

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Urbana

**ANÁLISE DE DISPOSITIVOS HIDROLÓGICOS DE
INFILTRAÇÃO COM MODELAGEM POR DINÂMICA DE
SISTEMAS APLICADA EM SÃO CARLOS-SP**

MARIA NATÁLIA SARAN

São Carlos
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Urbana

**ANÁLISE DE DISPOSITIVOS HIDROLÓGICOS DE
INFILTRAÇÃO COM MODELAGEM POR DINÂMICA DE
SISTEMAS APLICADA EM SÃO CARLOS-SP**

MARIA NATÁLIA SARAN

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.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Jadyr L. Costa

São Carlos

2024

RESUMO

Durante a urbanização a preocupação com a drenagem urbana foi insuficiente, de modo que os efeitos podem ser observados pela crescente ocorrência de inundações. Na tentativa de diminuir esses impactos nas cidades, surgem as técnicas de controle de inundações, e em seguida técnicas compensatórias de drenagem, como as técnicas de controle no lote. Nesse contexto, um dos dispositivos mais comuns é o poço de infiltração, uma estrutura que tem como objetivo auxiliar na infiltração de água pluvial incidente em um lote. No que diz respeito à modelagem hidrológica, as técnicas mais utilizadas para o cálculo da diminuição de vazão de jusante são os métodos de iteração, os quais podem ser resolvidos através da implementação de métodos numéricos em planilhas eletrônicas. No entanto, devido à complexidade da implementação desses métodos nesse tipo de planilha, esse caminho é por vezes pouco usual, e o projetista acaba buscando a implementação de soluções analíticas, quando existentes. No entanto, se houver a possibilidade de resolver esse tipo de problema através do uso de métodos numéricos, de forma segura e simplificada, isso pode abrir o leque de opções para as formas de resolução, e também, por outro lado, tornar mais usual o uso de métodos numéricos com aplicações diversas dentro da área da ciência hidrológica. Sendo assim, com a finalidade de melhorar os cálculos, e obter maior facilidade e compreensão para o(a) hidrólogo(a), esse trabalho buscou por meio dos fundamentos da Dinâmica de Sistemas, e com o uso do Software Vensim, uma forma de modelagem de problemas através de uma interface mais simples e amigável, quando comparado com o uso de planilhas eletrônicas. Além da construção do modelo hidrológico de infiltração em ambiente de Dinâmica de Sistemas, foram realizados levantamento de dados através de experimentos em campo para a calibração do modelo, com uso de um novo infiltrômetro, além de comparar resultados a partir de condições assumidas por outros autores. Considera-se que o modelo teve um comportamento satisfatório para as condições que foram analisadas.

ABSTRACT

ANALYSIS OF HYDROLOGICAL INFILTRATION DEVICES USING SYSTEM DYNAMICS MODELING APPLIED IN SÃO CARLOS-SP

During urbanization, the concern with urban drainage was insufficient, so that the effects can be observed by the increasing occurrence of floods. In an attempt to reduce these impacts in cities, flood control techniques emerge, and then compensatory drainage techniques, such as lot control techniques. In this context, one of the most common devices is the infiltration well, a structure that aims to assist in the infiltration of rainwater incident on a lot. With regard to hydrological modeling, the most used techniques for calculating the decrease in downstream flow are iteration methods, which can be solved through the implementation of numerical methods in electronic spreadsheets. However, due to the complexity of implementing these methods in this type of spreadsheet, this path is sometimes unusual, and the designer ends up seeking to implement analytical solutions, when they exist. However, if there is the possibility of solving this type of problem through the use of numerical methods, in a safe and simplified way, this can open up the range of options for resolution methods, and also, on the other hand, make the use of numerical methods with diverse applications within the area of hydrological science. Therefore, with the purpose of improving calculations, and obtaining greater ease and understanding for the hydrologist, this work sought through the fundamentals of Systems Dynamics, and with the use of Vensim Software, a way of modeling problems through a simpler and more user-friendly interface when compared to the use of electronic spreadsheets. In addition to building the hydrological infiltration model in a Systems Dynamics environment, data were collected through field experiments to calibrate the model, using a new infiltrometer, in addition to comparing results based on conditions assumed by other authors. It is considered that the model performed satisfactorily for the conditions that were analyzed.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa, por sua orientação, ensinamentos e apoio.

À Prof. Dra. Anaí Floriano Vasconcelos (UFSCar) e ao Prof. Dr. Stênio de Sousa Venâncio (UFTM), por suas contribuições na etapa de qualificação.

Ao Técnico Carlos Eduardo Radaik pelo apoio técnico prestado na construção do poço de infiltração.

Ao Prof. Dr. Ademir Pacelli Barbassa (*in memoriam*), por suas considerações após a etapa de qualificação, e pelos ensinamentos durante esta trajetória.

Aos meus pais, pelo apoio, carinho e paciência, e ao meu pai por me acompanhar até São Carlos, todas as vezes necessárias.

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos.

À todos os meus amigos, que acompanharam este processo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
3. JUSTIFICATIVA	13
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1. URBANIZAÇÃO E A DRENAGEM URBANA	14
4.2. INUNDAÇÕES URBANAS.....	16
4.3. CONTROLE DE INUNDAÇÕES	18
4.4. RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO.....	19
4.5. TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	20
4.5.1. Técnicas compensatórias lineares	20
4.5.1.1. Pavimentos Porosos	20
4.5.2. Técnicas de Controle na Fonte	24
4.5.2.1. Telhados Armazenadores	24
4.6. POÇOS DE INFILTRAÇÃO.....	27
4.7. INFILTRAÇÃO	29
4.8. MODELOS.....	29
4.9. MÉTODOS NUMÉRICOS	30
4.10. USO DO RUNGE-KUTTA NA HIDROLOGIA	32
4.11. USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS NA HIDROLOGIA	33
4.12. POTENCIALIDADES	34
5. METODOLOGIA	35
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
5.2. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	36
5.2.1. Poço de Infiltração P-SC	36
5.2.2. Vazão de Entrada	37
5.2.3. Vazão de Saída	40
5.3. ENSAIO DE INFILTRAÇÃO	41
5.3.1. Concepção do Infiltrômetro	41
5.3.2. Construção e Montagem do Infiltrômetro	46
5.3.3. Ensaio de Infiltração	50
5.4. ENSAIO DE COMPORTAMENTO DA ÁGUA	50
5.4.1. Experimento 1 – Abertura parcial do registro	55

5.4.2. Experimento 2 – Abertura total do registro.....	56
5.4.3. Tratamento dos dados	56
5.5. MODELAGEM MATEMÁTICA	58
5.5.1. Equações de Saída por Infiltração	58
5.6. MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	60
5.6.1. Métodos de Runge-Kutta	60
5.6.1.1. Método de Euler – Runge-Kutta de 1ª Ordem.....	60
5.6.1.2. Método de Heun – Runge-Kutta de 2ª Ordem.....	61
5.6.1.3. Runge-Kutta de 3ª Ordem.....	61
5.6.1.4. Runge-Kutta de 4ª Ordem	61
5.6.2. Dinâmica de sistemas	62
5.6.3. Vensim.....	63
5.6.4. Modelo de Simulação Dinâmica	67
5.6.4.1. Diagrama de Relações Causais	68
5.6.4.2. Diagramas de Estoques e Fluxos	69
5.6.4.3. Determinação das equações.....	70
5.6.4.4. Simulação	70
5.7. CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS.....	71
6. RESULTADOS	72
6.1. ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO.....	72
6.1.1. Nível de água a 30cm da base	72
6.1.2. Nível de água a 60cm da base	73
6.1.3. Nível de água a 90cm da base	75
6.1.4. Nível de água a 117,50cm da base	76
6.1.5. Comparação dos níveis de água.....	77
6.2. ENSAIO DO COMPORTAMENTO DA ÁGUA	78
6.2.1. Experimento 1 – Abertura parcial do registro	79
6.2.2. Experimento 2 – Abertura total do registro.....	81
6.3. MODELAGEM E SIMULAÇÕES	83
6.3.1. Verificação e Calibração do Modelo	83
6.4. MODELO DO VENSIM PARA O POÇO DE INFILTRAÇÃO	86
7. CONCLUSÕES	89
8. SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	90
REFERÊNCIAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Hidrológico	14
Figura 2 – Micro-drenagem	15
Figura 3 - Diferença entre Inundação e Enchente	17
Figura 4 - Evento de inundação na cidade de São Carlos - SP.....	17
Figura 5 - Hidrograma do Reservatório de Detenção	19
Figura 6 - Modelo de Pavimento Permeável.....	21
Figura 7 - Esquemas de Vala de Infiltração.....	22
Figura 8 - Esquema de Vala de detenção	23
Figura 9 - Trincheira de Infiltração.....	24
Figura 10 - Estrutura de Telhado Armazenador	25
Figura 11 - Estrutura de Telhado Vegetado	25
Figura 12 - Microreservatórios.....	26
Figura 13 - Plano de Infiltração UFSCar - São Carlos.....	27
Figura 14 - Modelo de poço de infiltração	28
Figura 15 - Resolução dos Modelos Matemáticos.....	32
Figura 16 - Localização dos pontos de estudo	36
Figura 17 - Poço de Infiltração P-SC.....	37
Figura 18 - Área de Contribuição do Poço de Infiltração	38
Figura 19 - Ligação da Rede predial de águas pluviais ao poço de infiltração.....	39
Figura 20 - Dimensões Reservatório de PVC de 2.000L.....	40
Figura 21 - Poço simulado.....	42
Figura 22 - Materiais para o poço teste	42
Figura 23 - Construção do Poço Teste.....	43
Figura 24 - Poço Teste	44
Figura 25 - Desenho Orientativo do Infiltrômetro.....	45
Figura 26 – Cilindro de acrílico Graduado	47
Figura 27 - Infiltrômetro	48
Figura 28 – Estrutura de Manutenção de nível.....	48
Figura 29 - Medidas de Nível de água.....	49
Figura 30 – Visualização de água no interior do infiltrômetro	49
Figura 31 - Dimensões Reservatório 100 litros.....	51
Figura 32 - Reservatório 100 litros com medição de nível por sensor ultrassônico..	51

Figura 33 - Sensor instalado no poço teste	52
Figura 34 - Representação da montagem do experimento	53
Figura 35 - Sistema de Teste para determinação da altura de água	53
Figura 36 - Sistema completo	54
Figura 37 – Tela inicial do Arduino - Código utilizado.....	55
Figura 38 - Posições das variáveis	57
Figura 39 - Elementos da Dinâmica de Sistemas.....	63
Figura 40 - Tela de início do software	64
Figura 41 - Unidades e Tempo de simulação	64
Figura 42 - Técnicas de integração	65
Figura 43 - Inserção de Variáveis.....	66
Figura 44 - Comandos pós simulação	67
Figura 45 - Comandos de Simulação	67
Figura 46 - Diagrama de Relações Causais.....	68
Figura 47 - Modelagem do Poço de Infiltração no Vensim	70
Figura 48 - Posicionamento da boia $h=0,30m$	72
Figura 49 - Posicionamento da boia $h=0,60m$	74
Figura 50 - Posicionamento da boia $h=0,90m$	75
Figura 51 - Posicionamento da boia $h=117,5m$	76
Figura 52 - Gráfico de Vazão de Infiltração em relação ao nível de água	78
Figura 53 – Nível de água do Reservatório	79
Figura 54 - Nível de água do Reservatório - Experimento 1	80
Figura 55 - Nível de água do poço teste.....	81
Figura 56 - Nível de água do Reservatório.....	81
Figura 57 - Nível de água do reservatório - Experimento 2	82
Figura 58 - Nível de água no poço teste.....	83
Figura 59 - Comparativo dos níveis de água para o experimento 1 no poço teste...84	
Figura 60 - Comparativo dos níveis de água para o experimento 2 no poço teste...85	
Figura 61 - Gráfico de nível do Vensim	87
Figura 62 - Comparação de nível para o poço real	88

1. INTRODUÇÃO

Durante a urbanização das cidades brasileiras ocorreu primeiro a ocupação das zonas mais baixas próximas às várzeas dos rios, e logo essas áreas foram incorporadas no sistema viário a partir da canalização dos cursos de água (CANHOLI, 2005).

Com este fator ocorreu a impermeabilização do solo através da camada asfáltica tanto nas áreas de várzea, quanto, com o decorrer dos anos, nas áreas altas ocasionando por consequência o aumento da vazão máxima e a aceleração do escoamento superficial, que seguem o relevo natural do solo, levando a água para as áreas mais baixas, ocupadas pelos cursos d'água, causando em muitos casos, inundações nestes pontos (TUCCI, 1993).

O conceito de drenagem aplicado durante a urbanização e o crescimento de muitas das cidades brasileiras, foi o conceito higienista, também denominado de “sistema clássico de drenagem”. Nele, é recomendado a rápida destinação das águas pluviais para longe dos centros urbanos, através de canalizações e condutos subterrâneos. Esse sistema, no entanto, apenas transfere os problemas de inundação para jusante, e com o crescimento das cidades e implantação de novas áreas urbanizadas, causa ocorrências de inundações mais constantes nas novas áreas urbanas, exigindo novas obras de drenagem (BAPTISTA *et al*, 2015).

Na década de 1970 surge os conceitos de técnicas compensatórias de drenagem urbana, tratando-se de tecnologias alternativas ao sistema convencional, com o objetivo de compensar os impactos gerados, no sistema hidrológico, pela urbanização (BAPTISTA *et al*, 2015; CANHOLI, 2005).

Dentre as técnicas compensatórias, são apresentadas, as técnicas de controle na fonte, tratando-se de pequenos dispositivos localizados próximos dos pontos de geração de escoamento, retendo um certo volume de água e facilitando a infiltração (CANHOLI, 2005).

Com as recentes mudanças climáticas agravando riscos de catástrofes relacionadas a água, devido ao aumento da frequência e intensidade de chuvas extremas (MARENGO *et al*, 2021), o estudo hidrológico se torna ainda mais necessário para o contexto urbano. O conhecimento de técnicas de redução de volume escoado, de aumentos nos tempos de concentração da bacia, que buscam a

manutenção das características de pré-urbanização, são cada vez mais importantes para o planejamento.

Uma das formas de manutenção das características de pré-urbanização está ligada ao aumento da capacidade de infiltração das áreas urbanizadas, mantendo a redução da parcela do volume precipitado, que infiltra, no ciclo hidrológico, e que devido a impermeabilização do solo havida sido reduzida consideravelmente.

O controle e diminuição da parcela de água escoada, ainda no lote, é de grande importância no contexto urbano. Uma vez que a manutenção da contribuição de cada lote, para a parcela de água escoada superficialmente, na mesma intensidade que no período de pré-urbanização, diminui a parcela que será transportada pela macro drenagem, reduzindo os riscos de inundações de pontos de jusante e necessidade de obras grandiosas de drenagem.

A compreensão da infiltração do solo, como sua capacidade, velocidade, caracterização, são de suma importância para a determinação das estruturas compensatórias que poderão ser utilizadas em um local, sendo determinantes para a escolha, ou não de técnicas que se baseiam na infiltração.

Uma destas técnicas é o chamado poço de infiltração, que tem como objetivo reduzir as vazões de pico e os volumes de água nas cidades, através de um armazenamento temporário e infiltração das águas (TUCCI, 1993; BAPTISTA *et al*, 2015).

A capacidade de redução do volume de escoamento superficial urbano gerado por uma estrutura compensatória é um dos seus principais pontos de estudo. Esta determinação se dá através de um balanço de massa, entre os volumes de entrada e saída da estrutura e conseqüentemente de seus níveis de reservação. Este equacionamento comumente é resolvido através de modelos.

Os modelos numéricos são ferramentas de resolução de equações diferenciais que tem como objetivo reduzir a matemática avançada para operações básicas, através de iterações. Os métodos mais conhecidos são os de Runge-Kutta, especificamente o de 4ª ordem, que apresenta uma alta precisão (CHAPRA; CANALE, 2011; VALLE, 2012).

A utilização do modelo se dá através de cálculo de equações em passos de tempo e iterações. De forma a tornar mais simples a resolução destas equações pode-se utilizar uma técnica conhecida como dinâmica de sistemas, que se trata da

resolução de sistemas e modelos através do conceito de retroalimentação e utiliza-se de uma interface mais simples e intuitiva do processo.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da água em um poço de infiltração através de um modelo de simulação dinâmica, o Software Vensim PLE.

Objetivos específicos:

1. Determinação ou escolha das equações que governam o comportamento hidrológico analisado;
2. Implementação das relações de causa e efeito;
3. Construção dos modelos com uso da dinâmica de sistemas, considerando os princípios de conservação da massa no âmbito do balanço hídrico;
4. Validação dos modelos a partir de dados obtidos experimentalmente e considerando os resultados de outros autores.

3. JUSTIFICATIVA

Estruturas de controle de inundações consistem em dispositivos com o objetivo de diminuir o volume escoado e reduzir chances de inundações. Devido a crescente necessidade de sistemas como esses, nas cidades brasileiras, o conhecimento dos fundamentos da propagação de cheias e sua aplicação é necessário para aprimorar o entendimento da eficácia das estruturas quando empregados no campo.

As técnicas de cálculo mais difundidas tratam-se de métodos de iteração utilizando-se calculadoras e planilhas com o objetivo de construção de tabelas para o posterior desenho de gráficos. Ressalta-se que esses passos exigem um esforço que sujeita todo o processo a erros humanos.

Trazer esse processo para a linguagem computacional reduz a ocorrência de erro humano, porém como consequência a torna mais difícil de ser aplicada devido a falta de conhecimento específico de programação de muitos profissionais. A técnica da dinâmica de sistemas trata-se de uma forma mais amigável e facilita a compreensão do processo sem a necessidade de conhecimento na programação utilizada para a determinação dos passos de cálculo, o que simplifica utilização da vertente computacional.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

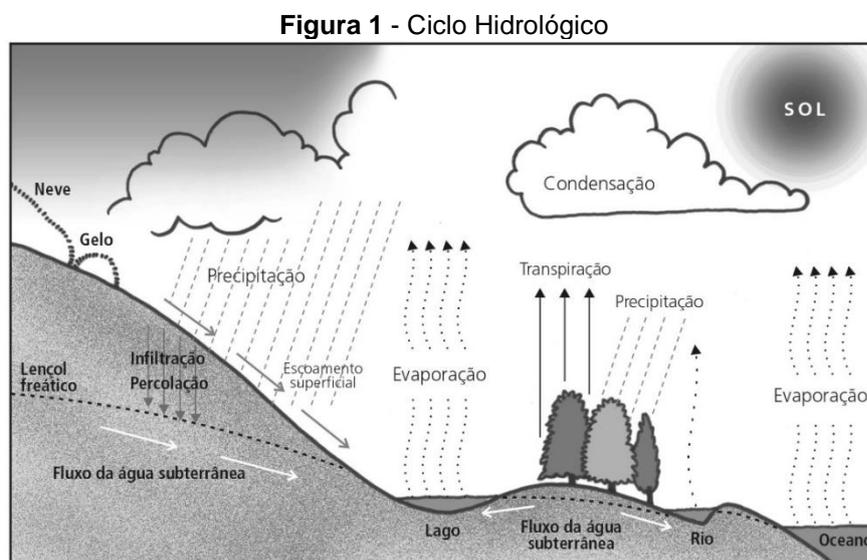
4.1. URBANIZAÇÃO E A DRENAGEM URBANA

A urbanização consiste na ocupação e transformação do espaço físico, que passa de natural para urbanizado, durante esta transformação, principalmente no início, há a supressão de vegetação, impermeabilização do solo, canalização de corpos hídricos, fatos esses que interferem diretamente com a drenagem urbana da região (TUCCI, 2007b).

O processo de instalação da população em aglomerados urbanos deu-se próximo a corpos hídricos, em zonas mais baixas, pela necessidade de água para consumo, higiene e transporte (BAPTISTA *et al*, 2015; CANHOLI, 2015).

A urbanização implica em mudanças significativas no meio ambiente, e por consequência no ciclo hidrológico. Naturalmente o ciclo hidrológico ocorre de forma que a água presente em corpos hídricos e áreas vegetadas sofrem o processo de evapotranspiração, o vapor proveniente deste processo é transportado e sob condições adequadas e condensado, formando nuvens que geram a precipitação. A água precipitada possui três destinos principais: ser interceptada pela vegetação ou retida no solo próxima ao local onde caiu, infiltrar no solo (parcela que alimenta o lençol de água subterrâneo) e escoar superficialmente em direção aos corpos hídricos (ANA, 2014a).

Pode-se observar na Figura 1 abaixo, a representação simplificada de um ciclo hidrológico.



Fonte: Fundação CECIERJ, 2011

Com a urbanização, mudanças foram sendo observadas neste ciclo, a primeira delas foi a redução das áreas vegetadas, com a supressão das matas nativas para a construção das cidades, reduzindo assim a parcela de transpiração e de interceptação da precipitação. Concomitantemente a isto houve a impermeabilização do solo, com as construções e pavimentação, impedindo assim a infiltração da água precipitada. Com a supressão de dois destinos da água precipitada há consequentemente um aumento do terceiro destino, implicando em aumento do escoamento superficial de águas pluviais (BAPTISTA *et al*, 2015; CHOW, 1988).

Durante o processo de urbanização, devido a um caráter higienista dos responsáveis pela drenagem, principalmente após o século XIX, entendia-se que a água proveniente de precipitação deveria ser evacuada de forma rápida para pontos a jusante, utilizando-se de condutos artificiais, principalmente subterrâneos. Devido a isso um grande volume de água era levado ao corpo hídrico em um curto período de tempo, implicando muitas vezes em uma sobrecarga deste corpo, levando a inundações nestes pontos (CANHOLI, 2015; BAPTISTA *et al*, 2015; CHOW, 1988).

