1,2	----	4,9	1,8	0,37	65	< 0,1	----	----
16/02/2014	0,8	0,2	4,2	----	1,3	0,3	0,2	32	< 0,1	----	----
23/02/2014	5,8	18,1	0,3	----	10,2	3,7	0,36	12	< 0,1	----	----
24/02/2014	1,8	0,2	7,6	----	3,1	1,7	0,55	17	< 0,1	----	----
25/02/2014	1,8	1,9	0,9	----	3,1	0,9	0,30	14	0,02	----	----
25/02/2014 26/02/2014	7,6	2,8	2,7	----	13,3	3,0	0,23	17	< 0,1	----	----
28/02/2014	1,8	0,6	2,9	----	3,1	0,8	0,26	9	6,8	----	----
01/03/2014	5,8	1,0	5,6	----	10,2	7,7	0,76	8	0,03	----	----
04/03/2014	9,4	7,4	1,2	----	16,4	7,1	0,44	6	0,5	----	----
05/03/2014	5,6	0,9	6,1	----	9,7	2,4	0,25	15	< 0,1	----	----
07/03/2014	15,7	1,0	16,3	----	27,5	18,6	0,68	19	0,05	----	----
11/03/2014	4,3	4,6	0,9	----	7,5	2,2	0,30	12	< 0,1	----	----
12/03/2014	18,7	1,1	16,3	0,12	31,8	25,7	0,80	46	0,07	1,4	17,8
18/03/2014 18h	43,2	1,1	39,2	0,24	75,6	52,9	0,70	80	6,1	6,3	18,3
18/03/2014 21h	7,9	1,0	8,3	0,05	13,8	10,4	0,76	20	0,005	0,9	20,5

Os eventos que obtiveram nível de água no interior do plano de infiltração são mostrados na Tabela 8. Esses eventos foram apresentados em ordem decrescente do valor da precipitação.

**Tabela 8 – Eventos principais monitorados no plano de infiltração**

Evento	Precip. (mm)	Duração (hora)	N.A máximo (m)	Vol. prec. (m³)	Vol. esc. (m³)	t esvaz.(min)	Precip. antec. de 1 dia (mm)	Tr (anos)	t retardo (min)	t pico (min)	T "entrada" (min)
31/12/2013	45,0	4,7	0,18	78,6	73,7	150	22,8	2,4	2,7	16,2	4,8
18/03/2014 18h	43,2	1,1	0,24	75,6	52,9	80	-----	6,1	6,3	18,3	18,2
14/01/2014	28,6	0,4	0,17	50,1	38,7	112	-----	4,1	9,9	19,3	9,5
14/01/2014 15/01/2014	21,4	6,5	0,14	37,4	33,1	90	28,6	0,03	16,4	30,1	13,7
12/03/2014	18,7	1,1	0,12	31,8	25,7	46	4,3	0,07	1,4	17,8	16,3
05/01/2014	17,1	0,4	0,12	29,8	29,0	71	-----	0,3	0,3	18,5	11,9
18/03/2014 21h	7,9	1,0	0,05	13,8	10,4	20	43,2	0,005	0,9	20,5	11,1

Dos eventos monitorados o que apresentou maior altura precipitada foi o do dia 31/12/2013. Sua altura pluviométrica foi de 45,0 mm, intensidade de 9,5 mm/h, nível máximo de 0,18 m, período de retorno de 2,4 anos e precipitação antecedente de 22,8mm. Contudo o evento do dia 18/08/2014 –18h apresentou uma altura pluviométrica de 43,2 mm, intensidade de 39,2 mm/h, nível máximo de 0,24 m, período de retorno de 6,1 anos e precipitação antecedente nula. Observa-se ocorrência de maior nível de armazenamento para eventos com maior período de retorno, e nem sempre com maior altura pluviométrica.

Graciosa, Mendiondo e Chaudry (2005) advertem que a condição inicial de umidade do solo é um fator relevante. Neste caso verifica-se que não é sensível a influência da precipitação antecedente sobre os níveis de água no interior do plano de infiltração, isso devido à alta taxa de infiltração do solo.

O tempo de esvaziamento da estrutura é um parâmetro muito importante a ser considerado na concepção dos projetos das estruturas de infiltração, isto porque condiciona a capacidade da técnica de retornar sua característica de amortecimento do próximo evento. Quanto estes tempos são muito longos podem ocasionar a estagnação de água no local favorecendo o desenvolvimento de vetores de doenças (BAPTISTA *et al.*, 2011). Esses autores aconselham tempo de esvaziamento menor que 24 horas. O tempo de

esvaziamento máximo observado foi para o dia 31/12/2013 com o tempo de 150 minutos ou 2,5 horas.

O tempo de pico dos eventos foram consideráveis, variando de 16,2 a 30,1 minutos. Isso ocorre devido à grande área do plano de infiltração e a alta taxa de infiltração do solo.

De todos os eventos monitorados nenhum houve extravasão do plano de infiltração.

### **6.1 Modelagem das chuvas reais pelo Método de PULS**

AS modelagens foram realizadas considerando o valor de K do solo saturado e variável, conforme explicitado no item 4.9. Os resultados das modelagens são apresentados para os níveis observados e os níveis calculados ajustados.

Apresenta-se na Tabela 9 os resultados para as modelagens através do método de PULS para os principais eventos reais monitorados. Como se pode observar o método não representou adequadamente os eventos reais, com um  $R^2$  variando de 0,34 a 0,91 para os valores de K saturado e de 0,35 a 0,91 para os valores com K variável. Otimizando-se os níveis de água através da variação dos valores de K, obtêm-se variação de  $R^2$  de 0,55 a 0,92 para K saturado e de 0,56 a 0,92 para K variável. Os valores de K para essa otimização variam de 162 mm/h a 427mm/h.

O motivo pelo qual o método de Puls não representou bem os níveis observados até iniciar o registro de lâmina pelo sensor atribui-se à alta taxa de infiltração do solo, à grande área de infiltração associada à detenção e retenção superficial como abordado nos testes de campo, ao fato da água possuir áreas preferenciais, percebidas nos ensaios de campo realizados (item 5.9), mostrando que o plano não é linear em sua extensão e também a canaleta preenchida com brita localizada no início do plano de infiltração que funciona como uma trincheira de infiltração que detém de 22% a 52% do volume total escoado. Isto explica também o valor elevado dos tempos de picos, pois grande parte do início do escoamento superficial acaba infiltrando na trincheira.

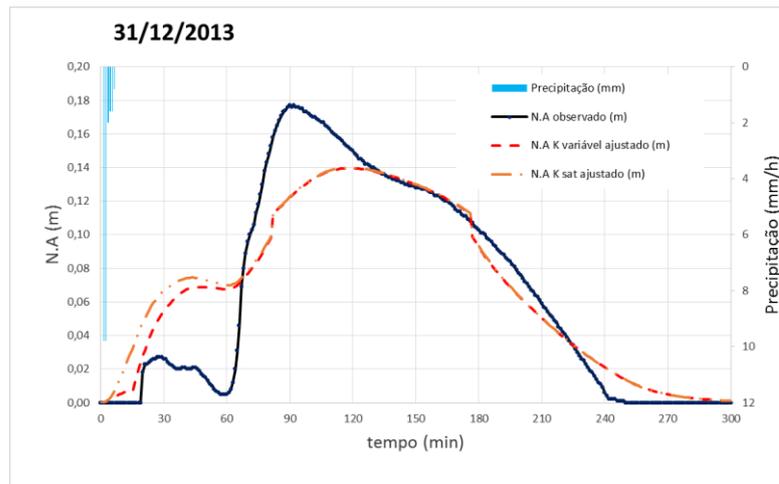
O método de Puls também não representa os ensaios realizados (item 5.9), pois não havia registro de lâmina de água, porém havia água infiltrando no plano, ou seja, não existe uma relação direta entre nível de água e área de infiltração nesta técnica; o mesmo ocorre com as chuvas reais.

Comparando-se os níveis de água para o K saturado constante e variável, o K variável foi o que melhor representa os eventos reais, pois a taxa de infiltração inicial e final do solo é alta e não contemplada no K saturado constante, diminuindo assim os níveis de água.

**Tabela 9 - Resultados da modelagem pelo método de PULS para os principais eventos reais com níveis de água otimizados**

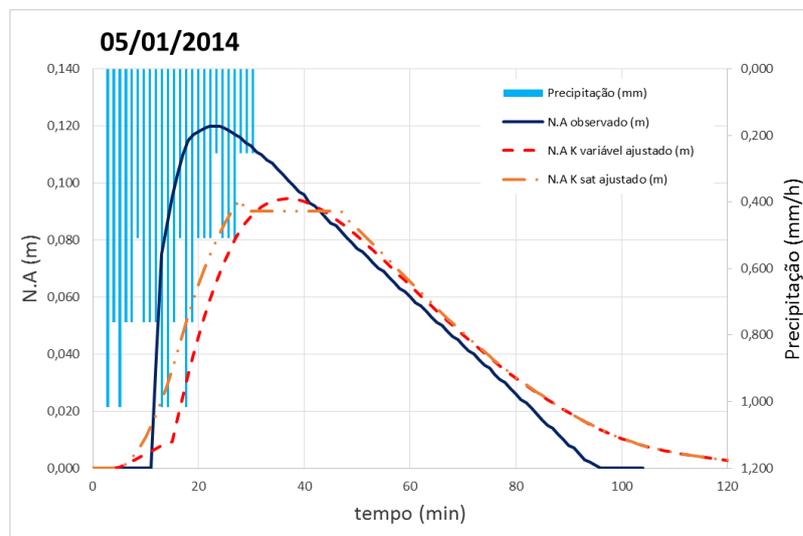
Evento	N.A Máx. exp. (m)	N.A Máx. K cons (m)	Erro		N.A máx. K var. (m)	Erro		T esv. Obs. (min)	T esv. Cal. (min)	Erro (%)
			R <sup>2</sup> - Pico	Pico		R <sup>2</sup> - Pico	Pico			
31/12/2013	0,18	0,14	0,84	0,4	0,14	0,86	0,4	150	197	31
05/01/2014	0,12	0,10	0,63	0,2	0,09	0,78	0,2	80	101	26
14/01/2014	0,17	0,14	0,75	0,3	0,14	0,85	0,3	112	142	26
14/01/2014 15/01/2014	0,14	0,12	0,92	0,2	0,12	0,92	0,2	90	147	63
12/03/2014	0,12	0,08	0,55	0,4	0,08	0,56	0,4	46	85	84
18/03/2014 18h	0,24	0,19	0,74	0,5	0,19	0,79	0,5	71	75	6
18/03/2014 21h	0,05	0,02	0,73	0,03	0,02	0,73	0,03	20	60	200