Segundo Baptista *et al* (2015), o caráter higienista continua sendo aplicado até os dias atuais, e é conhecido como “sistema clássico de drenagem”. Esse sistema divide-se em macro e micro-drenagem, em que a micro-drenagem, consiste de sarjetas, bocas de lobo e condutos, e é responsável pela captação da água precipitada e transporte até o sistema de macro-drenagem, constituída de canais abertos e condutos enterrados de grande porte (galerias). Como apresentado na Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Micro-drenagem



Fonte: Adaptado de ASSEMAE, 2015

Na década de 1970, o conceito de tecnologias alternativas ou compensatórias de drenagem tomaram forma, com o intuito de compensar e corrigir os efeitos da urbanização, tomando as bacias hidrológicas como objeto de estudo, facilitando a infiltração e elevando o tempo de concentração da bacia através de métodos de armazenamento temporários (BAPTISTA *et al*, 2015; TUCCI, 2008).

Após 1990, iniciou-se o desenvolvimento de políticas de desenvolvimento sustentável urbano, baseando-se no tratamento das águas pluviais urbanas e conservação do escoamento. A base para este desenvolvimento de uso de solo é urbanizar-se uma área mantendo os caminhos naturais do escoamento e priorizando a infiltração. A denominação desta fase é de desenvolvimento sustentável (TUCCI, 2008).

Tabela 1 - Fases do desenvolvimento das Águas Urbanas

Fase	Características	Conseqüências
Pré-higienista: até início do século XX	Esgoto em fossas ou na drenagem, sem coleta ou tratamento e água da fonte mais próxima, poço ou rio.	Doenças e epidemias, grande mortalidade e inundações.
Higienista: antes de 1970	Transporte de esgoto distante das pessoas e canalização do escoamento.	Redução das doenças, mas rios contaminados, impactos nas fontes de água e inundações.
Corretiva: entre 1970 e 1990	Tratamento de esgoto doméstico e industrial, amortecimento do escoamento.	Recuperação dos rios, restando poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental.
Desenvolvimento sustentável: depois de 1990	Tratamento terciário e do escoamento pluvial, novos desenvolvimentos que preservam o sistema natural.	Conservação ambiental, redução das inundações e melhoria da qualidade de vida.

Fonte: Tucci, 2008

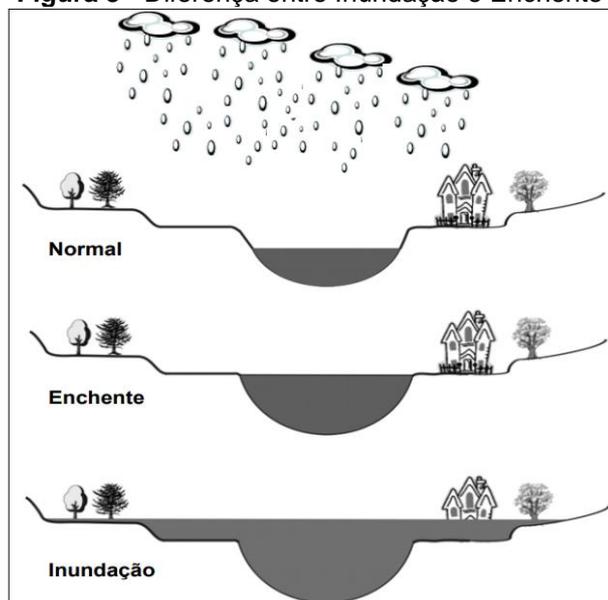
4.2. INUNDAÇÕES URBANAS

Existem duas nomenclaturas normalmente utilizadas com o mesmo significado, enchentes e inundações, entretanto estas possuem significados diferentes. Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de desastres naturais (COBRADE), enchentes é a elevação das águas de um rio sem o seu transbordamento, enquanto inundações são caracterizadas como a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso

d'água, em áreas que não se encontram submersas, esse transbordamento é aquele que ocorre de modo gradual sendo ocasionado normalmente por chuvas prolongadas em áreas de planície.

Essa diferença pode ser observada na Figura 3, abaixo.

Figura 3 - Diferença entre Inundação e Enchente



Fonte: Goerl e Kobiyama, 2005

Os impactos causados por esses eventos são sentidos em todos os eixos da sociedade, desde no poder público, com a degradação de vias e passeios, à propriedade privada, de comerciantes e moradores das áreas afetadas. Diante de todo esse cenário, são necessárias novas soluções para adequação dos sistemas existentes, de modo a evitar as inundações que começam a ocorrer (TUCCI, 1993).

Figura 4 - Evento de inundação na cidade de São Carlos - SP



Fonte: G1 São Carlos e Araraquara, dia 28/12/2022

Cidades cortadas por cursos de água sujeitos a grandes variações de vazões em tempos relativamente curtos, tornam-se extremamente vulneráveis aos trágicos eventos de inundação, com prejuízos enormes à economia e de alto risco de perdas de vidas humanas (RIGHETTO, 2009).

Com o objetivo de diminuir as consequências causadas pelas inundações surgem as medidas de gestão de inundações (CANHOLI, 2005).

4.3. CONTROLE DE INUNDAÇÕES

O Controle de inundações tem como objetivo prevenir os danos, tanto das inundações, nos sistemas de drenagem e na infraestrutura urbana a jusante, quanto do aumento da velocidade de escoamento, da vazão de pico e dos volumes de desenvolvimento a jusante (TUCCI, 2007b).

Tucci (1999) propõe princípios de controle, que seriam essenciais para um bom desenvolvimento de programa de controle de inundações. Um destes princípios seria a concepção de um plano de drenagem urbana, como parte do plano de desenvolvimento urbano das cidades, que deve contemplar a bacia hidrográfica em que a cidade está inserida, como um todo, e garantir que não haja a transferência de nenhum impacto gerado para outras bacias hidrográficas. Sua regulamentação deve também abranger o planejamento das áreas da cidade a serem desenvolvidas (novos loteamentos) e a possível densificação de áreas atualmente ocupadas.

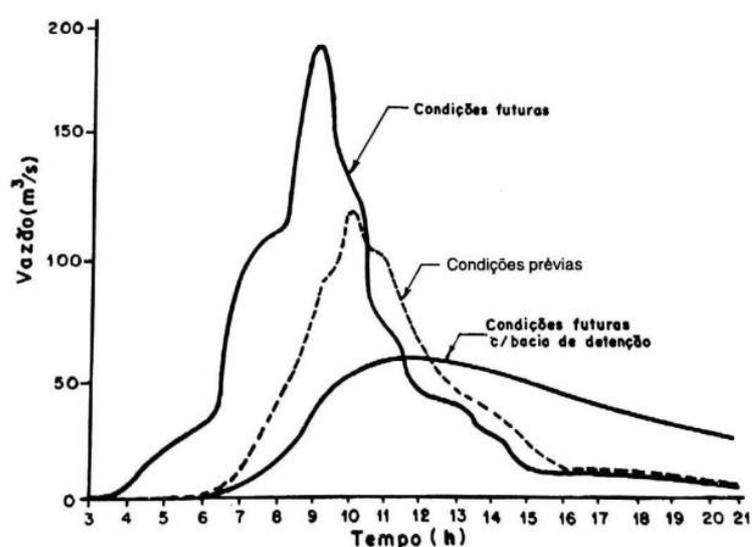
Outro ponto importante é a afirmação de que cada usuário do sistema urbano não pode aumentar a cheia natural, ou seja, o escoamento gerado durante as chuvas não deve ser maior, devido a ocupação, do que era no período pré-urbanização (TUCCI, 1999).

As medidas de controle de inundação podem ser classificadas como estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são obras hidráulicas que visam corrigir ou prevenir problemas decorrentes de enchentes, são exemplos, diques, barragens, canalizações. As medidas não estruturais são medidas de tipo preventivo, que tem por objetivo reduzir os danos ou consequências das inundações, como zoneamentos de áreas inundáveis, sistemas de alertas e seguros (TUCCI, 2007a; CANHOLI, 2015).

4.4. RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO

Reservatórios de retenção são responsáveis pelo armazenamento de águas pluviais controlando seu escoamento, eles têm como objetivo reduzir os picos de hidrograma das bacias hidrográficas e reduzir a necessidade de ampliação da rede de drenagem através do retardo dos volumes escoados. Esse fenômeno pode ser observado no hidrograma da Figura 5 (TUCCI, 1993; BUTLER, 2018).

Figura 5 - Hidrograma do Reservatório de Detenção



Fonte: Tucci, 1993

Segundo Chow (1988), o conceito de se deter um escoamento superficial e liberá-lo segundo uma taxa pré-determinada é de suma importância para a gestão das águas pluviais urbanas. Afinal este método reduz os picos de vazão e a energia cinética do escoamento, e conseqüentemente pode reduzir a erosão do solo e o carregamento de contaminantes que são agregados e transportados pelo escoamento urbano.

A diminuição de intensidade de cheias ao passarem por um reservatório é denominado de amortecimento de cheias ou laminação de cheias (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

De forma geral as bacias de retenção são projetadas para controlar as conseqüências de chuvas locais de curta duração e grande intensidade, sendo chuvas com essas características as causadoras de inundações em pequenos cursos de água (TUCCI, 1993).

4.5. TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

Segundo Baptista *et al* (2015), o conceito de técnica compensatória está ligado a redução de vazão e volumes através de armazenamento ou infiltração de águas pluviais. O principal objetivo é a reorganização temporária das vazões e a diminuição do volume escoado, ocasionando a redução da probabilidade de inundações e eventuais ganhos na qualidade das águas pluviais.

Tratam-se de medidas não convencionais que atuam no controle de fonte ou de lote, com o intuito de preservar a bacia urbana em suas condições de pré-urbanização ou em vazões de restrição, de forma a reduzir os impactos causados pela urbanização e controlar o escoamento superficial próximo de onde é gerado (FERREIRA, 2016).

As técnicas compensatórias podem ser definidas segundo dois critérios distintos, pelo princípio de funcionamento e pela posição de implantação do dispositivo. Ao classificar-se as técnicas segundo seu funcionamento, têm-se a divisão em estruturas de infiltração ou de retenção, entretanto não é incomum que ocorra uma combinação destes métodos em uma mesma estrutura (BAPTISTA *et al*, 2015).

O que faz surgir uma segunda classificação, considerando-se o local de sua aplicação, nesta, distingue-se as técnicas entre, técnicas lineares e técnicas de controle na fonte.

4.5.1. Técnicas compensatórias lineares

As técnicas lineares são utilizadas para grandes áreas drenadas, nesta definição se enquadram, pavimentos porosos, valas de retenção ou infiltração, trincheiras de infiltração, entre outros. (BAPTISTA *et al*, 2015).

4.5.1.1. Pavimentos Porosos

Os pavimentos porosos são técnicas de aumento de permeabilidade do solo urbano. Essas estruturas possuem porosidade e permeabilidade suficientemente altas a ponto de influenciarem na hidrologia com efeito positivo ao ambiente (VIRGILIIS, 2009).

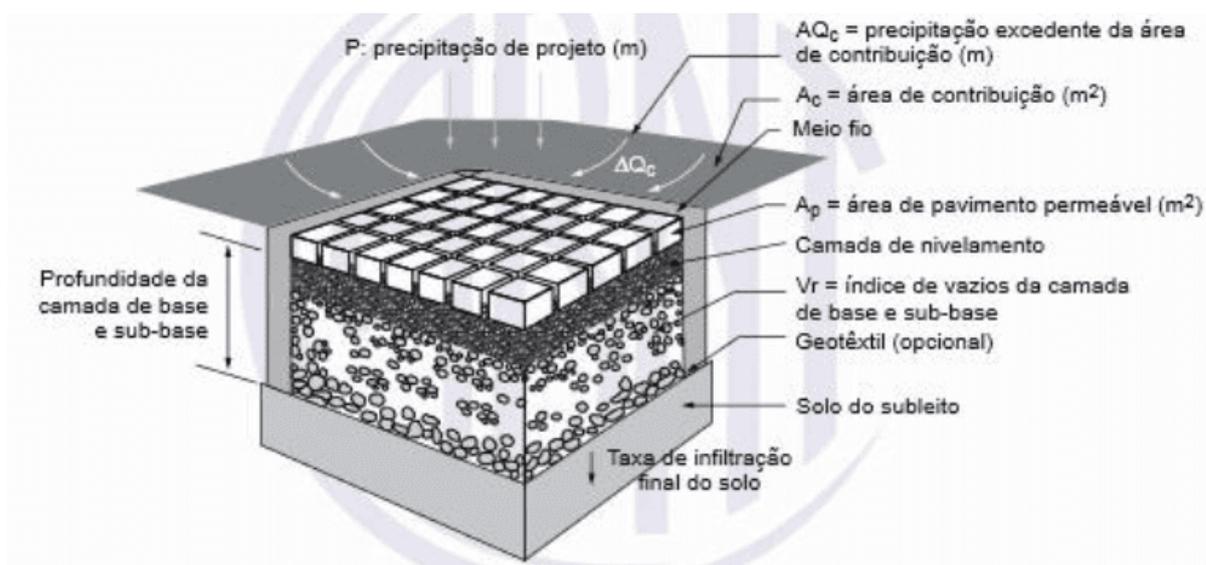
Sua operação baseia-se na penetração, armazenamento e infiltração da água proveniente do escoamento superficial, que é estocada, de forma temporária, nos

vazios da camada de reservação e, posteriormente, é lentamente infiltrada no solo ou liberada na rede de drenagem, sendo possível também uma combinação das duas saídas (AZZOUT, 1994 apud ACIOLI, 2005).

Os custos para a implantação dos pavimentos porosos, quando comparados ao pavimento comum são equivalentes, com a vantagem de que com o pavimento poroso, é possível reduzir o custo com a drenagem urbana convencional. Além disto, a implementação da técnica não exige um espaço específico, podendo ser adaptada facilmente ao contexto urbano (BAPTISTA *et al*, 2015).

Possuem vantagens como a redução das vazões de pico através de seu armazenamento temporário e a redução da formação de poças nos períodos chuvosos. Apresentam também uma redução dos ruídos dos pneus e melhora a aderência à circulação dos veículos. Todavia a estrutura não foi estudada a fundo quando aplicada a áreas com tráfego intenso, não apresentando dados suficientes para a previsão de possíveis riscos (BRITO, 2006; CASTRO, 2002).

Figura 6 - Modelo de Pavimento Permeável



Fonte: ABNT, 2015

4.5.1.2. Valas e Valetas de retenção ou infiltração

Constitui-se de uma técnica compensatória construída de forma simples, apenas por uma depressão no solo, cujo objetivo é recolher as águas de chuva e armazená-las temporariamente, favorecendo a infiltração (BAPTISTA *et al*, 2015).

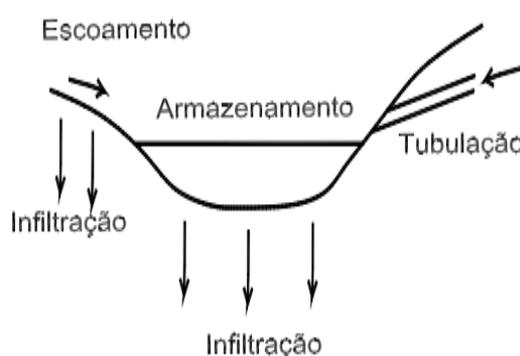
Valas tratam-se de estruturas de grande largura e baixa declividade em seu sentido longitudinal, já as valetas tratam-se de valas de profundidades pequenas (BRITO, 2006).

Quando a estrutura é construída com objetivo de armazenamento, são consideradas estruturas de detenção. Caso, o objetivo, além de armazenamento, seja de promover a infiltração, classifica-se a estrutura como vala ou valeta de infiltração (BAPTISTA *et al*, 2015).

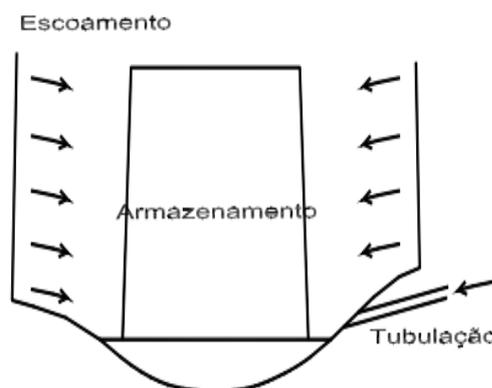
Usualmente são utilizadas nas laterais de rodovias ou ruas em áreas pouco urbanizadas e servem como caminho para águas pluviais escoadas. As principais vantagens para a utilização das valas e valetas estão ligadas: ao ganho financeiro com a diminuição das redes de drenagem convencionais, à redução dos riscos de inundações, à possibilidade de recarga dos aquíferos subterrâneos e à facilidade de integração dessa estrutura de drenagem com espaços de lazer, com a paisagem vegetal e áreas verdes (CASTRO, 2002; AZZOUT, 1994 *apud* BRITO, 2006).

A estrutura, entretanto, necessita de manutenção regular específica, pois apresenta possibilidade de colmatagem, além de apresentar riscos de poluição para o lençol subterrâneo e de estagnação de água na estrutura (AZZOUT, 1994 *apud* BRITO, 2006).

Figura 7 - Esquemas de Vala de Infiltração



Fonte: Castro, 2002

Figura 8 - Esquema de Vala de detenção

Fonte: Castro, 2002

4.5.1.3. Trincheiras de Infiltração e detenção

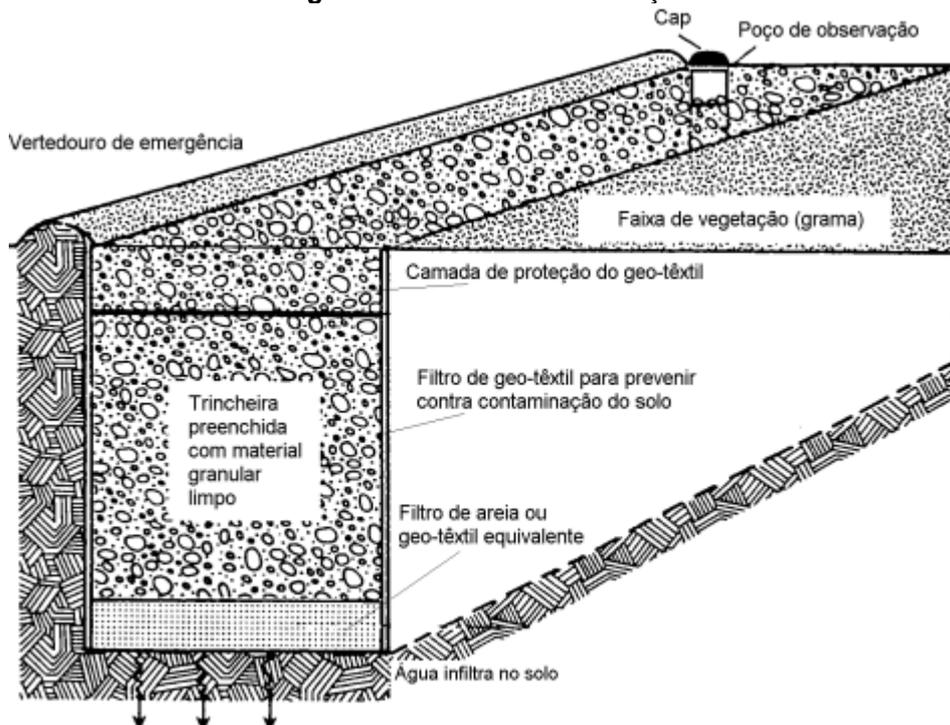
As trincheiras de infiltração, tratam-se de estruturas lineares, cuja largura e profundidade são reduzidas enquanto seu comprimento é significativo. São preenchidas por material granular graúdo como seixos ou brita. E tem como objetivo o armazenamento da água temporariamente para que ocorra a sua infiltração no solo (SOUZA, 2002).

Seu funcionamento é dado através de acesso das águas para a estrutura pela superfície do dispositivo ou através do sistema convencional de drenagem. A saída das águas ocorre pela infiltração no solo, através de suas paredes e fundo (para as trincheiras de infiltração) e pela descarga simples para jusante ou por dispositivo de desague com controle de vazão (para trincheiras de detenção) (BAPTISTA *et al*, 2015).

A estrutura apresenta um ganho paisagístico ligado a possibilidade de valorização do espaço urbano e a demanda pequena de espaço para a sua instalação, além de um ganho ambiental com uma possível recarga de lençol freático e a melhoria da qualidade das águas pluviais (BAPTISTA *et al*, 2015).

As trincheiras, no entanto, apresentam restrições para sua instalação em terrenos de grande declividade e necessitam de manutenção periódica para o controle de colmatagem e do risco de poluição do lençol subterrâneo, não sendo indicada a sua instalação em situações em que haja injeção direta em lençol freático (BAPTISTA *et al*, 2015; AZZOUT, 1994 apud BRITO, 2006).

Figura 9 - Trincheira de Infiltração



Fonte: Schueler, 1987 modificado por Souza, 2002

4.5.2. Técnicas de Controle na Fonte

As técnicas compensatórias de controle na fonte, tem como principal metodologia de atuação o controle do escoamento superficial em seu ponto de origem ou fonte, proporcionando o descarregamento de água de forma gradual para o corpo hídrico receptor ou para os aquíferos, para simular os processos naturais (VENDRAME, 1998).