O primeiro evento de chuva monitorado com nível no plano de infiltração foi em 31 de dezembro de 2013. Este evento teve um total precipitado de 45,0 mm e o nível máximo do plano foi de 0,18 m. O gráfico da modelagem deste evento com níveis de água otimizados é apresentado na Figura 40. Os valores de K otimizado para este evento foram de 326,4 mm/h e 153 mm/h (Ksat).



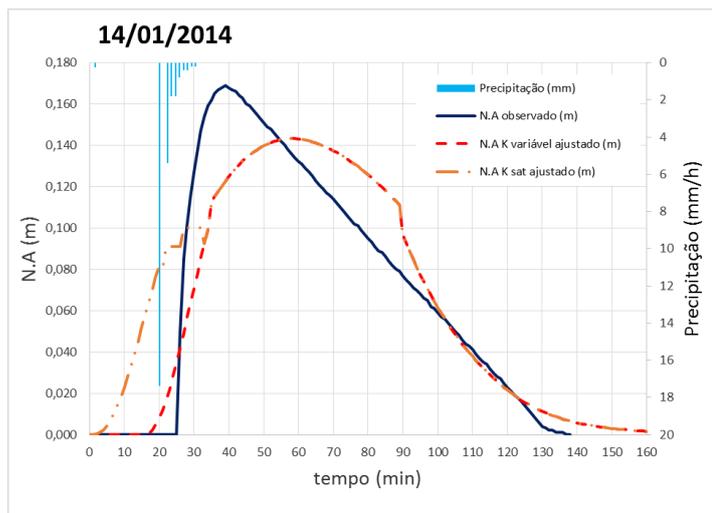
**Figura 40 - Modelagem do evento 1 para o nível máximo de 0,18 m e precipitação de 40,5 mm.**

O evento 2 ocorreu no dia 05 de janeiro de 2014, com um total precipitado de 17,1 mm e um nível máximo de 0,12 m. O gráfico da modelagem deste evento com níveis de água otimizados é apresentado na Figura 41. Os valores de K otimizado para este evento foram de 391,6 mm/h e 198 mm/h (Ksat).



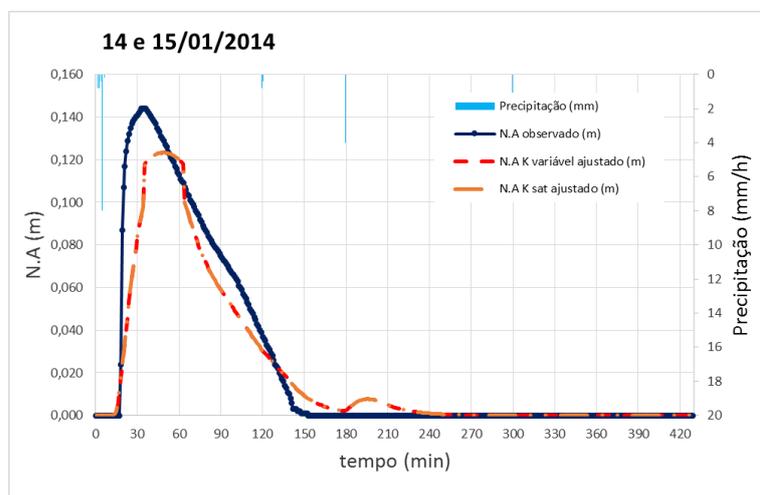
**Figura 41 - Modelagem do evento 2 para o nível máximo de 0,12 m e precipitação de 17,1 mm.**

O evento 3 ocorreu no dia 14 de janeiro de 2014, com o total precipitado de 28,6 mm e um nível máximo de 0,17 m. O gráfico da modelagem deste evento com níveis de água otimizados é apresentado na Figura 42. Os valores de K otimizado para este evento foram de 391,6 mm/h e 198 mm/h (Ksat).