São exemplos desta definição, os poços de infiltração, os planos de infiltração, os micro-reservatórios domiciliares, telhados armazenadores, entre outros.

4.5.2.1. Telhados Armazenadores

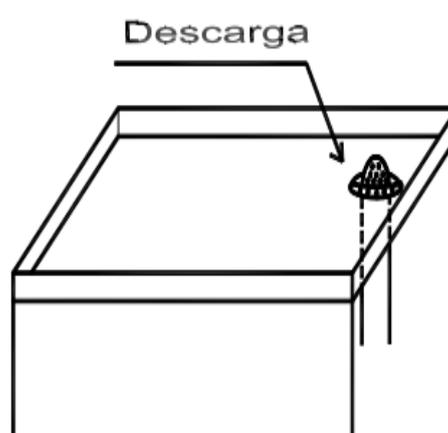
Os telhados armazenadores são estruturas que armazenam provisoriamente as águas pluviais e a restituí de forma amortecida para a rede de drenagem convencional. A estrutura pode ser aplicada em telhados planos ou de baixa declividade, inferiores a 5% (BAPTISTA *et al*, 2015).

Sua implementação é atrativa por não necessitar de uma área suplementar e por apresentar uma boa integração aos projetos arquitetônicos e urbanísticos, porém

é necessário atenção para a sua instalação em construções já existentes, principalmente com a estabilidade, para que a estrutura possa suportar, além das cargas habituais, o peso da água suplementar a ocorrer em períodos chuvosos (BAPTISTA *et al*, 2015; COSTA, 2002).

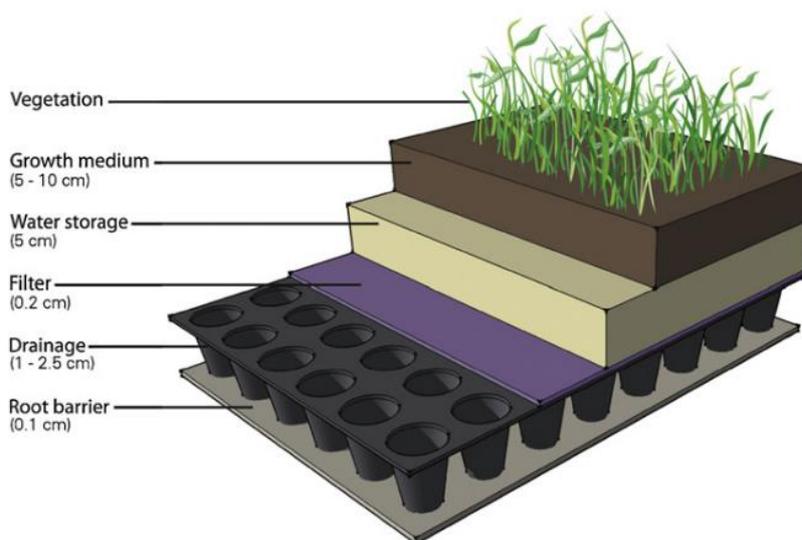
É utilizado também telhados vegetalizados, que além dos ganhos de drenagem, apresentam-se atrativos na forma de proteção térmica, contribuindo para o isolamento das edificações (BAPTISTA *et al*, 2015).

Figura 10 - Estrutura de Telhado Armazenador



Fonte: Costa, 2002

Figura 11 - Estrutura de Telhado Vegetado

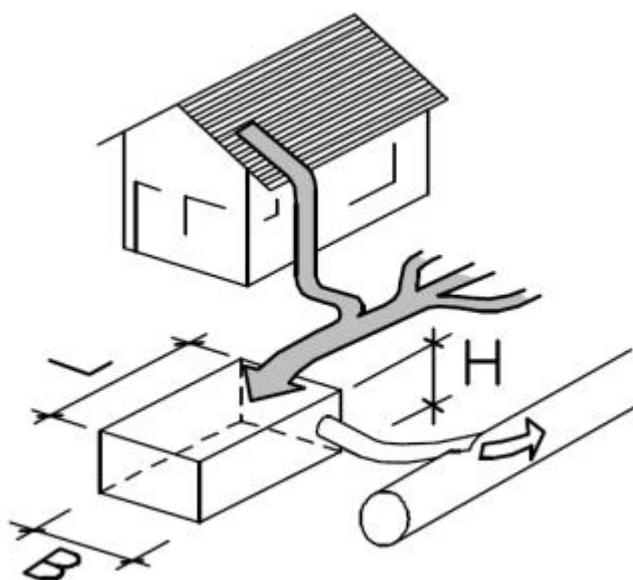


Fonte: Tsang; Jim, 2013

4.5.2.2. Reservatórios Individuais

Essas estruturas são pequenos tanques na maioria das vezes pré-fabricados podendo ser a céu aberto ou enterrados, e conectados ou não a rede de drenagem. A água no interior destes reservatórios pode ser infiltrada, sair por descarga nas redes de drenagem, ou ainda, ser utilizada para alimentação de sistemas. Essas águas não podem ser utilizadas para consumo humano, mas tem seu uso permitido em irrigação, lavagem de veículos e uso em sanitários (BAPTISTA *et al*, 2015).

Figura 12 - Microreservatórios



Fonte: Dornelles, 2014

4.5.2.3. Planos de Infiltração

Os planos de infiltração são constituídos de uma escavação de solo, com baixa profundidade, que apresentam dimensões transversais e longitudinais semelhantes. Estas estruturas contam com gramados laterais e tem como objetivo receber a água proveniente das áreas impermeáveis e favorecer sua infiltração (BAPTISTA *et al*, 2015; MOURA, 2005).

Figura 13 - Plano de Infiltração UFSCar - São Carlos



Fonte: Tecedor, 2014

4.6. POÇOS DE INFILTRAÇÃO

Baptista *et al* (2015, p.274) define poços de infiltração como “dispositivos com pequena ocupação de área superficial, concebidos para evacuar as águas pluviais diretamente no subsolo, por infiltração.”

Poços de infiltração são sistemas pontuais com pequena área em planta, cujo objetivo é reter uma parcela das águas pluviais em relação ao volume superficial escoado. O poço atua infiltrando as águas pluviais, amortecendo o pico de vazão que atingiria o sistema de drenagem convencional e diminuindo o volume de escoamento superficial por reter parte deste volume no solo (BARBASSA, 2014; BAPTISTA *et al*, 2015).

As estruturas atuam de forma a restabelecer ou manter o balanço hídrico natural do período de pré-desenvolvimento por meio da infiltração da água pluvial no solo, até que este reduza a sua capacidade de absorção, forçando o poço de infiltração a operar temporariamente como reservatório de amortecimento (REIS, 2008).

São consideradas técnicas compensatórias de microescala, e dependem de particularidades do local no qual será construído, como o regime pluviométrico, as características do solo, a profundidade do lençol freático, os aspectos legais e a disponibilidade de espaço (BARBASSA, 2014).

A funcionalidade da estrutura se dá no encaminhamento da água de chuva captada pela edificação para o interior do poço, que infiltra esta água para o solo

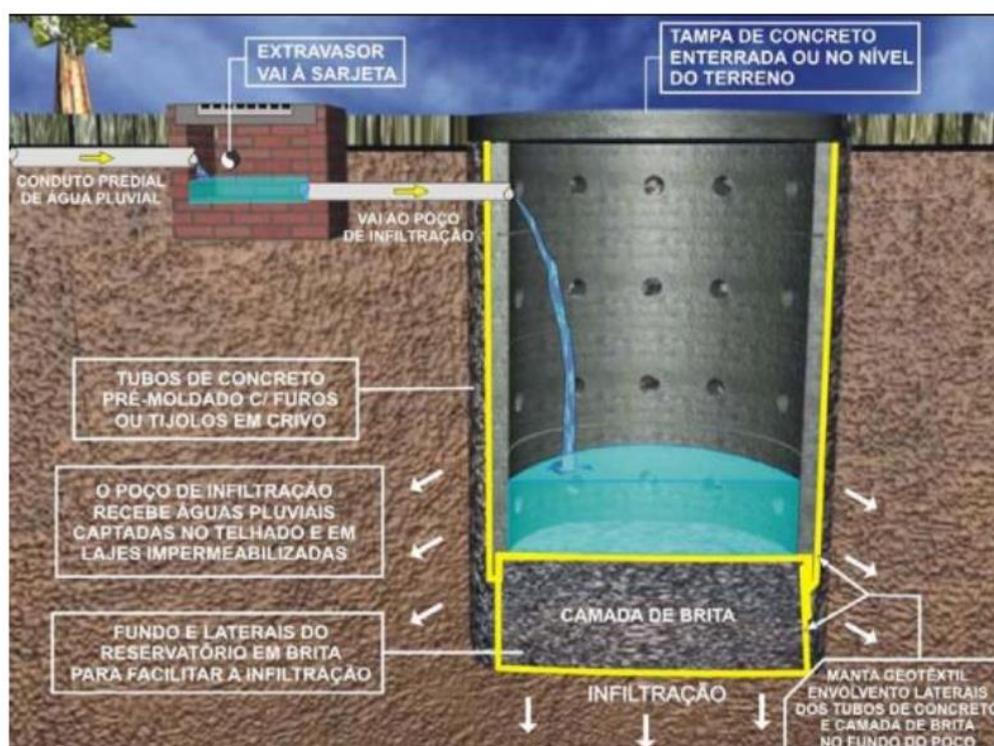
através de suas estruturas permeáveis, ou injeta a água em lençol subterrâneo, sendo esta última desaconselhada e até mesmo proibida em alguns países. Somente ocorrerá a condução da água para o sistema público de drenagem, por meio de seus extravasores, no momento em que a capacidade de infiltração do poço for atingida (REIS, 2008; BAPTISTA *et al*, 2015).

Entre as vantagens da instalação de poços de infiltração estão: o baixo custo executivo, a possibilidade de recarga de lençol freático, melhoramento da qualidade da água pluvial através do impedimento de um grande volume escoar pelas vias públicas carregando carga poluidora para os leitos dos rios (REIS, 2008; AZZOUT apud BRITO, 2006).

Pode-se listar como desvantagens do sistema a impossibilidade de construção em terrenos colapsíveis (solos caracterizados pela súbita redução de volume devido ao ganho de umidade com presença ou não de sobrecarga), a impossibilidade de instalação em solos com baixa capacidade de infiltração e a impossibilidade de instalação em locais com lençol freático elevado, a necessidade de manutenção regular, o risco de poluição do lençol subterrâneo e a sua baixa capacidade de armazenamento (REIS, 2008; AZZOUT apud BRITO, 2006).

Um modelo de poço de infiltração pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Modelo de poço de infiltração



Fonte: Reis *et al*, 2005

Para estudar-se a eficácia das estruturas para diminuição das vazões de escoamento superficiais são utilizados modelos.

4.7. INFILTRAÇÃO

Infiltração é o termo utilizado para o processo de passagem da água da superfície para o interior no solo. A quantidade de água que penetra no solo durante um determinado período de tempo é denominada taxa de infiltração (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015; TUCCI, 1993).

O conceito de capacidade de infiltração, refere-se ao potencial que um determinado solo tem de absorver água de sua superfície e varia de acordo com a umidade presente neste. Solos secos possuem capacidade de infiltração altas, e conforme a umidade do solo se eleva a capacidade de infiltração diminui (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015; TUCCI, 1993).

As características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas de um solo influenciam na infiltração. A estrutura do solo, por exemplo, tem grande influência na taxa de infiltração, solos de maior densidade apresentarão menores taxa de infiltração. A umidade de um solo, também impacta em sua taxa de infiltração, pois, quanto mais úmido um solo, inicialmente, menor a sua taxa de infiltração e mais rapidamente esta se tornará constante (BRANDÃO *et al*, 2012).

A infiltração de água no solo é determinada através de métodos simples e devem representar as condições que o solo apresenta, adequadamente. Infiltrômetros, são os equipamentos utilizados para determinar a taxa de infiltração da água no solo, os modelos mais utilizados em estudos hidrológicos são o infiltrômetro de duplo anel e o simulador de chuvas (BRANDÃO *et al*, 2012).

4.8. MODELOS

Um modelo pode ser definido como:

Qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução (CHRISTOFOLETTI, 1999, p.08).

Modelos físicos são estruturas reais construídas em escala reduzida que se comportam como sistemas em escala real (FELICIO, 2010).

Os modelos matemáticos, no entanto, são apresentados como equações que descrevem o comportamento de um sistema. São também tratados dentro da dinâmica de sistemas, modelos de sistema, esquemas lógicos que representam a estrutura de um sistema com elementos, fluxos e retroalimentação (CHRISTOFOLETTI, 1999; FELICIO, 2010).

Os modelos computacionais são comuns na atualidade, pois em diversos casos podem substituir os modelos físicos, afinal modificar parâmetros em um computador é mais simples que os alterar em uma construção. Os modelos computacionais se encaixam na descrição de um modelo matemático, porém possuem interfaces gráficas que permitem que o modelo seja mais amigável (FELICIO, 2010).

Os modelos matemáticos correspondem as buscas para equações diferenciais, e essas equações podem ser solucionadas de dois métodos diferentes, sendo eles o método analítico e o método numérico (FELICIO, 2010).

Usualmente a resposta de problemas utilizada é a solução analítica, ou exata, pois esta é a que satisfaz exatamente a equação diferencial apresentada, entretanto, em muitos casos da engenharia essa solução não é possível ser obtida, sendo necessárias aproximações, e a utilização de métodos numéricos e simulações computacionais (CHAPRA, 2011; FELICIO, 2010).

4.9. MÉTODOS NUMÉRICOS

Os Métodos Numéricos são ferramentas extremamente poderosas, que aumentam a capacidade de resolução, pois problemas matemáticos, com equações não-lineares e geometricamente complicadas, impossíveis de serem resolvidas analiticamente, são formulados de modo a conseguirem ser solucionados com operações aritméticas (CHAPRA; CANALE, 2011).

Estes métodos são técnicas que têm como função reduzir a matemática avançada para operações básicas, tratam-se de equações com várias iterações necessárias para determinação de suas variáveis (CHAPRA, 2006; CHAPRA; CANALE 2011).

Por tratarem-se de uma aproximação quando utilizamos o modelo numérico surge o conceito de acurácia, que se trata de o quão próximo o valor calculado encontra-se do valor verdadeiro enquanto que precisão se refere a quão próximo os valores individuais calculados estão uns dos outros. Tanto a precisão quanto a

acurácia são quantificados pelos erros em um cálculo numérico (CHAPRA; CANALE, 2011; HOFFMAN, 2001).

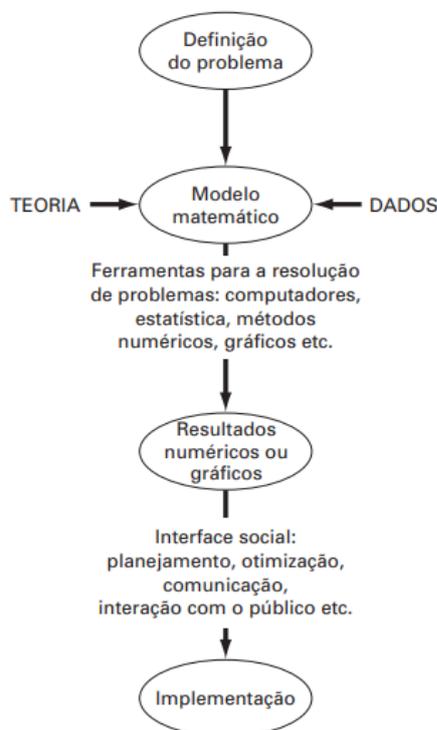
Outro conceito importante é o de erro, os erros numéricos são causados pelo uso de aproximações para representar operações e quantidades matemáticas exatas. Esses erros incluem os erros de truncamento, causados pelas aproximações feitas para representar os procedimentos matemáticos exatos, e os erros de arredondamento, que aparecem quando os números tem uma capacidade limitada de algarismos significativos (CHAPRA; CANALE, 2011; FERZIGER, 2002).

Entretanto, o método numérico é utilizado justamente para a determinação dos valores de problemas quando a obtenção do valor verdadeiro (solução analítica) é muito complexa, o que impossibilita o cálculo do erro baseando-se no valor real, e torna um desafio a determinação do erro quando se utiliza o método numérico (CHAPRA; CANALE, 2011).

Um dos casos mais comuns é a utilização de métodos de abordagem iterativas para se calcular as respostas, neste caso o cálculo do erro é dado utilizando-se a diferença entre as aproximações prévias e a corrente (CHAPRA; CANALE, 2011; HOFFMAN, 2001).

O fluxograma de utilização de um modelo matemático pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Resolução dos Modelos Matemáticos



Fonte: CHAPRA, 2011

4.10. USO DO RUNGE-KUTTA NA HIDROLOGIA

Os métodos numéricos de Runge-Kutta podem ser utilizados para resolver problemas hidrológicos, principalmente quando é utilizada a equação de continuidade.

Em 1988, Chow, Maidment e Mays, exemplificaram o estudo da propagação de onda de cheia em um reservatório utilizando-se da aplicação de Método de Runge-Kutta de 3ª ordem para resolução da equação de continuidade em seu livro *Applied Hydrology* (CHOW, 1988).

O método de Runge-Kutta de 4ª ordem também foi utilizado por Simões, Porto e Schulz em 2015 para o desenvolvimento de um código, em Matlab e possível de ser adaptado para o Software Octave, para a modelagem da propagação de uma onda de cheia em um reservatório retangular utilizando-se do conceito de conservação de massa (SIMÕES, 2015).

4.11. USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS NA HIDROLOGIA

Em 2002, Ahmad e Simonovic utilizaram a dinâmica de sistemas através do software Stella, para análise do nível de um reservatório localizado no Canadá, com o objetivo de estudar a capacidade de amortecimento de cheias e vazões de saída do reservatório com dois cenários distintos de vertedores. Os autores modelaram três fases do sistema, a vazão de montante, o reservatório e a vazão de jusante, fornecendo informações sobre a extensão e duração das inundações (AHMAD, 2002).

Li e Simonovic, em seu trabalho, utilizaram-se do Stella, para simular padrões de inundações causados pelo degelo recorrente da mudança de temperatura. O modelo foi estruturado como quatro estoques representando: o armazenamento de neve, a interceptação e armazenamento pelo dossel, o armazenamento em solo superficial, o armazenamento em solo subterrâneo e o armazenamento em água subterrânea. O modelo indica a relação do armazenamento de superfície-subsuperfície e o papel da mudança de temperatura no tamanho do dossel, estado físico do solo e geração de inundação (LI, 2002).

O software Stella foi utilizado para simular um balanço hídrico de uma região do Canadá, por Elshorbagy, Jutla e Kells, em 2007, utilizando-se de um modelo concentrado com fins unicamente de modelagem. Foram utilizadas quatro estoques, a água superficial, a camada de turfa, camada de lavoura e a camada de argila. (ELSHORBAGY, 2007)

Em 2009, Khan, Yufeng e Ahmad utilizaram-se do Software Vensim para simular o balanço hídrico em um campo de arroz aeróbico (não alagado, porém irrigado como outras plantações). Foram simulados dois cenários distintos, o primeiro deles inclui no balanço a percolação da água, escoamento superficial, evapotranspiração real e ascensão capilar. O segundo modelo foi gerado considerando a interação da superfície com as águas subterrâneas, a recarga das águas subterrâneas, a precipitação, a irrigação e a infiltração do Rio (KHAN *et al*, 2009).

Um estudo de reservatórios com a dinâmica de sistema foi elaborado por Bosona e Gebresenbet em 2010, os autores se utilizaram do software Powersim para modelar o reservatório da usina hidrelétrica de Melka Wakana localizada na Etiópia. Os dados de vazão de entrada, taxa de evaporação, produção de energia, vazão da turbina e elevação foram os utilizados para a simulação. A análise relaciona as saídas

de água do reservatório para a produção de energia, considerando o aumento da produção anual de energia e melhorando a uniformidade de produção mensal de energia (BOSONA, 2010).

Um estudo utilizando-se dinâmica de sistemas foi aplicado a região de Kairouan na Tunísia em 2012. O modelo estudado teve como objetivo estimar o volume de água do aquífero Kairouan, e para tal considerava as captações ocorrentes, o balanço hídrico do reservatório da região, a entrada de água no aquífero por infiltração, o bombeamento de água para o abastecimento das cidades de entorno e as demandas internas, industriais e agrícolas (SUSNIK *et al*, 2012).

Zhou *et al* (2019) utilizou-se da dinâmica de sistemas, através do software Vensim, para modelar o reservatório hidroelétrico de Três Gargantas na China, com o objetivo de identificar as regras operacionais eficientes do reservatório. O modelo conta com o estoque de nível de armazenamento do reservatório e com o de geração de energia, que se conectam devido aos critérios de liberação de água para a geração de energia (ZHOU *et al*, 2019).

Com o objetivo de modelar um reservatório de operação ambiental amigável, os autores, Jiang, Simonovic, Yu e Wang utilizaram-se do software Vensim para simulação de quatro loops presentes no reservatório estudado, todos dependentes do volume presente no mesmo, sendo eles, o de produção de energia, o de liberação de peixes, o de descarga de sedimentos e o de estabilidade de encostas (JIANG *et al*, 2020).

Em 2022, Sardo e Jalalkamali aplicaram a dinâmica de sistemas para o cálculo de armazenamento de um reservatório e sua contribuição para o armazenamento em um aquífero subterrâneo (SARDO, 2022).

4.12. POTENCIALIDADES

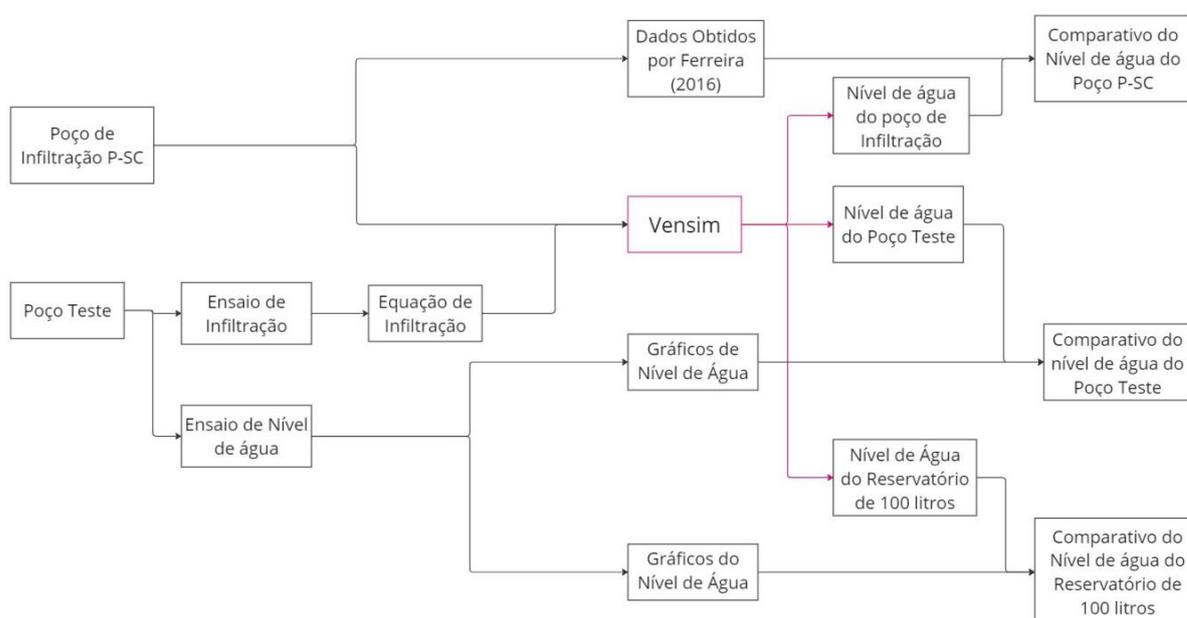
Segundo Müller-Merbach (1983) os sistemas são relativamente fáceis de serem compreendidos, mesmo por aqueles com pouca familiaridade com a matemática. Tal fator implica em uma participação mais abrangente de indivíduos com diferentes percepções do evento em estudo e permite grande interdisciplinaridade durante a construção do modelo.

A simulação dinâmica é nítida e permite ao usuário entender a interação entre as diferentes variáveis. O procedimento leva os desenvolvedores do modelo a uma

estrutura de pensamento específica e a uma precisão de análise e síntese que pode auxiliar a reduzir os erros e deficiências do modelo (MÜLLER-MERBACH, 1983; SIMONOVIC, 1999).

A abordagem da dinâmica de sistemas gera um modelo simples de ser modificado e expandido, cujas modificações podem ser realizadas à medida que novas informações são obtidas, as simulações reexecutadas, os resultados analisados e o modelo melhorado (AHMAD, 2002).

5. METODOLOGIA



5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A parte experimental deste estudo foi realizada na cidade de São Carlos, nas dependências da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A cidade está localizada 234 km da capital do estado, São Paulo, seu clima é caracterizado como tropical de altitude, apresentando um verão com chuvas, um inverno com secas e uma temperatura média de 22°C em seu mês mais quente (SÃO CARLOS, 2012).

Sobrinha (2012) caracteriza o solo encontrado nas proximidades da localidade dos poços como homogêneo e sendo composto por areia média, areia fina e argila, em parcelas mais significativas e parcelas menores de silte e areia grossa.

Figura 16 - Localização dos pontos de estudo



Fonte: Google Earth adaptado pela autora, 2024

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

5.2.1. Poço de Infiltração P-SC

O poço de infiltração utilizado para o estudo, nomeado de P-SC, está localizado no campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) na cidade de São Carlos, estado de São Paulo.

O poço foi construído levando em consideração o dimensionamento exigido no código de obras e edificações do município de São Carlos (Lei Municipal nº 15.958/2011), indicando que o volume de reservação deve ser calculado na proporção de 5,0 Litros para cada metro quadrado de área impermeabilizada.

$$Volume = Área impermeável \cdot 5,0 \quad (1)$$

Em que:

Volume: Volume de armazenamento do poço de infiltração (litros)

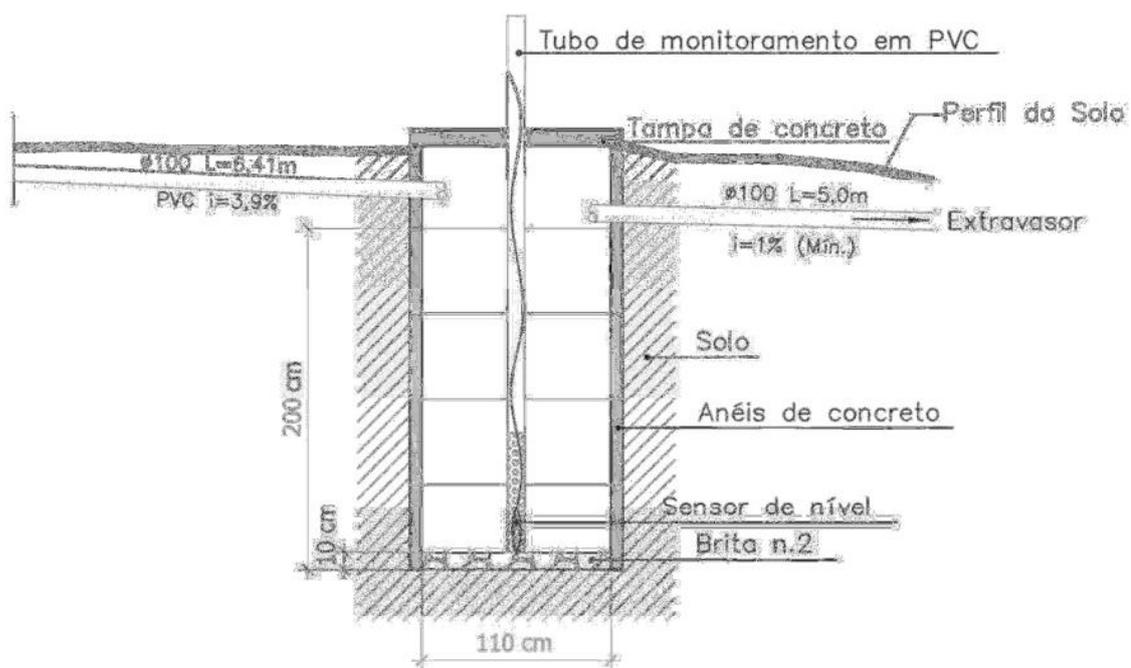
Área impermeável: área impermeabilizada de contribuição da estrutura (m²)

Segundo Ferreira (2016) a área de contribuição do P-SC é de 287,80 m². Através da Equação (1) conclui-se que há, para esta estrutura, uma exigência de volume mínima de 1,44 m³.

Para a construção do poço, foram utilizados anéis de concreto pré-moldados de 1,10 metros de diâmetro e sua profundidade útil máxima de construção (distância do fundo do poço ao extravasor) de 2,0 metros.

O poço conta com uma entrada de água pouco acima da cota de 2,0 metros a partir da camada de brita ao fundo do poço, e apresenta também um extravasor, na cota de 2,0 metros que permite que a água seja despejada no sistema de drenagem convencional (sarjeta) caso atinja o nível máximo do poço. A construção da estrutura está representada na Figura 17.

Figura 17 - Poço de Infiltração P-SC



Fonte: Ferreira, 2016

5.2.2. Vazão de Entrada

A vazão de entrada do sistema existente, é determinada pela precipitação incidente dentro da área de contribuição do sistema, referente a parte do telhado do Laboratório de Biopolímeros da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A Figura 18 indica a área de contribuição considerada para o dimensionamento do poço P-SC.

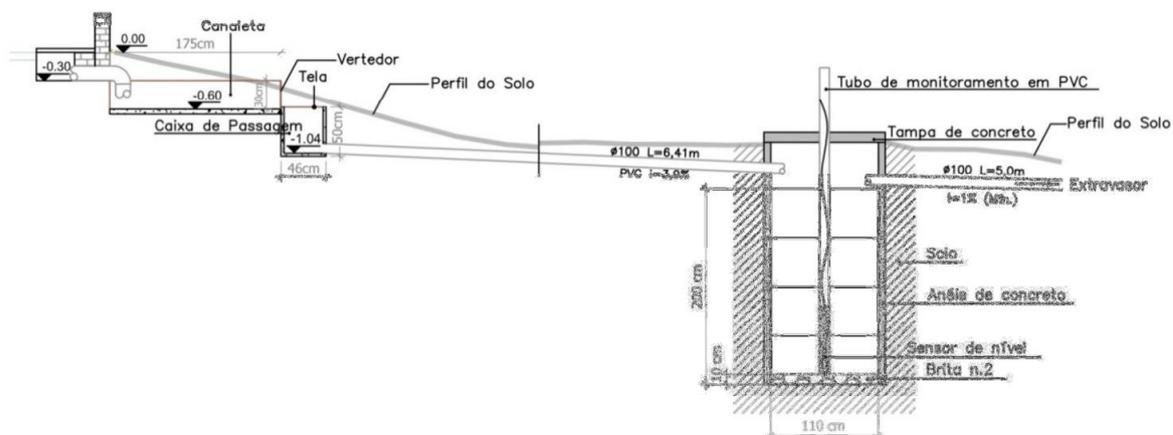
Figura 18 - Área de Contribuição do Poço de Infiltração

Fonte: Adaptado de Ferreira, 2016

A água coletada proveniente da área de contribuição apresentada é encaminhada em direção à canaleta pluvial existente no sistema, que se conecta a caixa de passagem através de um vertedor. A caixa de passagem destina a água para o interior do poço de infiltração P-SC por uma tubulação de PVC de 100 milímetros de diâmetro que tem uma altura de 2 metros em relação à sua base.

A conexão entre a tubulação de águas pluviais para a alimentação do poço foi realizada conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Ligação da Rede predial de águas pluviais ao poço de infiltração



Fonte: Ferreira, 2016

Ferreira (2016), utilizou-se de um evento simulado para estudar o comportamento do poço de infiltração em questão, nesta simulação foi considerada como vazão de entrada para o sistema a descarga completa de um reservatório de polietileno convencional de 2.000 litros, totalmente cheio.

A descarga proveniente do Reservatório foi conectada à canaleta de instalação pluvial que é, por sua vez, conectada a tubulação do interior do poço de infiltração, como pode ser observada na Figura 19.

Para a modelagem a ser realizada, considerou-se o mesmo princípio adotado nos eventos de chuvas simuladas por Ferreira (2016), e, para a vazão de entrada, considerou-se a alimentação através da vazão de descarga do reservatório.

A determinação da vazão de entrada do sistema, e vazão de descarga do reservatório, faz necessário as dimensões do Reservatório de 2000L, que podem ser observadas através da Figura 20.

Figura 20 - Dimensões Reservatório de PVC de 2.000L

Fonte: Fortlev, 2022

Durante a simulação de Ferreira (2016), o registro de saída do reservatório foi totalmente aberto. Para a determinação desta vazão de saída, foi utilizada a equação de saída de um orifício, como pode ser observada na Equação (2).

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

Em que:

Q: Vazão do orifício (m³/s);

C_d : Coeficiente de descarga que depende da geometria do orifício (adimensional)

A: Área de seção transversal do orifício (m²);

g: Aceleração da gravidade (m/s²);

h: Altura de água desde a superfície até o centro do orifício.

5.2.3. Vazão de Saída

A vazão de saída refere-se a vazão que se encaminha para fora do reservatório através dos dispositivos de controle, neste caso, há dois dispositivos, como observado na Figura 17, o primeiro e principal sendo o fundo permeável no poço, e o segundo o

ladrão. As vazões são determinadas através da equação da infiltração e da equação de orifício, respectivamente.

Para a determinação da vazão de saída por infiltração da estrutura estudada, foram realizados ensaios de infiltração.

5.3. ENSAIO DE INFILTRAÇÃO

5.3.1. Concepção do Infiltrômetro

Com objetivo de estimar a influência do nível de água na velocidade de infiltração em um poço de infiltração domiciliar comumente utilizado na cidade de São Carlos-SP realizou-se um ensaio de infiltração no Campus da Universidade Federal de São Carlos, nas proximidades da localização do poço de infiltração, objeto deste estudo.

A construção do ensaio baseou-se na simulação de um poço de infiltração de menor diâmetro, considerando, entretanto, uma profundidade média semelhante às encontradas nas estruturas construídas em lotes da cidade.

Foram utilizadas como base a exigência da Prefeitura para os poços de infiltração da São Carlos-SP, como apresentado na Equação (1). Como valor de referência para o cálculo da profundidade do poço teste a ser construído, considerou-se um padrão de lote com uma área impermeável de 200 m².

Como apresentado anteriormente, o método mais utilizado na cidade para a construção dos poços se dá através da utilização de manilhas de concreto com diâmetro de 1,10m, e a partir da Equação (1), obtém-se uma profundidade média de 1,10m pra as estruturas.

Desta forma, adotou-se uma profundidade, para o experimento de aproximadamente 1,20m.

Devido a utilização das manilhas de concreto para a construção dos poços, as laterais são consideradas impermeáveis, sendo considerada a infiltração apenas pelo fundo, desta forma, para o experimento ser mais semelhante a realidade, utilizou-se de uma tubulação de PVC de 150mm nas paredes do poço de teste, como pode ser observado na Figura 21, abaixo.

Figura 21 - Poço simulado

Fonte: Autora, 2024

O poço teste foi construído utilizando-se as ferramentas e materiais apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Materiais para o poço teste

1. Ponteira; 2. Vanga; 3. Cavadeira; 4. Marreta; 5. Trado; 6. Poço teste; e 7. Cap 150mm.

Fonte: Autora, 2024

Para a sua construção, utilizou-se uma ponteira (1) para a inspeção do subsolo, uma vanga (2), com o objetivo de retirar a cobertura de grama do local selecionado, uma cavadeira (3), para a perfuração rasa inicial, uma marreta (4) para uso geral, um

trado manual (5) para a perfuração mais profunda, o tubo de PVC de 150mm (6) para o poço teste e um cap de 150mm (7) para o tamponamento do poço teste.

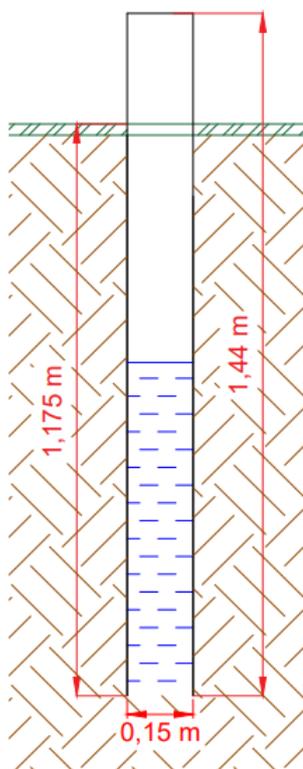
Foi realizado um furo com a profundidade de aproximadamente 1,20m como calculado. A construção do poço teste pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - Construção do Poço Teste



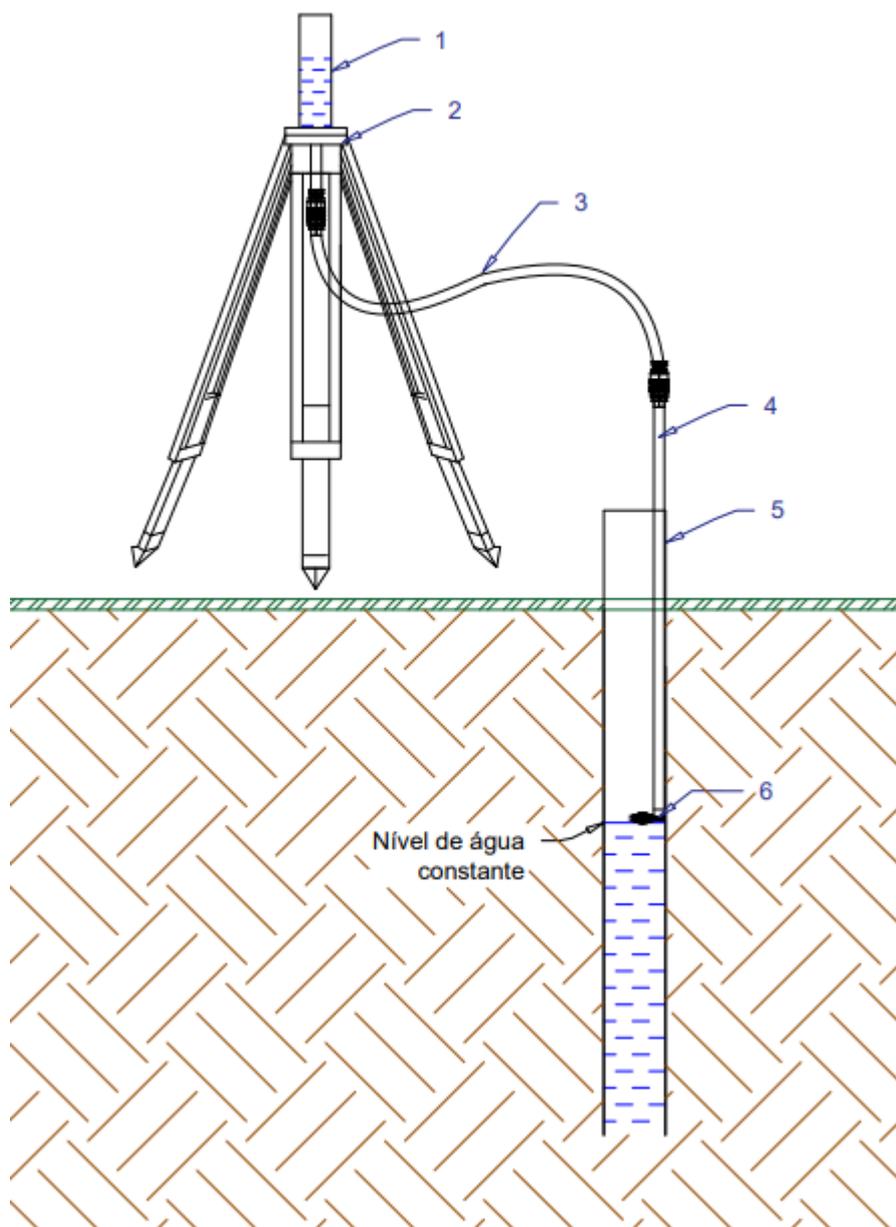
Fonte: Autora, 2024. Imagens utilizadas com permissão do Técnico Carlos E. Radaik (nossos agradecimentos).

As medidas reais do poço teste construído são apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Poço Teste

Fonte: Autora, 2024

Para a realização do ensaio de infiltração foi montada uma estrutura, que neste trabalho será denominada de Infiltrômetro, responsável pelas medições de infiltração, como demonstrado no desenho orientativo, Figura 25.

Figura 25 - Desenho Orientativo do Infiltrômetro

Fonte: Autora, 2024

As estruturas apresentadas na Figura 25, são apresentadas conforme a legenda que segue.

- 1 – Cilindro de acrílico graduado
- 2 – Tripé de alumínio para nivelamento do cilindro
- 3 – Mangueira de água transparente (tipo “cristal com trama de nylon”)
- 4 – Tubulação de PVC 25mm com torneira boia instalada em sua extremidade
- 5 – Poço teste

6 – Torneira boia

A estrutura de número 1 representa um cilindro de acrílico graduado utilizado para medir os volumes infiltrados pela estrutura. Conforme a infiltração da água presente no Poço Teste (5) ocorre, há a diminuição do nível de água no cilindro, possibilitando realizar, através desta estrutura, a medição de Volume em um determinado Tempo desta ocorrência.

O número 2 representa o tripé de alumínio, utilizado para manter a estrutura do cilindro conectada a mangueira de alimentação do sistema (3) e para o nivelamento do cilindro. A mangueira de alimentação do sistema de infiltração (estrutura de número 3) é transparente para que seja possível acompanhar e prevenir a formação de bolhas de ar durante os testes, e serve como alimentação do sistema de infiltração enterrado (Poço teste), sendo responsável pela transferência da água presente no cilindro graduado (1) para o poço teste (5), através da estrutura 4.

Conectada a mangueira está uma tubulação de PVC de diâmetro de 25mm (estrutura 4), que é responsável por manter o nível de água constante no interior do solo. Possui em sua ponta inferior uma torneira boia (6), que se abre quando o nível de água no interior do poço torna-se inferior ao nível no qual ela está posicionada.

A estrutura 4, é mantida em uma altura constante no interior da estrutura 5, presa a tubulação enterrada, para que não ocorra movimentações, e consequentemente mudanças no nível de água.

A estrutura de número 5 é onde a infiltração ocorre pelo seu fundo. Em seu interior o nível de água é mantido de forma constante sendo possível considerar que a variação de volume encontrado na estrutura de número 1 é aquele que foi infiltrado no solo.

5.3.2. Construção e Montagem do Infiltrômetro

A medição da capacidade de infiltração da estrutura apresentada, foi realizada a partir do cilindro de acrílico graduado, observado na Figura 26.