**Figura 42 - Modelagem do evento 3 para o nível máximo de 0,17 m e precipitação de 28,6 mm.**

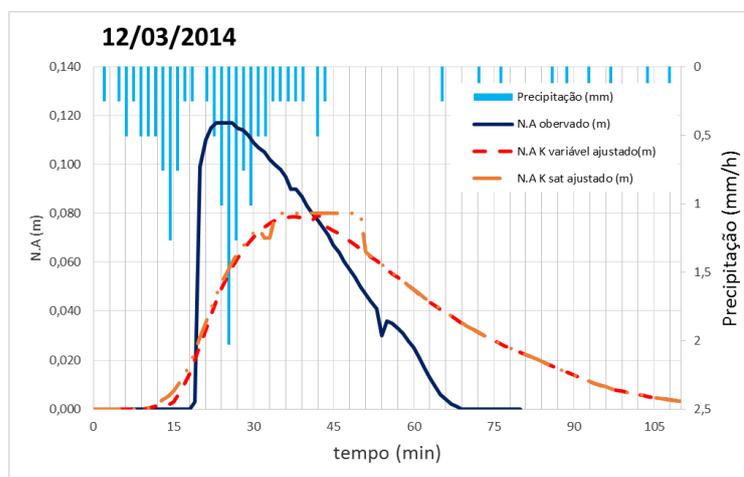
O evento 4 ocorreu nos dias 14 e 15 de janeiro de 2014, com o total precipitado de 21,4 mm e um nível máximo de 0,14 m. O gráfico da modelagem deste evento com níveis de água otimizados é apresentado na Figura 43. Os valores de K otimizado para este evento foram de 320,4 mm/h e 162 mm/h (Ksat).



**Figura 43 - Modelagem do evento 4 para o nível máximo de 0,14 m e precipitação de 21,4 mm.**

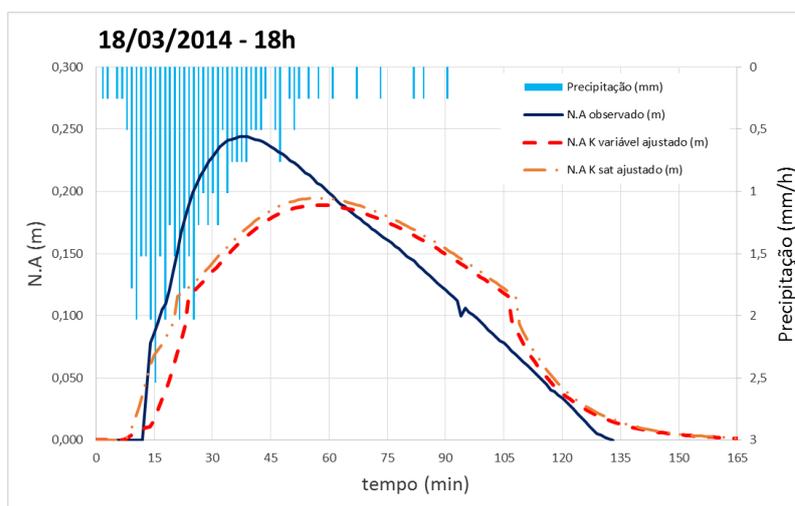
O evento 5 foi no dia 12 de março de 2014, com o total precipitado de 18,3 mm e um nível máximo de 0,12 m. O gráfico da modelagem deste evento

com níveis de água otimizados é apresentada na Figura 44. Os valores de K otimizado para este evento foram de 427,2 mm/h e 216 mm/h (Ksat).



**Figura 44 - Modelagem do evento 5 para o nível máximo de 0,12 m e precipitação de 18,3 mm.**

O evento 6 foi no dia 18 de março de 2014 – 18h, com o total precipitado de 43,2 mm e um nível máximo de 0,24 m. O gráfico da modelagem deste com níveis de água otimizados evento é apresentado na Figura 45. Os valores de K otimizado para este evento foram de 427,2 mm/h e 216 mm/h (Ksat).



**Figura 45 - Modelagem do evento 6 para o nível máximo de 0,24 m e precipitação de 43,2 mm.**

O evento 7 foi no dia 18 de março de 2014 – 21h, com o total precipitado de 7,9 mm e um nível máximo de 0,05 m. O gráfico da modelagem deste evento com níveis de água otimizados é apresentado na Figura 46. Os valores de K otimizado para este evento foram de 427,2 mm/h e 216 mm/h (Ksat).