Figura 26 – Cilindro de acrílico Graduado



Fonte: Autora, 2024

Para montar a estrutura de medição de volume, foi utilizado um tripé de alumínio para nivelamento do cilindro. O infiltrômetro completamente montado, é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Infiltrômetro

Fonte: Autora, 2024

Dentro do poço, foi posicionado uma tubulação de PVC de menor diâmetro (25mm), e em sua ponta uma torneira boia, com a intenção de manutenção do nível de água constante no interior do poço, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Estrutura de Manutenção de nível

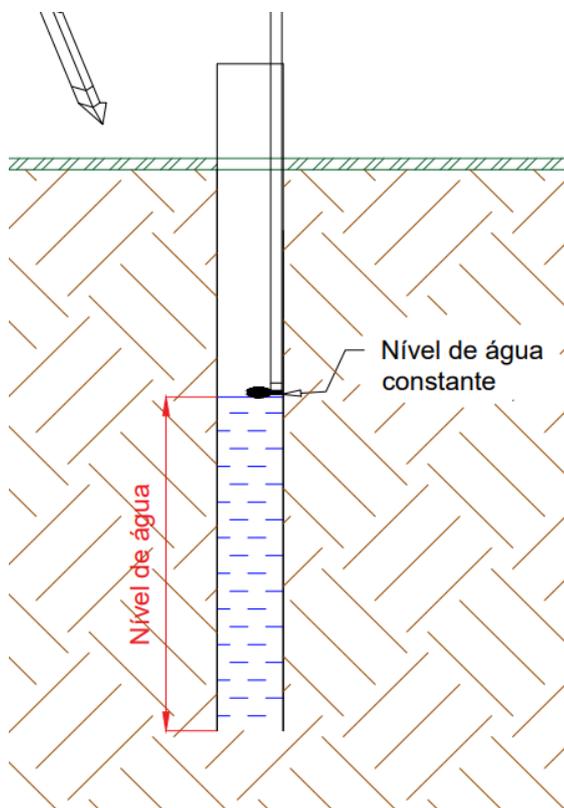
Fonte: Autora, 2024

Para conectar o cilindro graduado à tubulação com a boia utilizou-se uma mangueira transparente, para que fosse possível notar e evitar a formação de bolhas na tubulação.

Para a manutenção do nível de água, fixou-se a tubulação da “estrutura de manutenção de nível” e sua boia em quatro alturas diferentes, sendo elas medidas em

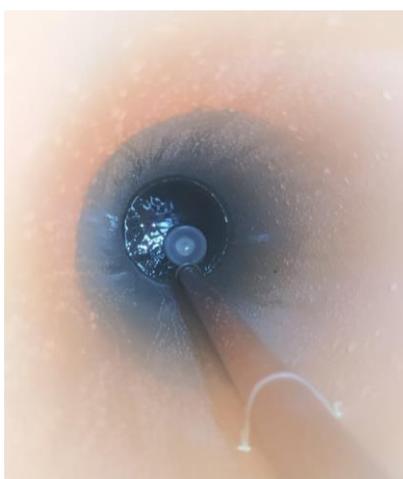
relação à base permeável do infiltrômetro, à 30cm, 60cm, 90cm e 117,50cm. A última medida referente a profundidade da estrutura em relação a superfície do solo.

Figura 29 - Medidas de Nível de água



Fonte: Autora, 2024

Figura 30 – Visualização de água no interior do infiltrômetro



Fonte: Autora, 2024

Com a estrutura totalmente montada e os níveis de estudos determinados, foi possível iniciar-se os ensaios.

5.3.3. Ensaio de Infiltração

Para iniciar o ensaio é necessário preencher com água a estrutura descrita no item anterior, iniciando-se pela tubulação instalada no solo até a cota escolhida, seguida pela estrutura de manutenção de nível, a mangueira transparente e o cilindro graduado, com o cuidado de garantir que não haja bolhas de ar no interior de toda estrutura.

O ensaio é iniciado no momento em que a torneira boia na estrutura de manutenção de nível se abre completamente. É possível observar este fato no momento em que a água do cilindro graduado começa a se rebaixar aparentemente em uma velocidade constante.

A fim de garantir que o ensaio se iniciasse apenas após a abertura completa da torneira boia manteve-se o enchimento do cilindro graduado por um certo intervalo de tempo para garantir que o requisito fosse atendido. O início de contagem de tempo é dado no momento em que o enchimento do cilindro é cessado e o nível ultrapasse a marcação de 0 ml.

Para a realização dos testes foi utilizado um intervalo de tempo fixo de 20s, anotando-se o volume de água infiltrado a cada 20s, durante todo o ensaio. O ensaio era pausado no momento que o nível de água do cilindro chegava próximo ao seu nível mínimo, em torno de 980 ml, a fim de evitar a entrada de ar na estrutura.

Foram realizadas duas coletas de dados para cada um dos níveis pré-determinados.

5.4. ENSAIO DE COMPORTAMENTO DA ÁGUA

A fim de compreender o modelo de descida de água no interior do reservatório de polietileno e conseqüentemente o enchimento do poço de infiltração, foi utilizado o poço teste, previamente apresentado, e um reservatório de água.

O experimento foi montado utilizando-se um reservatório de polietileno de 100 litros, comumente utilizado em residências (Figura 31), conectado à uma tubulação de PVC comum com diâmetro de 25mm, responsável por lançar a água proveniente do reservatório dentro do poço teste.

Figura 31 - Dimensões Reservatório 100 litros

Fonte: Fortlev, 2022

A tubulação de saída do reservatório possui um registro de esfera que possibilita o fechamento parcial ou a interrupção do fluxo de água quando necessário.

Na parte superior do reservatório foi posicionado um sensor de distância ultrassônico do tipo HC-SR04 (sensor 01), compatível com Arduino. O sensor 01 foi conectado a um computador e foi responsável por medir a distância entre ele e a lâmina de água presente no interior do reservatório.

A montagem do sistema descrito pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 - Reservatório 100 litros com medição de nível por sensor ultrassônico.

Fonte: Autora, 2024

O poço teste é o mesmo utilizado para o teste de infiltração, previamente descrito no item 5.3. Na extremidade superior do poço foi posicionado outro sensor ultrassônico (sensor 02) similar ao instalado no reservatório, do tipo HC-SR04, compatível com Arduino. O sensor 02 foi conectado a um segundo computador, e responsável por medir a distância entre o próprio sensor e a superfície da água dentro do poço teste. O sistema montado pode ser visualizado na Figura 33.

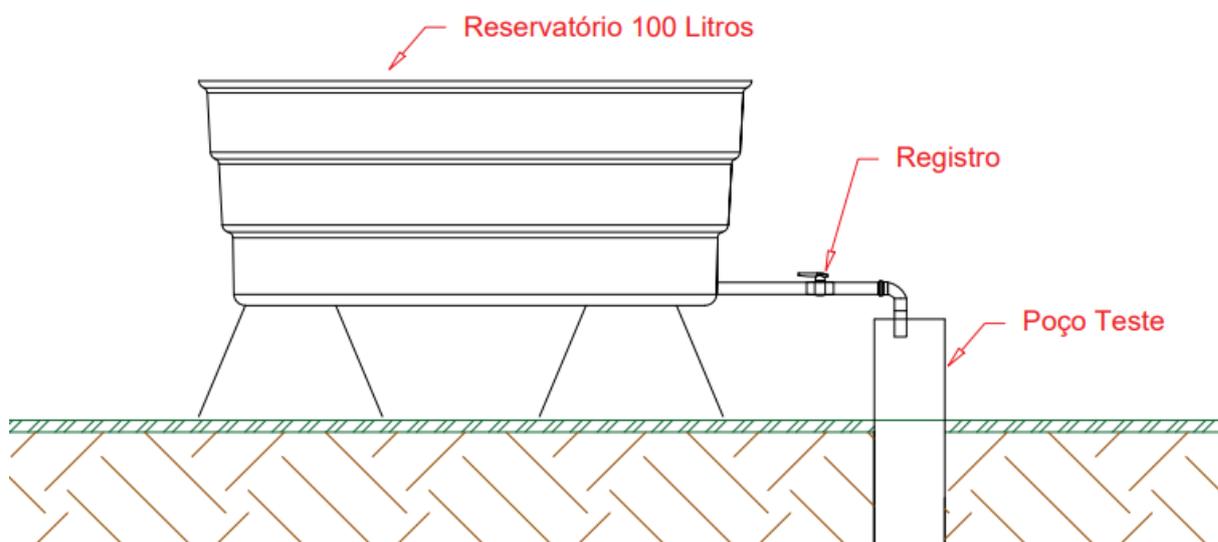
Figura 33 - Sensor instalado no poço teste



Fonte: Autora, 2024

O sistema completo está representado na figura a seguir (Figura 34) e sua montagem real (Figura 35).

Figura 34 - Representação da montagem do experimento



Fonte: Autora, 2024

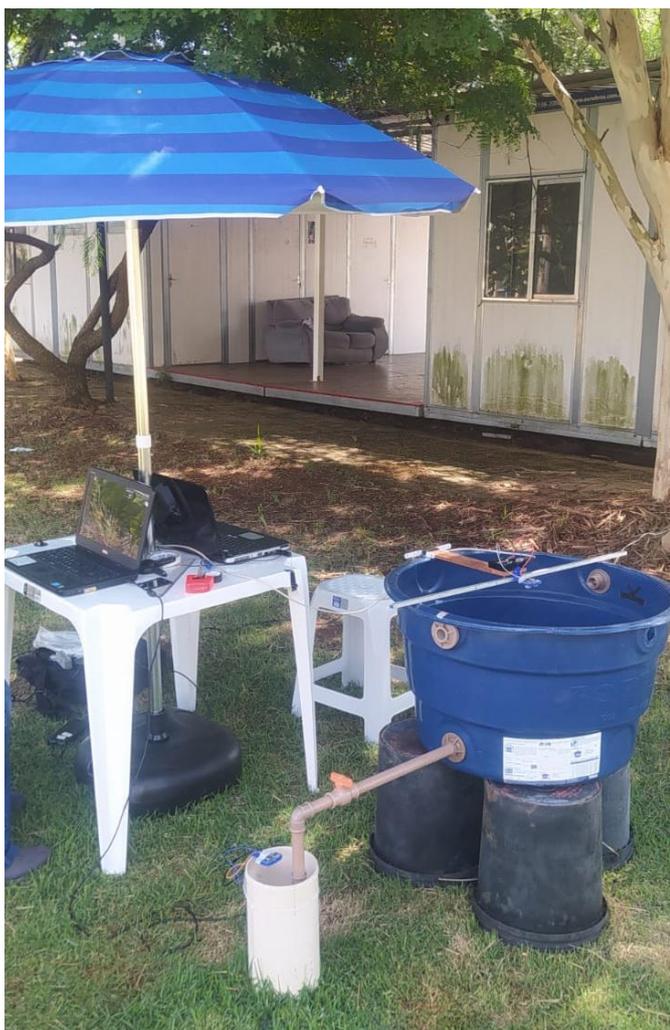
Figura 35 - Sistema de Teste para determinação da altura de água



Fonte: Autora, 2024

As Figuras 34 e 35 apresentam a montagem do experimento. Baseou-se a construção do sistema como forma de estudar a dinâmica de descarga de um reservatório simulando um evento de chuvas, e a alimentação do poço teste. Além de determinar o comportamento da água dentro do poço teste em relação ao enchimento, infiltração e esvaziamento.

Figura 36 - Sistema completo



Fonte: Autora, 2024

Para a leitura dos dados do sensor através do Arduino utilizou-se de um código aberto e disponível gratuitamente para download na página web do “projecthub arduino” (projecthub.arduino.cc). O código é apresentado através da tela inicial do Arduino apresentada pela Figura 37, e encontra-se no Anexo 1.

Figura 37 – Tela inicial do Arduino - Código utilizado

```

1  /*
2  * HC-SR04 example sketch
3  *
4  * https://create.arduino.cc/projecthub/Isaac100/getting-started-with-the-hc-sr04-ultrasonic-sensor-036388
5  *
6  * by Isaac100
7  */
8
9  const int trigPin = 9;
10 const int echoPin = 10;
11
12 float duration, distance;
13
14 void setup() {
15   pinMode(trigPin, OUTPUT);
16   pinMode(echoPin, INPUT);
17   Serial.begin(9600);
18 }
19
20 void loop() {
21   digitalWrite(trigPin, LOW);
22   delayMicroseconds(2);
23   digitalWrite(trigPin, HIGH);
24   delayMicroseconds(10);
25   digitalWrite(trigPin, LOW);
26
27   duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
28   distance = (duration*.0343)/2;
29   Serial.print("Distance: ");
30   Serial.println(distance);
31   delay(500);
32 }

```

Fonte: Autora, 2024

Utilizando-se da estrutura descrita, foram realizados dois testes, um com abertura parcial do registro e o segundo com abertura total.

5.4.1. Experimento 1 – Abertura parcial do registro

Para o primeiro teste realizado, configurou-se o sensor 01, do reservatório, para medir a distância da água em intervalos de 0,50 segundo. Para o sensor 02, do poço teste, as medições de nível foram configuradas para ocorrer a cada 10 segundos.

O reservatório foi preenchido, inicialmente, com água no nível de 21,70 cm (medido da cota superior de água e o centro do orifício de descarga). Ambos os computadores tiveram as medições dos sensores ativadas simultaneamente, possibilitando a determinação do tempo inicial do experimento.

Posteriormente, foi realizada a abertura parcial do registro conectado à tubulação de descarga do reservatório, simultânea à verificação do tempo zero do experimento.

Observou-se o enchimento do poço teste, e antes que o poço ultrapassasse o limite de água suportado por ele, o registro foi fechado. A coleta de dados pelo sensor 01 foi encerrada e os dados coletados foram salvos para posterior análise. A partir deste ponto foram mantidas apenas as medições da descida do nível de água do poço teste pelo sensor 02, até que este estivesse com seu nível de água próximo de zero.

5.4.2. Experimento 2 – Abertura total do registro

Para o segundo teste realizado, o sistema foi configurado de modo que, as medições de nível no reservatório, sensor 01, ocorressem a cada 0,50 segundo, assim como no primeiro teste. Já as medições de nível do poço teste, sensor 02, foram configuradas para ocorrer a cada 5 segundos, aumentando a frequência amostral comparado com o experimento 1, pois para a condição de abertura total haverá aumento de vazão de saída do reservatório e maior velocidade de subida de água dentro do poço.

Novamente o reservatório foi preenchido com água até o nível de 21,70 cm, da cota superior da água ao centro do orifício de descarga e os computadores foram acionados simultaneamente para início das medições.

Foi realizada a abertura total do registro conectado a tubulação de descarga do reservatório, e simultaneamente à verificação do tempo zero do experimento 2.

Assim como no experimento anterior, o registro do reservatório foi completamente fechado antes que o nível do poço teste ultrapassasse a altura máxima de água suportada. A coleta de dados do sensor 01 foi encerrada e seus dados foram salvos para posterior análise.

A partir deste ponto o experimento seguiu com as medições de nível de esvaziamento por infiltração do poço teste, com as coletas de dados pelo sensor 02. O experimento foi encerrado quando o nível de água do poço teste estava próximo de zero.

5.4.3. Tratamento dos dados

Após a realização da coleta dos dados, estes foram levados para o software Excel para que pudessem ser compreendidos e tratados.

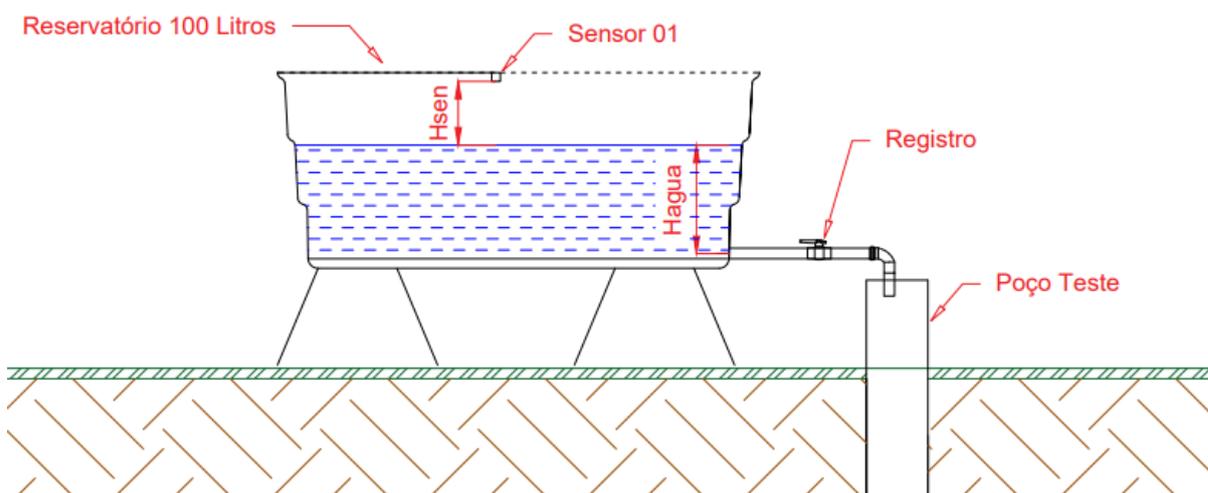
Os dados coletados estavam divididos em quatro bases de dados distintas. Cada experimento possuía duas bases de dados, sendo elas as coletadas pelos sensores 01 e 02, as quais são, respectivamente, a de descida de nível de água do reservatório de alimentação do sistema e a de subida e descida de água do poço de infiltração.

Inicialmente foram descartados todos os dados que foram coletados anteriormente à abertura do registro de água, em ambas bases de dados, uma vez que estes não fazem parte do experimento.

Em relação ao sensor 01, para determinação dos níveis e a do modelo de descida de água do reservatório, é necessário a construção da relação entre os dados

medidos pelo sensor e os níveis de água em relação ao orifício. Tal relação está descrita na equação (3).

Figura 38 - Posições das variáveis



Fonte: Autora, 2024

$$Hsens_0 + Hágua_0 = Hsens_{(t)} + Hágua_{(t)} \quad (3)$$

Em que:

$Hsens_0$: Altura entre o sensor e o nível de água inicial.

$Hsens_{(t)}$: Altura entre o sensor e o nível de água no tempo t.

$Hágua_0$: Altura de água medido até o centro do orifício de descarga inicial.

$Hágua_{(t)}$: Altura de água medido até o centro do orifício de descarga no tempo

t.

A partir da relação apresentada foram determinados os níveis de água do reservatório durante todo o período em que o registro estava aberto ou parcialmente aberto em cada um dos experimentos.

Com os valores da altura de água é possível a determinação do gráfico de descarga do reservatório.

Para o sensor 02, os níveis de água e os modelos, tanto de subida quanto de descida da água do poço teste, foi determinado através de uma diferença simples como apresentado pela equação (4).

$$Hágua_{(t)} = Hsens_0 - Hsens_{(t)} \quad (4)$$

Em que:

H_{sens_0} : Altura entre o sensor e o fundo do poço.

$H_{sens(t)}$: Altura entre o sensor e o nível de água no tempo t .

$H_{água(t)}$: Altura de água medido até o fundo do poço teste no tempo t .

A partir desta relação foram determinados os níveis de água do poço teste durante todo o experimento, até sua pausa com o nível de água em seu interior próximo a zero.

Com os valores da altura de água é possível a determinação do gráfico do nível de água do poço em relação ao tempo, e determinação de seus modelos de enchimento e esvaziamento.

5.5. MODELAGEM MATEMÁTICA

5.5.1. Equações de Saída por Infiltração

A partir dos dados de volume coletados e os intervalos de tempo entre as medições, obtidos através do ensaio descrito no item 5.3, é necessária a determinação das velocidades e vazões de infiltração para o solo estudado.

A organização dos dados foi realizada através do software Microsoft Excel. Para a obtenção das vazões instantâneas em cada um dos momentos de medição, é utilizada a relação, apresentada:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

Em que:

Q : Vazão (m^3/s)

ΔV : Variação de Volume (m^3)

Δt : Variação de Tempo (s)

As vazões obtidas através da equação (5) foram organizadas e posteriormente utilizadas para obtenção dos dados de velocidade de infiltração para cada um dos níveis de água ensaiados. Para tal, utilizou-se os valores obtidos anteriormente na equação (6).

$$Velocidade = \frac{\Delta Q}{A_{poço\ teste}} \quad (6)$$

Em que:

Velocidade: Velocidade de infiltração da água no solo (m/s)

ΔQ : Variação de Vazão (m³/s)

$A_{poço\ teste}$: Área de fundo do poço simulado (m²)

O procedimento foi realizado para todos os níveis ensaiados, obtendo-se, desta forma, quatro valores de velocidades médias para o solo em questão.

Para que seja possível realizar a modelagem computacional, entretanto, é necessário que haja um equacionamento da vazão de infiltração do solo em relação ao nível de água presente sobre ele.

Pode-se interpretar que a velocidade de infiltração de um solo (taxa de infiltração), se mantém a mesma, em um mesmo tipo de solo, independente de qual a área de contato que a água tem perante ao solo permeável. Desta forma, foram utilizados os valores de velocidades de infiltração obtidas através do ensaio descrito para a determinação da vazão de infiltração do poço de infiltração estudado.

Sendo a área de contato da água com o solo diferente entre o poço teste ($\varnothing=0,15\text{m}$) e o poço de infiltração real estudado ($\varnothing=1,10\text{m}$) (Ferreira, 2016), não é possível a utilização dos valores exatamente como obtidos durante os testes de infiltração. Os valores adotados para a determinação da vazão de infiltração da estrutura serão os de velocidade de infiltração, ou taxa de infiltração encontrados durante o experimento.