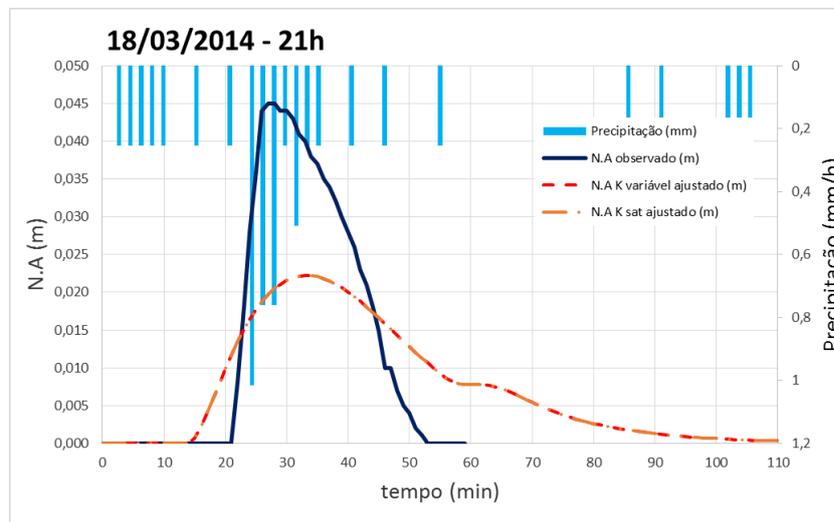


Figura 46 - Modelagem do evento 7 para o nível máximo de 0,05 m e precipitação de 7,9 mm.

## 6. CONCLUSÕES

O plano de infiltração foi projetado, dimensionado e construído em escala real para controlar o escoamento superficial direto de uma área impermeabilizada do prédio da Fisioterapia da UFSCar e uma área de expansão entre o prédio e o dispositivo, somando uma área de 3.001,3 m<sup>2</sup>.

A análise adotada para a escolha da técnica compensatória a ser implantada na microbacia foi criteriosa e atendeu seis aspectos físicos, três aspectos urbanísticos e de infraestrutura, dois aspectos sanitários e ambientais e dois aspectos socioeconômicos, potencializando o sucesso do projeto e reduzindo problemas construtivos devido a interferências com infraestrutura e minimizando custos.

O dimensionamento do plano de infiltração foi realizado com um valor de K saturado de 135mm/h de um local a 100m e com um coeficiente de segurança de 2 que reduz a taxa de infiltração pela metade. Com recuperação da capacidade de infiltração do solo do local da construção, o valor de K saturado, obtido por ensaio de duplo anel, foi de 180mm/h, resultando em uma permeabilidade maior que a de projeto, fazendo com que a técnica ficasse dimensionada super.

A construção do plano exigiu cuidados na preservação do volume e das características do solo previstas em projeto. Verificou-se importante a interação com os construtores no sentido de explicar o funcionamento da técnica.

Os custos para a construção do plano de infiltração foram de R\$ 8.500,29, resultando em R\$ 76,34/m<sup>3</sup>. Esse custo, como esperado, foi menor em relação a outras técnicas mais utilizadas como os poços de infiltração com um custo de 256,26/m<sup>3</sup> e as trincheiras de infiltração com 150,22/m<sup>3</sup> (valores segundo Baptista *et al.*, 2011 e atualizados de agosto de 2012, data da construção da técnica), isto devido a esta técnica envolver pequena movimentação de terra e poucos materiais para sua construção.

Com os ensaios realizados em campo com chuva simulada constatou-se que as medidas registradas pelo sensor de nível OTT e pelo vertedor de 120° são satisfatórias, pois apresentaram um erro máximo de 3mm para as lâminas de água e 0,06 m<sup>3</sup> para vazões, valores aceitáveis para as análises hidrológicas realizadas.

Durante três meses de monitoramento (dezembro de 2013 a março de 2014) foram analisados 32 eventos de chuvas, com 7 eventos registrando níveis de água no plano de infiltração. Isso ocorreu devido à alta taxa de infiltração do solo, a grande área de infiltração disponível na técnica compensatória e ao canal de brita localizado no início do plano de infiltração que funciona como uma trincheira de infiltração detendo até 52% do volume escoado.

Em nenhum evento houve extravasamento da técnica, mostrando-a eficiente na redução do escoamento superficial direto. Contudo em todos os eventos o período de retorno das chuvas é menor que o período de retorno adotado no dimensionamento da estrutura.

O modelo de Puls foi considerado difícil de ser aplicado nesta técnica, isto devido à grande área de infiltração do plano, a alta taxa de infiltração do solo que dificulta saber ao certo qual é a área de infiltração em cada lâmina de água, a detenção e retenção superficial e a trincheira de infiltração a montante do plano. Além também do fato da água possuir áreas preferenciais, mostrando que o plano não é linear em sua extensão. Com os ensaios de campo realizados percebeu-se que não há uma relação direta entre lâmina de água e área de infiltração. Devido a esses fatores os ajustes dos níveis de água otimizados calculados pelo método de Puls com os níveis de água observados não foram muito satisfatórios, variando entre 0,55 a 0,92.