Para transformar a taxa de infiltração em vazão novamente, pode-se apenas utilizar-se da equação (6), alterando-se a área de fundo do poço simulado, para a área de fundo do poço real, como é possível observar na equação (7).

$$Velocidade = \frac{\Delta Q}{A_{poço\ real}} \quad (7)$$

Em que:

Velocidade: Velocidade de infiltração da água no solo (m/s)

ΔQ : Variação de Vazão (m³/s)

$A_{poço\ real}$: Área de fundo do poço de infiltração (m²)

Para a obtenção da equação da vazão de infiltração do poço em tamanho real (P-SC), utilizou-se os valores obtidos em cada um dos quatro níveis, gerando através deles um gráfico, e conseqüentemente uma equação, que relaciona o Nível de Água e a Vazão de Saída.

A equação trata-se de uma relação entre os valores de Vazão de infiltração obtidos nos níveis de lâmina de água ensaiados.

5.6. MODELAGEM COMPUTACIONAL

5.6.1. Métodos de Runge-Kutta

Os problemas de engenharia que se baseiam em equações compostas por funções conhecidas e suas derivadas são conhecidas como equações diferenciais. Em que a variável que está sendo derivada é chamada de dependente e aquela pela qual a variável dependente está sendo derivada é chamada de independente. Caso a função tenha apenas uma variável independente ela é chamada de Equação diferencial ordinária (EDO) (CHAPRA; CANALE, 2011).

As leis de continuidade, por exemplo, de energia, da massa e do momento produzem equações diferenciais, no caso estudado neste trabalho, será obtido um balanço de massa, no interior dos poços.

Os métodos de Runge-Kutta (RK) são capazes de alcançar a acurácia de uma abordagem utilizando-se a série de Taylor sem exigir cálculos de derivadas superiores (CHAPRA; CANALE, 2011).

São também conhecidos como métodos de passo único, pois para se obter o valor do passo (n+1) é necessário conhecer apenas o valor do passo anterior (n), e podem ser expressos como na equação (8), o que altera nos diferentes métodos é como é realizado o cálculo da inclinação (CHAPRA, 2006; CHAPRA; CANALE, 2011).

$$\text{Valor novo} = \text{Valor antigo} + \text{inclinação} \cdot \text{tamanho do passo} \quad (8)$$

A equação acima também pode ser descrita matematicamente como se segue na equação (9).

$$y_{i+1} = y_i + \varphi \cdot h \quad (9)$$

O primeiro método RK é o de primeira ordem, conhecido como Método de Euler. Com o uso do Vensim, é possível utilizar o Método de Euler (Runge-Kutta de 1ª Ordem) ou o Runge-Kutta de 4ª Ordem.

5.6.1.1. Método de Euler – Runge-Kutta de 1ª Ordem

O método de Euler utiliza a primeira derivada como estimativa da inclinação no ponto. Sendo assim, $\varphi = f(x_i, y_i)$ implicando na equação geral do método de Euler dada por:

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) \cdot h \quad (10)$$

5.6.1.2. Método de Heun – Runge-Kutta de 2ª Ordem

Para o Método de Heun, a inclinação é dada através de uma estimativa que envolve a determinação de duas derivadas no intervalo, no início e no final. É então realizada uma média entre essas derivadas para melhorar a estimativa da inclinação.

$$y_{i+1} = y_i + \left(\frac{1}{2}k_1 + \frac{1}{2}k_2\right) \cdot h \quad (11)$$

Em que:

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (12)$$

$$k_2 = f(x_i + h, y_i + k_1 h) \quad (13)$$

Sendo que k_1 é a inclinação no início do intervalo e k_2 é a inclinação no final do intervalo.

5.6.1.3. Runge-Kutta de 3ª Ordem

O método do Runge-Kutta de 3º Ordem pode ser determinado conforme a equação a seguir.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 4k_2 + k_3) \cdot h \quad (14)$$

Em que:

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (15)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1 h\right) \quad (16)$$

$$k_3 = f(x_i + h, y_i - k_1 h + 2k_2 h) \quad (17)$$

5.6.1.4. Runge-Kutta de 4ª Ordem

O método do Runge-Kutta de 4ª Ordem pode ser determinado conforme a equação a seguir.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \cdot h \quad (18)$$

Em que:

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (19)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1 h\right) \quad (20)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2 h\right) \quad (21)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3 h) \quad (22)$$

Para a resolução das equações diferenciais utilizadas nesse trabalho foi utilizado o método de Runge-Kutta de 4ª Ordem disponível no software Vensim.

5.6.2. Dinâmica de sistemas

A técnica da dinâmica de sistemas foi criada pelo Professor Jay W. Forrester do Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1961, e trata-se de um método para melhorar a aprendizagem em sistemas complexos. Se fundamenta em uma teoria dinâmica não linear e de controle de retroalimentação desenvolvida em matemática, física e engenharia (STERMAN, 2001).

Um modelo de dinâmica de sistemas é composto por estoques e fluxos e fatores que afetam os fluxos. Os principais elementos utilizados na dinâmica de sistema são: variáveis, constantes, estoques, fluxos, informações e fontes externas (BARBROOK-JOHNSON, 2022; VILELLA, 2005).

Os estoques são acumulações ou esgotamentos de recurso, e descrevem a condição do sistema em momentos específicos, dependendo diretamente do acontecido no tempo anterior, já que seu cálculo é uma somatória do estoque anterior mais as diferenças entre entradas e saídas no passo de tempo atual (FORRESTER, 1971, VILELLA, 2005).

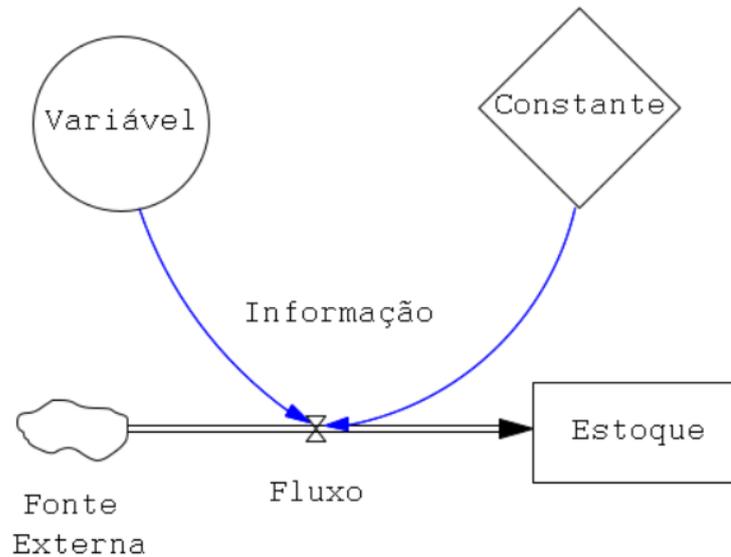
Os fluxos representam, segundo Forrester (1971), o quão rápido os estoques se modificam no sistema, e diferente dos estoques não dependem do seu valor anterior. Tratam-se de taxas descritas por equações, suas dimensões são caracterizadas por uma grandeza por tempo, como por exemplo, metros cúbicos por segundo.

As variáveis e constantes são parâmetros para o sistema, são utilizadas para definir as equações dos fluxos, dos estoques ou de outras variáveis (DYSON; CHANG, 2005; VILELLA, 2005).

As informações são uma ligação entre os elementos do sistema e indica que aqueles termos apresentam uma relação. E por fim, as fontes externas são fontes de recurso que estão fora do escopo de interesse do sistema estudado, portanto os detalhes desta fonte não são levados em consideração para o modelo (VILELLA, 2005).

Na representação visual do sistema, cada um dos elementos é representado por uma forma geométrica diferente, um exemplo dessas formas pode ser observado na Figura 39.

Figura 39 - Elementos da Dinâmica de Sistemas



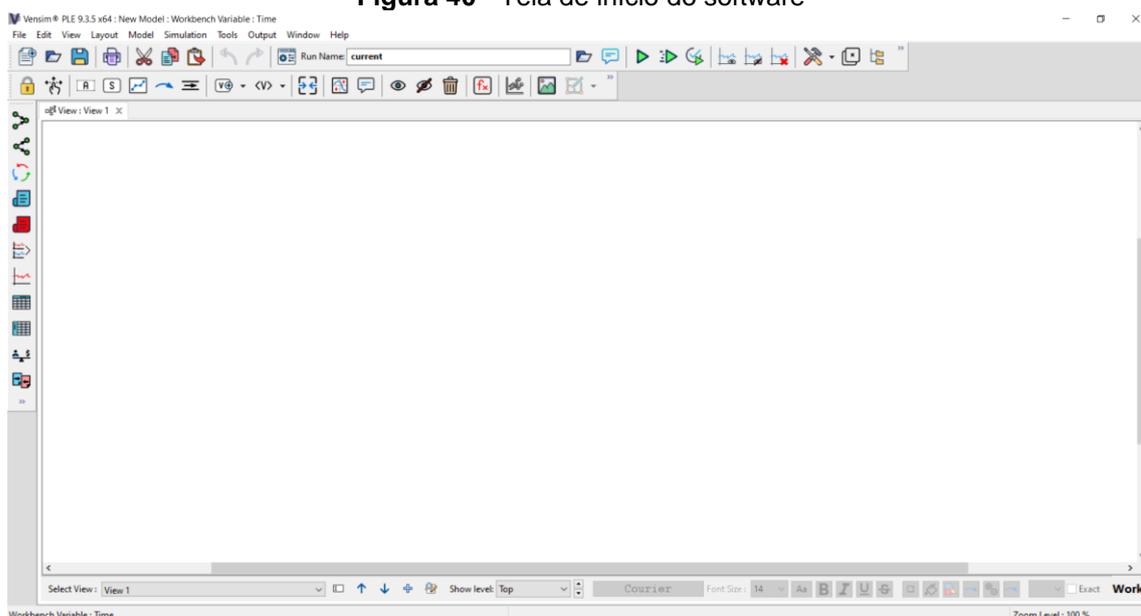
Fonte: Adaptado de Villela, 2005

Computacionalmente o modelo de dinâmica de sistemas pode ser desenvolvido em diversos softwares, como o Dynamo, o Powersim, o Stella e o Vensim. Para o presente trabalho, será utilizado o software Vensim.

5.6.3. Vensim

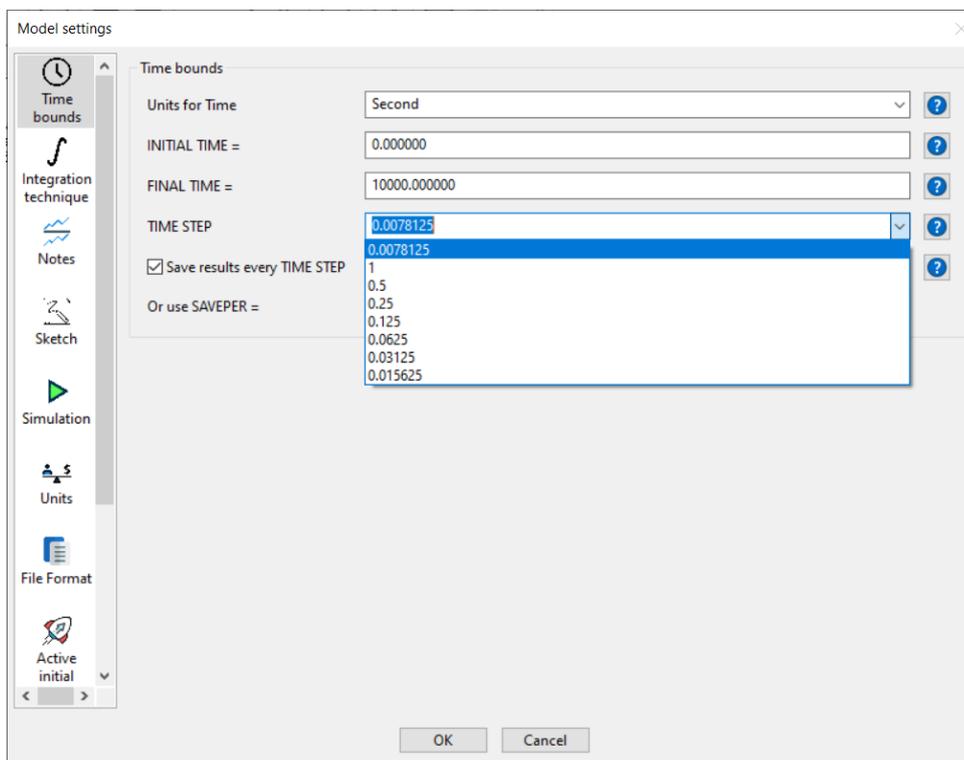
O Vensim PLE é um software gratuito de análise de dinâmica de sistemas desenvolvido pela Ventana Systems Inc. Neste trabalho utilizou-se a Versão 9.3.5 disponível para download na página do desenvolvedor.

O software consiste em um modelo de dinâmica de sistemas, com uma interface amigável ao usuário, em que não é necessária a utilização de linguagens de programação para o cálculo das equações de modelagem matemática, mas apenas a montagem do sistema a ser analisado.

Figura 40 - Tela de início do software

Fonte: Autora, 2024

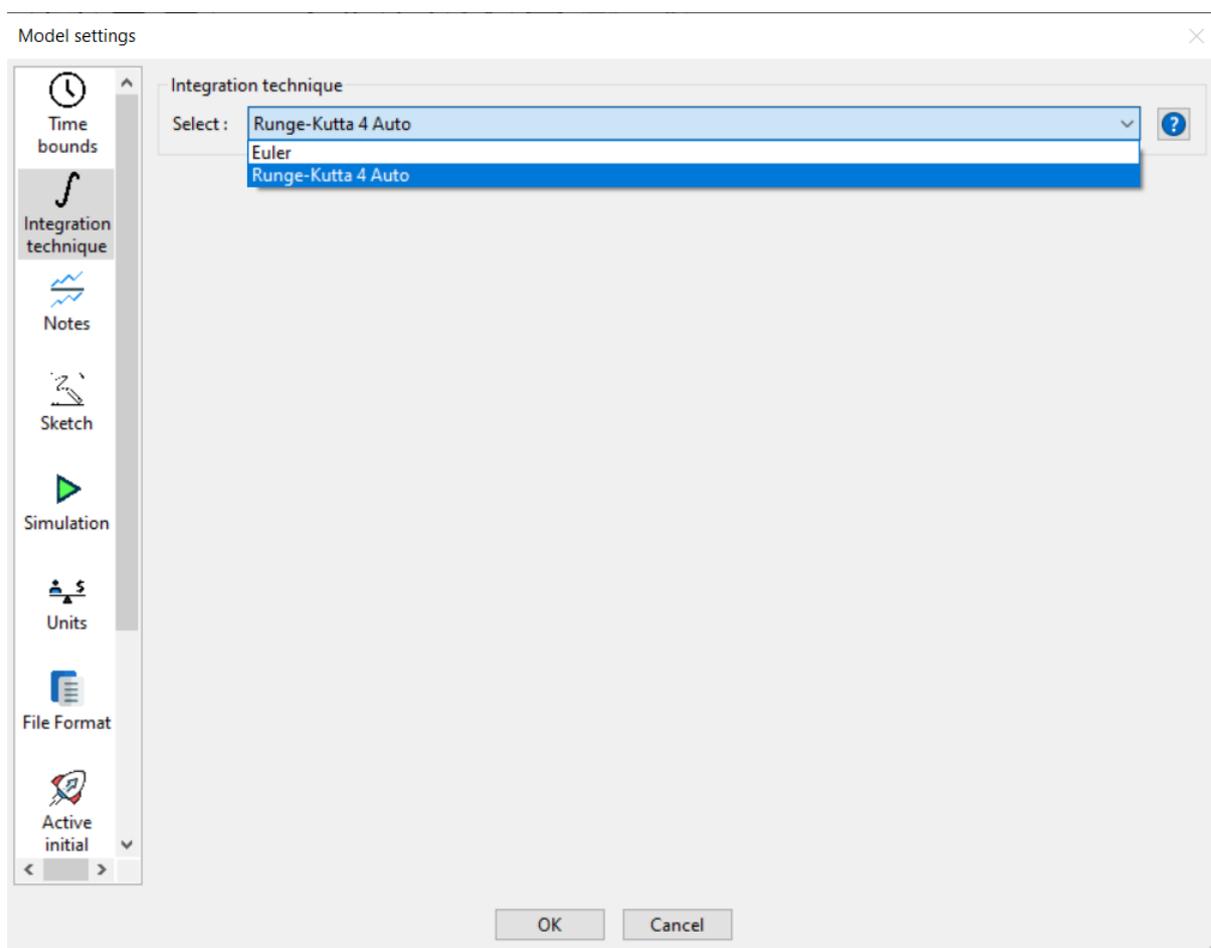
O início da construção do modelo se dá com a escolha das unidades de simulação e o passo de tempo a ser utilizado, valores esses que também podem ser modificados durante o procedimento de simulação. Como apresentado nas Figuras 41 e 42.

Figura 41 - Unidades e Tempo de simulação

Fonte: Autora, 2024

Como apresentado na Figura 41, o Vensim possui passos de tempo (time step) pré-determinados, que variam de 1 a 0,0078125 segundos. Dada a possibilidade de utilização de passos de tempo consideravelmente pequenos, ao utilizá-los é possível a obtenção de uma maior precisão na resolução numérica das equações discretizadas, entretanto, para obter esta maior precisão, exige-se um maior custo do processamento computacional, quando comparado à utilização de um passo de tempo menor.

Figura 42 - Técnicas de integração



Fonte: Autora, 2024

Na Figura 42, é possível observar as duas técnicas de integração disponíveis no Vensim para o cálculo das equações. A primeira delas é o Método de Euler (Runge-Kutta de 1º ordem), sendo este, um método de integração mais simples.

O método de Euler tem sua vantagem ligada à sua simplicidade de aplicação, entretanto, apresenta uma menor acurácia, quando comparado aos métodos RK de ordens superiores, e, como apresentado por Chapra e Canale (2011) é um método que exige um esforço computacional alto para obtenção de erros aceitáveis.

O método de RK de 4ª ordem, também disponível do Vensim, trata-se de um dos métodos de integração mais precisos para a obtenção de soluções e bastante difundido dentre métodos do cálculo numérico computacional (VALLE, 2012; PEDROSA, 2003).

Desta forma, para as modelagens a serem geradas no software Vensim, serão utilizadas as melhores situações possíveis, a utilização do menor passo de tempo permitido pelo programa (0,0078125 segundos) e o melhor método de integração (Runge-Kutta de 4ª ordem). Ainda que estes tenham gastos computacionais consideráveis, a pequena dimensão do sistema estudado torna possível a utilização dos mesmos.

Após as configurações iniciais, o próximo passo é o desenho das estruturas na tela inicial. A inserção de dados no programa ocorre de uma forma amigável e intuitiva. As teclas de comando constam na parte superior da tela inicial.

Figura 43 - Inserção de Variáveis



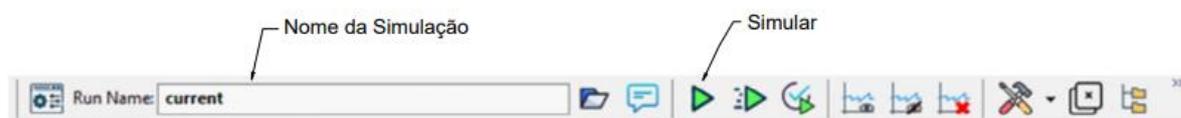
Fonte: Autora, 2024

A linha de comandos lateral serve para análises pós simulação. Consistem em comandos para geração de gráficos das variáveis existentes na simulação, independente da natureza, e para apresentação de tabelas com cada um dos valores dos passos calculados durante a simulação.

Figura 44 - Comandos pós simulação

Fonte: Autora, 2024

As simulações são iniciadas, dando-se um nome a elas na primeira linha de comandos apresentada na tela inicial, e depois acionando o botão de iniciar a simulação, de forma simples e intuitiva.

Figura 45 - Comandos de Simulação

Fonte: Autora, 2024

5.6.4. Modelo de Simulação Dinâmica

Segundo Sterman (2001) para construir-se um modelo de simulação dinâmica são necessários quatro passos. Inicialmente é necessária a determinação dos diagramas de relações causais, que consistem em loops positivos (processo de auto reforço) e negativos (autocorretivos) para as variáveis do seu sistema, ou seja, se as relações aumentam, ou diminuem as suas variáveis.

O segundo passo é a construção e determinação dos diagramas de estoques e fluxos. O diagrama mostra os estoques, os fluxos e as variáveis, além da forma em que elas se conectam. Os estoques sendo aquelas variáveis que retêm parte de sua entrada em relação a sua saída. No caso apresentado as variáveis de estoque são aquelas representadas pelos retângulos. Já as variáveis de fluxo são aquelas que encaminham os dados para as estruturas de estoque, neste caso são representadas por “tubos” com setas que indicam o sentido do fluxo. (FORRESTER, 1971; STERMAN, 2001)

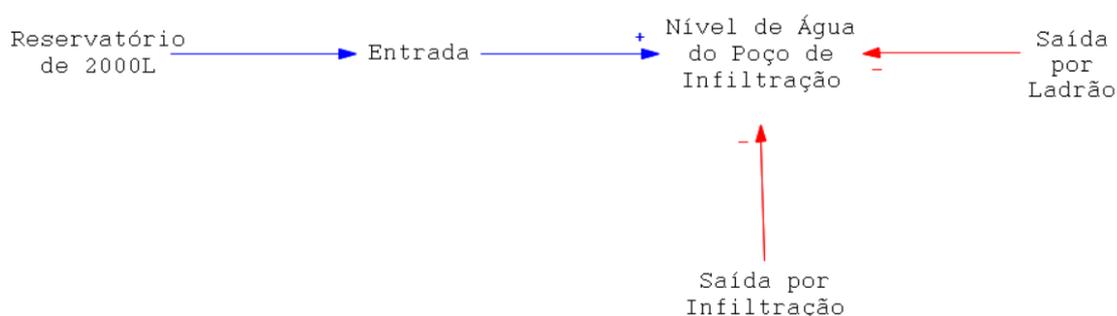
O terceiro passo é a definição das equações. O sistema é alimentado através de equações de fluxo e de estoque, além das equações auxiliares, que são apresentadas por variáveis auxiliares, necessárias para a composição do diagrama e da dinâmica estudada. Estas equações determinam a intensidade e o tempo para o equilíbrio do sistema (FORRESTER, 1971; STERMAN, 2001).

O quarto passo é a simulação, no momento em que todas as variáveis já estiverem pré-determinadas e desenhadas de forma satisfatória, descrevendo o processo em estudo é realizada a simulação do modelo, obtendo assim gráficos e tabelas que descrevem o comportamento estudado e que será o ponto de análise de comportamento (STERMAN, 2001).

5.6.4.1. Diagrama de Relações Causais

Para iniciar o processo é necessária a construção das relações de dependências, ou relações de causa e efeito, entre as variáveis apresentadas. Essas relações causais podem ser observadas no diagrama abaixo.

Figura 46 - Diagrama de Relações Causais



Fonte: Autora, 2024

O diagrama acima aponta dois loops, sendo o primeiro positivo, de entrada e aumento do nível do poço de infiltração, já o segundo, negativo, de saída e diminuição do nível, composto por duas variáveis de saída distintas.

O primeiro loop, é alimentado pelo hidrograma afluyente, representado neste caso pelo Reservatório de PVC de 2.000 Litros, em um evento de chuvas real, o hidrograma seria representado pela descarga de vazão vinda da edificação durante o evento.

O segundo loop, é alimentado pela equação de infiltração e de saída por orifício. Ressalta-se que diferentemente do primeiro loop, que é independente dos valores internos do sistema, o segundo loop, especificamente o de saída por ladrão, depende dos valores de nível do poço de infiltração para ser iniciado, uma vez que o orifício tem uma altura e, portanto, há um nível mínimo de água para o início da operação.

5.6.4.2. Diagramas de Estoques e Fluxos

As variáveis do sistema, podem ser observadas na Figura 46 (Diagrama de Relações Causais), no entanto é necessário a determinação de suas naturezas dentro da dinâmica de sistemas, para a determinação do modelo.

A primeira variável a ser compreendida é a do Poço de infiltração em si, que no diagrama apresenta o nome de Nível de Água no Poço de Infiltração, e trata-se de uma variável de natureza de estoque, uma vez que, seus valores, com o passar do tempo podem aumentar ou diminuir dependendo dos efeitos do sistema. Esta variável trata-se do próprio poço de infiltração, e apresenta a natureza de armazenar volume, que neste caso está descrito como nível, cumprindo a mesma função, já que o nível de água e o volume tratam-se de variáveis diretamente proporcionais.

As variáveis de entrada e saída são variáveis de fluxo, já que contribuem positiva ou negativamente para o nível de água do poço de infiltração dependendo do seu sentido de fluxo, neste caso, a entrada contribui positivamente e as saídas negativamente.

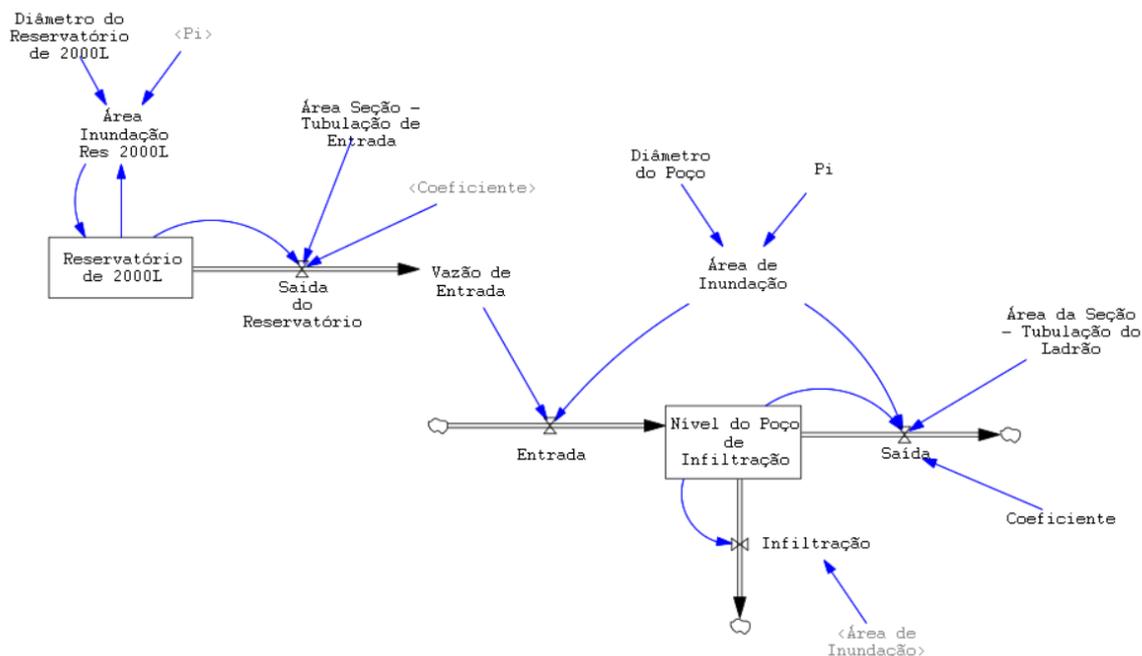
Após essas determinações, surgem as variáveis auxiliares, aquelas que são necessárias para que as equações das variáveis principais sejam apresentadas.

O restante das variáveis tratam-se de constantes necessárias para a realização dos cálculos internos ao modelo. Estas variáveis são apresentadas em

interligações no desenho do sistema a fim de demonstrar as correlações e os dados de entrada necessários para resolução do sistema apresentado.

O sistema e suas relações e variáveis são apresentadas na Figura 47.

Figura 47 - Modelagem do Poço de Infiltração no Vensim



Fonte: Autora, 2024

5.6.4.3. Determinação das equações

As equações apresentadas nos itens 5.3 e 5.5 são as que serão utilizadas para a determinação do sistema. Para que a variável de estoque fosse representada pelo nível do poço de infiltração, e não o volume, as equações de vazões de entrada e saída deste sistema foram divididas pela área de fundo do poço de infiltração.

5.6.4.4. Simulação

A partir do ponto em que todas as equações foram devidamente determinadas no sistema é possível realizar a simulação. Para realizá-la é necessário primeiramente determinar as configurações da simulação, sendo a primeira delas a determinação do passo de tempo que será utilizado no sistema, que para tornar os erros os menores possíveis, é utilizado o menor passo de tempo disponível no software (0,0078125 segundos).

A segunda configuração necessária são os tempos iniciais e finais da simulação. Para este caso será utilizado o tempo inicial em 0 segundos e o tempo final em 8.000 segundos.

O terceiro passo é a determinação da técnica de integração a ser utilizada. Para a aproximação mais fiel ao resultado analítico será utilizado a técnica de Runge-Kutta de 4ª ordem disponível no software.

5.7. CRITÉRIOS ESTATÍSTICOS

São utilizados como critérios estatísticos para avaliar um ajuste de modelo hidrológico principalmente, o coeficiente de determinação (R^2) e o Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS). O valor de R^2 varia entre 0 e 1, sendo 1 o ajuste perfeito. O valor de Nash e Sutcliffe também apresenta o valor 1 como o perfeito ajuste.

O coeficiente de determinação R^2 , é dado através da equação:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (NA_{vensim} - \overline{NA_{obs}})^2 \quad (23)$$

Onde:

R^2 : coeficiente de determinação (adimensional)

NA_{vensim} : Nível de água calculado pelo modelo – Vensim (m)

$\overline{NA_{obs}}$: Média dos níveis de água medidos (m)

n : número de observações

O coeficiente de Nash e Sutcliffe, é dado através da equação:

$$NS = 1 - \frac{\sum (NA_{obs} - NA_{vensim})^2}{\sum (NA_{obs} - \overline{NA_{obs}})^2} \quad (24)$$

Onde:

NS: coeficiente de Nash e Sutcliffe (adimensional)

NA_{vensim} : Nível de água calculado pelo modelo – Vensim (m)

NA_{obs} : Nível de água observado (m)

$\overline{NA_{obs}}$: Média dos níveis de água medidos (m)

6. RESULTADOS

6.1. ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO

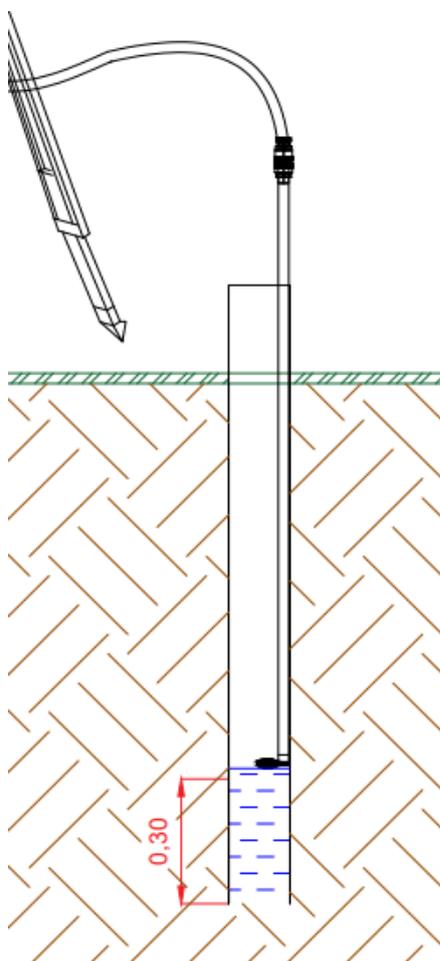
O experimento foi realizado no dia 14 de dezembro de 2023, no contexto de não ocorrência de chuvas no dia anterior a realização do experimento em questão.

A partir da metodologia descrita anteriormente, foram realizados quatro ensaios de infiltração, com níveis de água de 30cm, 60cm, 90cm e 117,50cm. Os valores obtidos nestes testes podem ser observados a seguir.

6.1.1. Nível de água a 30cm da base

Inicialmente posicionou-se a torneira boia a 30cm da base do infiltrômetro, como demonstrado na Figura 48, a fim de manter-se o nível de água em 30cm. Neste teste obteve-se os valores apresentados na Tabela 2, abaixo.

Figura 48 - Posicionamento da boia $h=0,30m$



Fonte: Autora, 2024

Tabela 2 - Dados de Infiltração - h=30cm

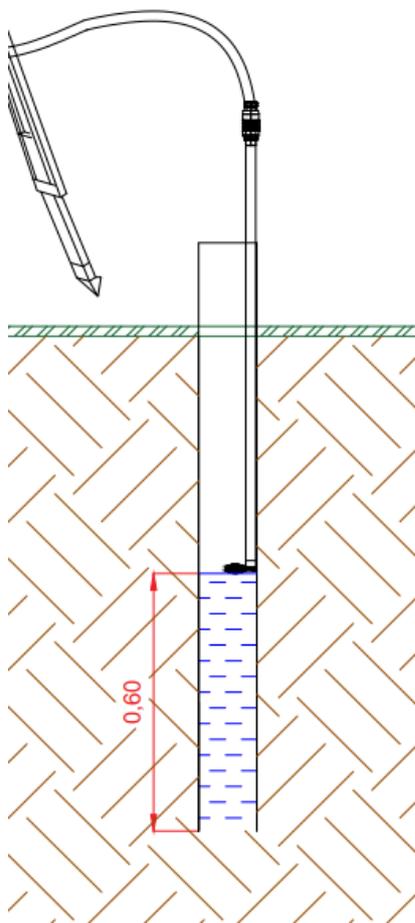
Tempo (s)	Volume 1 (ml)	Volume 2 (ml)
0	0	0
20	80	80
40	160	165
60	240	235
80	315	320
100	390	395
120	470	470
140	545	550
160	620	625
180	690	700
200	775	775
220	840	845
240	920	920

Fonte: Autora, 2024

Para o nível de água considerado foram obtidas um total de 13 medições e um tempo total de ensaio de 240 segundos, como é possível observar na Tabela.

6.1.2. Nível de água a 60cm da base

Para o segundo ensaio posicionou-se a torneira boia a 60cm da base do infiltrômetro, como demonstrado na Figura 49, a fim de manter-se o nível de água em 60cm. Neste teste obteve-se os valores apresentados na Tabela 3, abaixo.

Figura 49 - Posicionamento da boia $h=0,60\text{m}$ 

Fonte: Autora, 2024

Tabela 3 - Dados de Infiltração - $h=60\text{cm}$

Tempo (s)	Volume 1 (ml)	Volume 2 (ml)
0	0	0
20	100	100
40	210	205
60	305	300
80	405	395
100	500	490
120	600	585
140	690	680
160	780	775
180	880	870
200	960	960

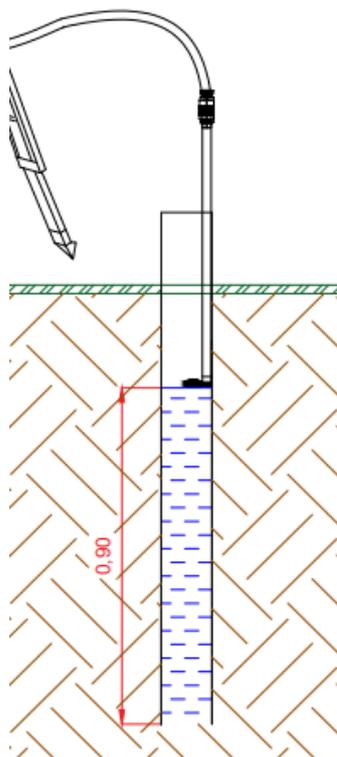
Fonte: Autora, 2024

Para o nível de água considerado foram obtidas um total de 11 medições e um tempo total de ensaio de 200 segundos, como é possível observar na Tabela.

6.1.3. Nível de água a 90cm da base

Ao posicionar a torneira boia a 90cm da base do infiltrômetro, obtém-se os valores apresentados na Tabela 4, abaixo.

Figura 50 - Posicionamento da boia h=0,90m



Fonte: Autora, 2024

Tabela 4 - Dados de Infiltração - h=90cm

Tempo (s)	Volume 1 (ml)	Volume 2 (ml)
0	0	0
20	135	135
40	270	260
60	400	390
80	530	525
100	660	655
120	785	780
140	920	920

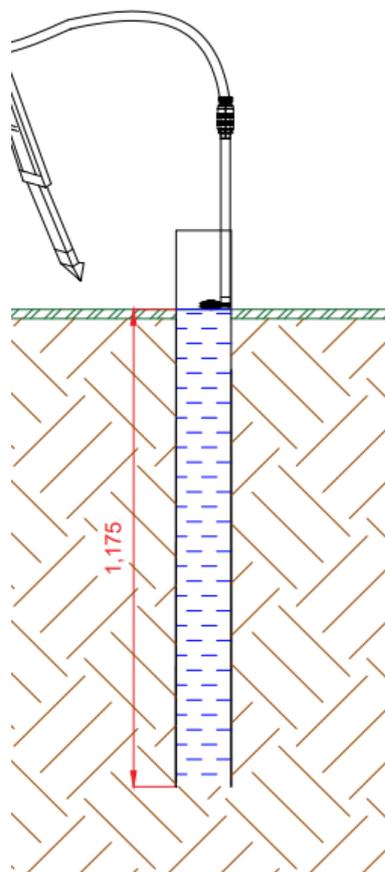
Fonte: Autora, 2024

Como observado na tabela de dados, foram obtidos para tal nível de água 8 medições, em um tempo total de ensaio de 140 segundos.

6.1.4. Nível de água a 117,50cm da base

Ao posicionar a torneira boia a 117,50cm da base do infiltrômetro, obtém-se os valores apresentados na Tabela 5, abaixo.

Figura 51 - Posicionamento da boia h=117,5m



Fonte: Autora, 2024

Tabela 5 - Dados de Infiltração - h=117,50cm

Tempo (s)	Volume 1 (ml)	Volume 2 (ml)
0	0	0
20	250	250
40	490	485
60	725	725
80	960	960

Fonte: Autora, 2024

Como observado na tabela de dados, foram obtidos para tal nível de água 5 medições, em um tempo total de ensaio de 80 segundos.

6.1.5. Comparação dos níveis de água

Inicialmente, apenas ao observar o número de medições resultantes de cada um dos níveis de água durante o ensaio, há uma clara diminuição da quantidade de medições possíveis de serem realizadas com o volume limitado do cilindro graduado (1.000ml).

A redução do número de medições possíveis implica em um aumento da velocidade de infiltração no solo com o aumento do nível de água, como pode-se observar na Tabela 6.

Tabela 6 – Vazões e Velocidades de Infiltração médias por nível de água do ensaio

Nível de Água (m)	Vazão de Saída média (m ³ /s)	Velocidade de Infiltração média (m/s)
0,300	3,83E-06	2,17E-04
0,600	4,80E-06	2,72E-04
0,900	6,57E-06	3,72E-04
1,175	1,20E-05	6,79E-04

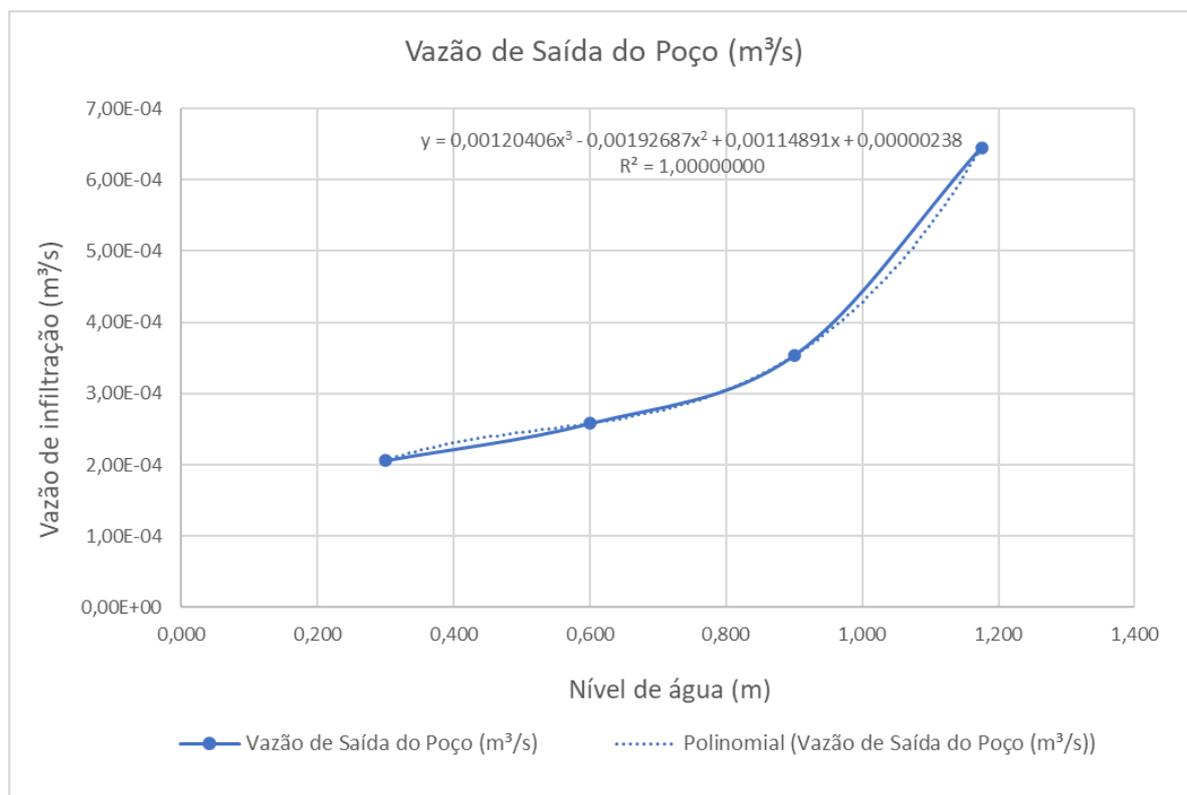
Fonte: Autora, 2024

Através destes dados, apresentados na Tabela anterior e dos passos descritos no item 5.4 foi possível obter a Tabela e o gráfico e sua equação abaixo.

Tabela 7 - Vazão de Saída do Poço em relação ao nível

h (m)	Velocidade de infiltração (m/s)	Vazão de Saída do Poço (m ³ /s)
0,300	2,17E-04	2,06E-04
0,600	2,72E-04	2,58E-04
0,900	3,72E-04	3,53E-04
1,175	6,79E-04	6,45E-04

Fonte: Autora, 2024

Figura 52 - Gráfico de Vazão de Infiltração em relação ao nível de água

Fonte: Autora, 2024

A equação que descreve o fenômeno, é apresentada abaixo.

$$Q_{infiltração} = 0,00120406 \cdot h^3 - 0,00192687 \cdot h^2 + 0,00114891 \cdot h + 2,38 \cdot 10^{-6} \quad (25)$$

Em que:

$Q_{infiltração}$: Vazão de saída por infiltração (m³/s)

h : Nível de água no interior do poço de infiltração (m)

A equação (25) é a equação que será inserida no Software Vensim a fim de descrever o comportamento da saída por infiltração do sistema estudado.