Com relação a mudança do K saturado constante para variável, conclui-se que o K variável representa melhor as situações reais, pois ele contempla a alta taxa de infiltração inicial do solo e a variação desta taxa no tempo.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, V. A., NASCIMENTO, N., BAPTISTA, M. Avaliação da eficiência de sistemas alternativos de drenagem urbana de águas pluviais. In: **VI Encontro Nacional de Águas Urbanas CREA-MG** – Belo Horizonte, 18 a 20 de maio de 2005.

ANGELINI SOBRINHA, L. **Monitoramento e modelagem de um poço de Infiltração de águas pluviais em escala real e Com filtro na tampa**. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 2012.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.5, n.3, p.21-29, jul/set. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT,1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457: Preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e ensaios de caracterização:método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT,1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos** – Terminologia. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT,1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182: Ensaio de Compactação**. 1986b.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre. ABRH, 2011. 2ª Ed. 318 p.

BARBASSA, A. P. **Simulação do Efeito da Urbanização sobre a Drenagem Pluvial da Cidade de São Carlos, SP**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, USP, EESC, São Carlos, 1991.

BARROS, M.T.L. **Drenagem Urbana: Bases conceituais e Planejamento**. In: PHILIPPI JR., A. Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável. São Paulo: Coleção Ambiental. p. 221-265, 2005.

BICHANÇA, M. F. **Bacias de Retenção em zonas urbanas como contributo para a resolução de situações extremas: cheias e secas**. Porto. Dissertação (Faculdade de Engenharia) – Universidade do Porto, 2006.

BOURGOGNE, P. **25 ans de solutions compensatoires d'assainissement pluvial sur la communauté urbaine de Bordeaux**. Novatech, 2010.

BRITO, D. S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. Brasília. Dissertação (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, 2006.

BRUNO, L. O.; AMORIM, R. S. S.; SILVEIRA, A. P. Estudo da Redução do Escoamento Superficial Direto em Superfícies Permeáveis. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.18, n.2, p.237-247, abr/jun. 2013.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**. Londres: St Edmundsbury Press., 489 p., 2000.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARVALHO, E. T.L. **avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na zona norte da cidade de Goiânia.** Goiânia. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, 2008.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem.** Porto Alegre: PRONI/IPH-UFRGS, s/d. 216p.

Certu. (Centre d'études sur les reseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques). (1998). **“Techniques alternatives aux reseaux d'assainissement pluvial: éléments clés pour leur mise em oeuvre.”** Edition du CErtu. Lyon, França. 155p.

CHAHAR, B. R., GRAILLOT, D., GAUR, S. Stormwater management through infiltration trenches. Journal of Irrigation and Drainage Enggineering. ASCE – American Society of Civil Engineers. Vol 138. 274-281p. 2012.

CUDWORTH, Jr. A. G. **Flood Hydrology Manual: A water resources technical publication.** Surface Water Branch: Earth Sciences Division, 1 ed. United States Department of the Interior, 1989.

DAYWATER. Report 5.1. **Review of the use of stormwater BMPs in Europe.** Disponível em: [www.daywater.org](http://www.daywater.org), 98p., 2003.

DECHESNE, M. Connaissance et modélisation du fonctionnement des bassins d'infiltration d'eaux de ruissellement urbain pour l'évaluation des performances technique et environnementale sur le long terme. **Thèse.** INSA de Lyon. Lyon, França. 275p. + anexos, 2002.

DECHESNE, M., BARRAUD, S., BARDIN, J. **“Experimental assessment of stormwater infiltration basin evolution.”** J. Environ. Engrg ., ASCE, Vol. 131(7), 1090-1098. 2005.

ELLIS, J. B.; GREEN, C.; REVITT, D. M. **Identifying success factors in urban surface water BMP implementation: Mission impossible?**. Novatech, 2010.

FELIPE, M.C.; **Avaliação e modelagem matemática da remoção de material particulado em canal gramado construído em escala real no campus UFSCar, São Carlos – SP. São Carlos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 2014.

FRENI, G.; MANNINA, G.; VIVIANI, G. **Evaluation of the effect of soil type on the infiltration trench clogging: a long term approach**. Novatech, 2010.

FUAMBA, M.; WALLISER, T.; DAYNOU, M.; ROUSSELLE, J. **Methodology Selection of Best Management Practices and Economic Analysis: A Case study in Quebec, Canada**. Novatech, 2010.

GONZALEZ-MERCHAN, C.; BARRAUD, S.; LE COUSTOMER, S.; FLETCHER, T. **Monitoring of clogging evolution in the infiltration system**. Novatech, 2010.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M. Dimensionamento de uma trincheira de infiltração para o controle do escoamento superficial em lote residencial urbano. **VI Encontro Nacional de Águas Urbanas. ABRH. USP – São Carlos/SP, 2007**.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Avaliação da eficiência de trincheiras de infiltração como dispositivos de controle na origem das águas pluviais urbanas – considerações técnicas de dimensionamento para planos diretores. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 16, 2005. João Pessoa. Anais...João Pessoa: ABRH, 2005, p.1-11.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Metodologia para dimensionamento de trincheiras de infiltração para controle do escoamento superficial na origem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n.2, p. 207-214, 2008<sub>a</sub>.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Simulação hidráulica para trincheiras de infiltração de águas pluviais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 13 n.2, pp. 89-99. 2008<sub>b</sub>.

GUITERREZ, L. A. R. ; LUCAS, A. H. ; OLIVEIRA JUNIOR, C. X. ; BARBASSA, A. P. **Efeito da variação do coeficiente de permeabilidade no volume de uma trincheira de infiltração**. In: Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2009, Maringá. Anais do II simpósio de pós-graduação em engenharia urbana, 2009.

GUTIERREZ, L. A. R. **Avaliação da qualidade da água da chuva de um sistema Filtro-Vala- Trincheira de infiltração no tratamento do escoamento superficial direto predial em escala real em São Carlos – SP**. 198 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, SP. 2011.

HERNANDEZ, V. Propagação de Enchentes em Reservatórios - Método Direto. **In: RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. vol. 12, n.2. pp. 115-122, 2007.

HOLZ, J.; TASSI, R. Usando estruturas de drenagem não convencionais em grandes áreas: o caso do loteamento Monte Bello. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVII., 2007, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: RHAMA, 2007. Disponível em: <<http://www.rhama.net/download/artigos/artigo56.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2012.

JORGE, F. N. e UEHARA, K. (2001). “Água de Superfície”. In: Oliveira, A. M. S. e BRITO, S. N. A. (editores). **Geologia de Engenharia**. 2ª impressão. São Paulo. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 101 -109.

KOBAYASHI, F. Y.; FAGGION, F. H. M.; BOSCO, L. M. del.; CHIRINEA, M. L. B. **Drenagem Urbana Sustentável**. In: PHD 2537 – Água em Ambientes Urbanos. Escola Politécnica de São Paulo, 2008.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral**. Edição do Autor, 1983. 641p.

LUCAS, A. H. **Monitoramento e Modelagem de um sistema Filtro – Vala – Trincheira de infiltração em escala real**. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 2011.

MARICATO, E. **Dimensões da tragédia urbana**. Disponível em: [http://www.usp.br/fau/deprojeto/labhab/biblioteca/textos/maricato\\_tragediaurbana.pdf](http://www.usp.br/fau/deprojeto/labhab/biblioteca/textos/maricato_tragediaurbana.pdf). Acesso em 29 Jan 2013.

MARTIN, C.; RUPERD, Y.; LEGRET, M. Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. **European Journal of Operational Research** **181(2007)**, p. 338–349. 2006.

MATOS, M. R. S. Gestão integrada de águas pluviais em meio urbano: visão estratégica e soluções para o futuro. **Teses e Programas de Investigação LNEC**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC. Lisboa, Portugal, 2000.

MOURA, T. A. M. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle de escoamento superficial em ambientes urbanos**. Brasília. Dissertação (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, 2005.

PHILIPPI JR., A.; MALHEIROS, T.F. Saneamento e Saúde Pública: Integrando Homem e Ambiente. In: PHILIPPI JR., A. **Saneamento, Saúde e Ambiente**:

Fundamentos para um desenvolvimento sustentável. São Paulo: Coleção Ambiental. p. 3-31, 2005.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC/USP, 540 p, 2006.

REIS, R. P. A; OLIVEIRA, L. H.; SALES, M. M. Avaliação de poço de infiltração de água pluvial como sistema de drenagem na fonte. **In: VI Encontro Nacional de Águas Urbanas. CREA MG**. Belo Horizonte, MG. 2005.

REIS, R. P. A; OLIVEIRA, L. H.; SALES, M. M. Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de água pluvial. **In: Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 99-117, abr./jun. 2008.

REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P. Manejo de Águas Urbanas e sua Relação com o Desenvolvimento Urbano em Bases Sustentáveis Integradas — Estudo de Caso dos Rios Pilar-Calombé, em Duque de Caxias/RJ. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.18, n.2, p.149-163, abr/jun. 2013.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs**. Department of Environmental Programs. Washington Metropolitan Water Resources Planning Board. 1987.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Mecânica Dos Fluídos**. Mc Graw-Hill. 1958, 585p.

SILVA, J. P. **Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração**. Brasília. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, 2007.

SOUZA, G. M. ; ROMUALDO, S.S. . **Inundações Urbanas: A Percepção Sobre a Problemática Socioambiental pela Comunidade do Bairro Jardim Natal Juiz de Fora (MG)**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física

Aplicada, 2009, Viçosa. A geografia física e as dinâmicas de apropriação da natureza, 2009.

SOUZA, V. C. B. ; GOLDENFUM, J. A. . Trincheiras de infiltração como elemento de controle do escoamento superficial: um estudo experimental. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte : ABRH, 1999.

SOUZA, V. C. B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. (Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 127p. 2002.

SOUZA PINTO, Carlos de. **Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 247p. 2000.

STU ET AGENCES DE L'EAU. **Guide Technique des Bassins de Retenue d'Eaux Pluviales**. Technique et Documentation. Ed. Lavoisier. Paris, França. 276 p. 1994.

STU. **Réconcilier l'Eau et la Ville para la Maîtrise des Eaux Pluviales**. Les Editions Du STU. Paris, França. 64 p. 1991.

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

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. In: **Água Doce**. 1997. Cap. 14.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade. 669 p. 1998.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A.. **Curso de Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica**. Ministério do Meio ambiente Secretaria de Qualidade Ambiental. Rhama consultoria Ambiental, 2006.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Overview of performance by BMP category and common pollutant type, In: International Stormwater Best Management Practices (BMP) Database (1999-2008), Washington, D.C. June, 2008.

URBONAS, B.R. **Assessment of Stormwater Best Management Practice Effectiveness**. In: FIELD, R.; HEANEY, J. P.; PITT, R. Innovative Urban Wet-Weather Flow Management Systems. 1993. P. 7-1 – 7-46.

URBONAS, B; STAHERE, D. **Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

VIEIRA, L.; SILVA, A.; NASCIMENTO, N. O. Avaliação da Eficiência Hidráulica de Duas Técnicas Alternativas de Drenagem Urbana - Estudo de Caso de Um Trecho da Bacia do Mergulhão na Pampulha. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009, Campo Grande. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2009.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. McGraw-Hill, 1975. 248 p.

## Anexo 1: Planilha de custos da construção do Plano de Infiltração

Item	DESCRIÇÃO	Qte	UN	UNITÁRIO	TOTAL	TOTAL-ÍTEM
<b>1</b>	<b>SERVIÇOS PRELIMINARES / TÉCNICOS</b>					<b>2.818,71</b>
<b>1.1</b>	<b>Limpeza do terreno</b>					
1.1.2	Limpeza de terreno com raspagem mecanizada com raspagem de camada vegetal (Bacia de Drenagem)	384,69	m <sup>2</sup>	0,47	180,80	
1.1.3	Carga e descarga mecanizada de entulho em caminhão de 6m <sup>3</sup>	90,88	m <sup>3</sup>	0,69	62,71	
1.1.4	Remoção de entulho transporte em caminhão basculante de 6m <sup>3</sup> , para distâncias superiores a 4 Km (8 km ) - m <sup>3</sup> Xkm	2960,00	m <sup>3</sup> xkm	0,87	2.575,20	
<b>2.</b>	<b>SERVIÇOS COMPLEMENTARES</b>					<b>2.084,73</b>
<b>2.1</b>	<b>Canal de escoamento de águas pluviais</b>					
<b>2.1.1</b>	<b>Escavação e reaterro de valas</b>					
2.1.1.1	Escavação manual de valas rasas canaletas, até 1,50m sem escoramento, conformação das canaletas de águas pluviais/ passagens sob calçadas	0,58	m <sup>3</sup>	35,02	20,31	
<b>2.1.2</b>	<b>Escavação mecanizada</b>					
2.1.2.1	Escavação mecânica em solo exeto rocha até 2,00m de profundidade	303,95	m <sup>3</sup>	1,58	480,24	
<b>2.1.3</b>	<b>Aterro</b>					
2.1.3.1	Aterro manual do talude com compactação mecânica com reutilização de solo	70,03	m <sup>3</sup>	5,08	355,75	
<b>2.1.4</b>	<b>Regularização</b>					
2.1.4.1	Regularização e conformação da valeta	3,92	m <sup>2</sup>	3,14	12,31	
<b>2.1.5</b>	<b>Caixas de drenagem</b>					
2.1.5.1	Brita 02 caixa de drenagem, material e espalhamento.	3,10	m <sup>3</sup>	76,94	238,51	
2.1.5.2	Execução de manta geotextil para caixa de brita 300g/m <sup>2</sup>	25,83	m <sup>2</sup>	9,16	236,60	
	Vertedor				566,00	
	Materail de construção para parede de alvenaria				175,00	
<b>3</b>	<b>PAISAGISMO /URBANIZAÇÃO</b>					<b>3.596,85</b>
<b>3.1</b>	<b>Plantio de grama</b>					
3.2.1	Fornecimento e plantio de grama esmeralda em rolos, inclusive terra vegetal	384,69	m <sup>2</sup>	9,35	3.596,85	
<b>Total (R\$)</b>					<b>8.500,29</b>	