6.2. ENSAIO DO COMPORTAMENTO DA ÁGUA

O experimento de altura de água foi realizado na data de 20 de março de 2024, em um contexto de ocorrência de chuva no dia anterior na cidade de São Carlos e no local de realização do experimento, portanto é necessário considerar um solo mais úmido no início do experimento, quando comparado ao ensaio de infiltração.

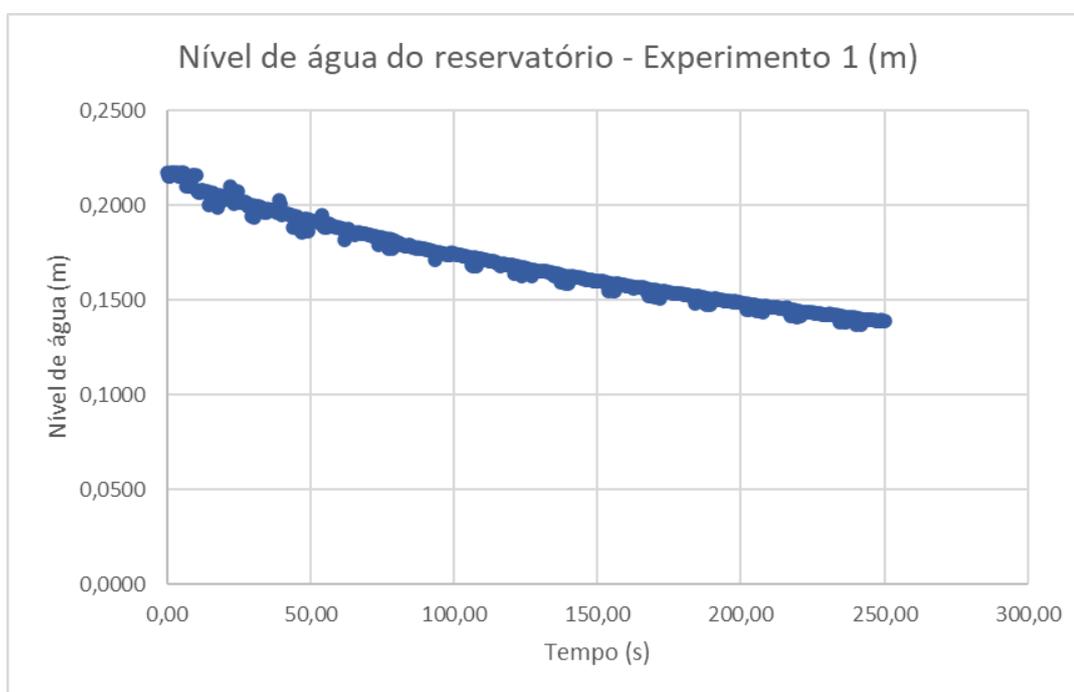
A partir da metodologia descrita no item 5.4, foi possível coletar dados em quatro diferentes bancos de dados.

Após o tratamento dos dados descritos, é possível a determinação dos gráficos em cada um dos sensores em cada um dos experimentos.

6.2.1. Experimento 1 – Abertura parcial do registro

Após o tratamento de dados foi possível a construção de dois gráficos de nível de água. O primeiro para o modelo de esvaziamento do reservatório, cujo tempo total de esvaziamento foi de 250 segundos. O gráfico obtido está apresentado na Figura 53.

Figura 53 – Nível de água do Reservatório



Fonte: Autora, 2024

Utilizando-se do modelo de equacionamento descrito por Giorgetti (2008), o esvaziamento de reservatórios segue o equacionamento abaixo.

$$h = \left[\sqrt{h_0} - \frac{1}{2} \cdot k \cdot t \right]^2 \quad (26)$$

Em que:

h : Nível do reservatório (m);

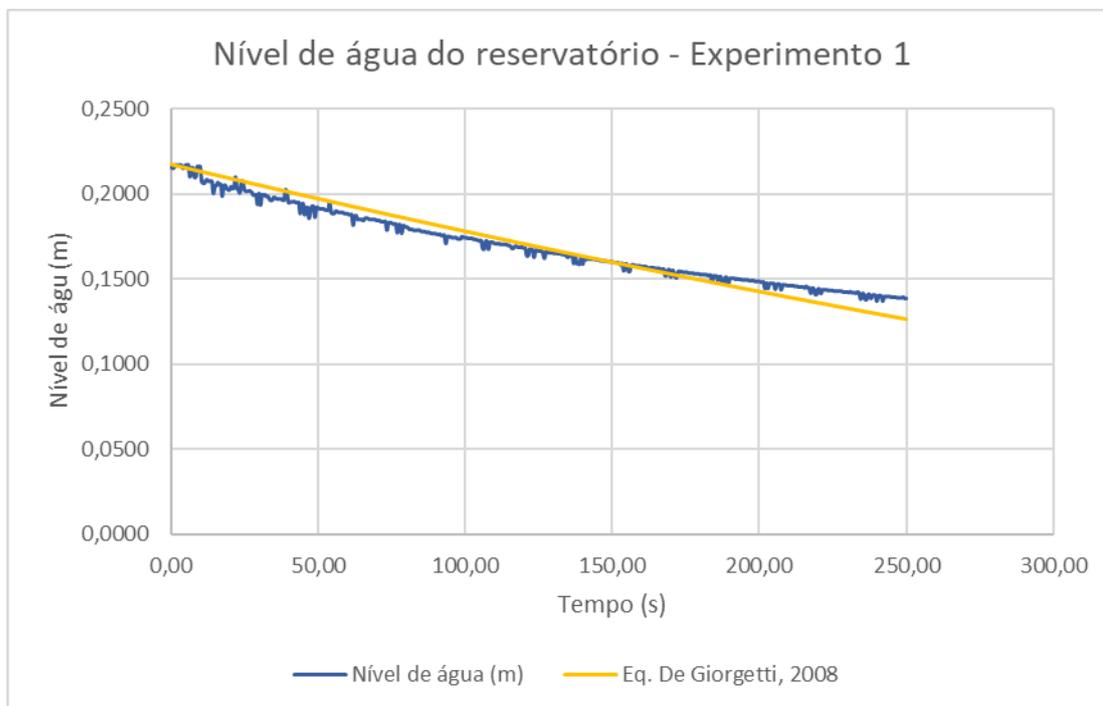
h_0 : Nível inicial do reservatório (m);

k : Constante de ajuste para a descarga;

t : Tempo (s).

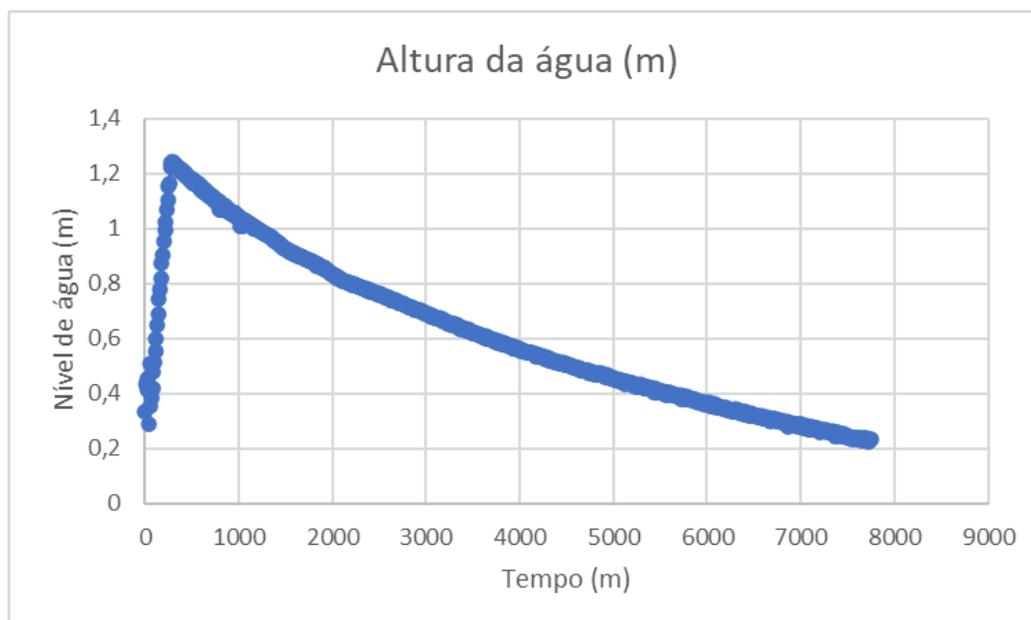
Para o gráfico apresentado na Figura 53, o valor que mais se aproxima para a constante de ajuste de descarga do gráfico obtido é 0,00088. Os gráficos comparativos são observados na Figura 54.

Figura 54 - Nível de água do Reservatório - Experimento 1



Fonte: Autora, 2024

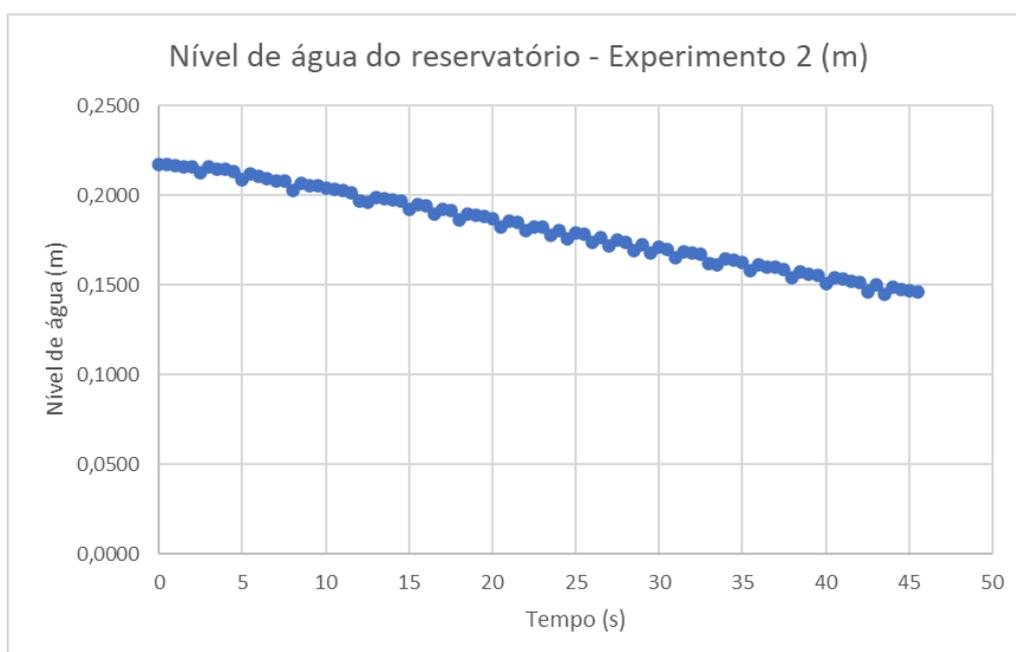
O segundo gráfico construído é a relação entre o nível de água e o tempo no interior do poço teste, sendo possível a determinação do comportamento de enchimento e de esvaziamento da estrutura. O tempo total de 7.860 segundos.

Figura 55 - Nível de água do poço teste

Fonte: Autora, 2024

6.2.2. Experimento 2 – Abertura total do registro

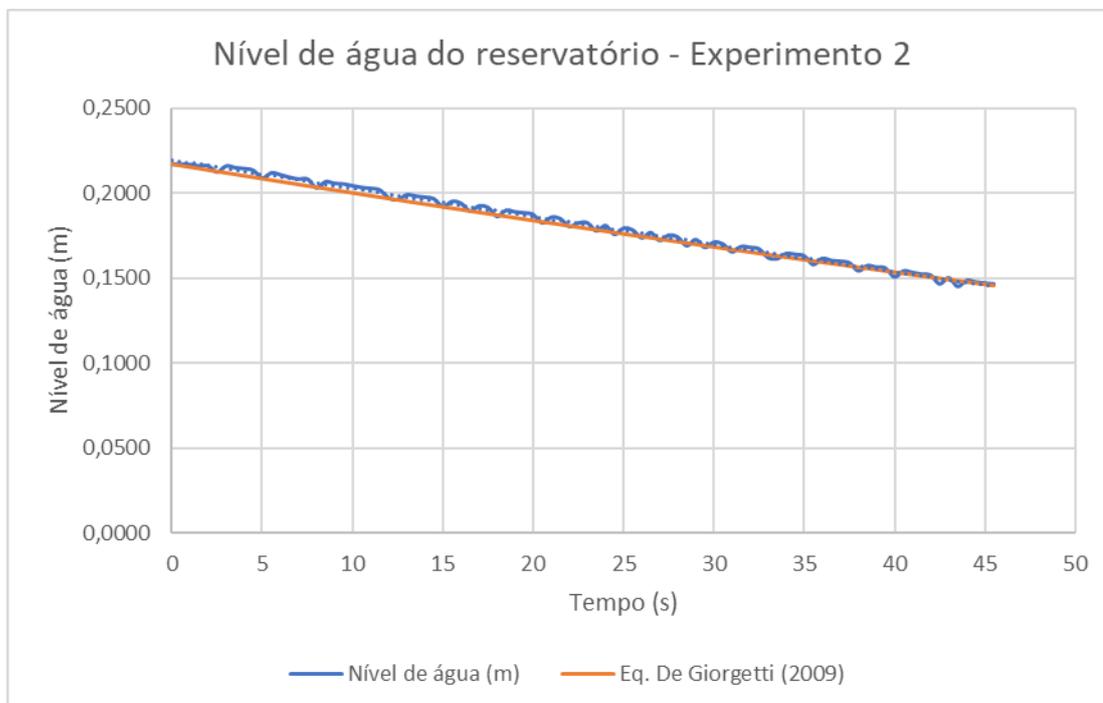
Após o tratamento de dados foi possível a construção de dois gráficos de nível de água. O primeiro para o modelo de esvaziamento do reservatório, cujo tempo total de esvaziamento foi de 45,5 segundos. O gráfico obtido está apresentado na Figura 56.

Figura 56 - Nível de água do Reservatório

Fonte: Autora, 2024

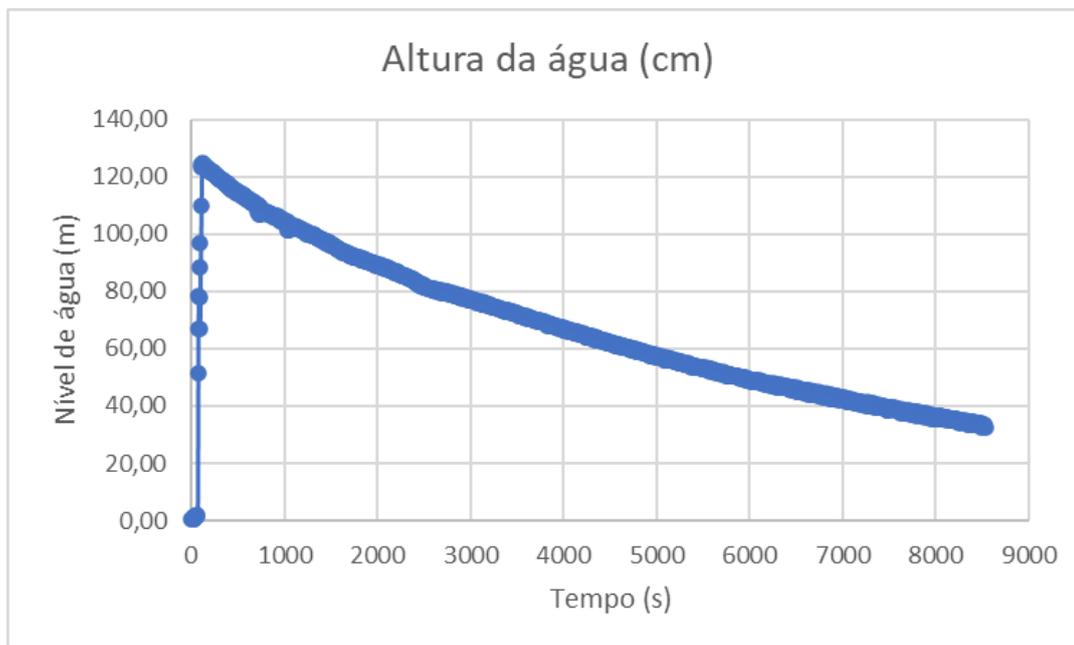
Para o gráfico apresentado na Figura 56, o valor que mais se aproxima para a constante de ajuste de descarga do gráfico obtido é 0,0037. Os gráficos comparativos são observados na Figura 57.

Figura 57 - Nível de água do reservatório - Experimento 2



Fonte: Autora, 2024

O segundo gráfico construído é a relação entre o nível de água e o tempo no interior do poço teste, sendo possível a determinação do comportamento de enchimento e de esvaziamento da estrutura. O tempo total de 8.470 segundos.

Figura 58 - Nível de água no poço teste

Fonte: Autora, 2024

Estes gráficos serão utilizados para a confirmação do modelo ao realizar-se a simulação do modelo reduzido.

6.3. MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Após o modelo completamente descrito, com suas respectivas relações e equações, é necessário a configuração da técnica de integração, do passo de tempo e do intervalo de tempo total da simulação.

Para a técnica de integração, foi escolhido o Runge-Kutta de 4ª ordem, por ser a técnica que mais se aproxima dos valores reais dentre as existentes no programa. O tempo de simulação escolhido foi entre 0 e 8.000 segundos.

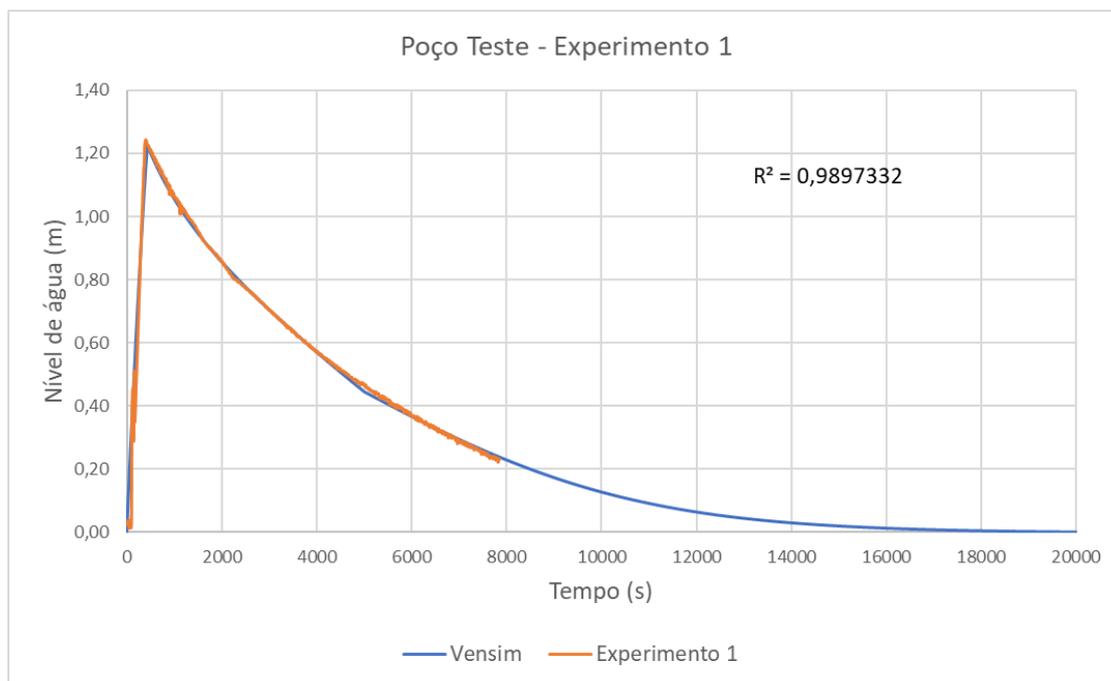
O passo de tempo utilizado para as simulações foi o menor passo de tempo disponível no software, de 0,0078125 segundos, a fim de diminuir o erro.

6.3.1. Verificação e Calibração do Modelo

A fim de verificar se o modelo define bem a descida do nível do reservatório e do poço de infiltração utilizou-se o modelo desenhado no Vensim para o poço de infiltração P-SC (Figura 47) com as modificações para os valores das variáveis do poço teste e do reservatório de 100 litros.

Os valores obtidos no Vensim foram comparados com os dados obtidos através dos experimentos em campo, realizados com o poço teste. O comparativo dos níveis de água é observado nas Figuras 59 e 60.

Figura 59 - Comparativo dos níveis de água para o experimento 1 no poço teste



Fonte: Autora, 2024

O experimento 1 obteve valores de R^2 igual a 0,9897 e NS igual a 0,98939, indicando um bom ajuste.

Pode-se observar na Figura 59 que o comportamento do gráfico do Vensim e do gráfico gerado pelo experimento 1 são semelhantes.

O resultado acima foi obtido utilizando-se o modelo descrito na Figura 47, com as alterações de diâmetro da estrutura, volume do reservatório de alimentação do sistema e também com a adaptação da vazão de infiltração.

A vazão de infiltração (25) obtida através dos testes do infiltrômetro precisou ser calibrada para melhor descrever o evento. A adaptação e calibração ocorreu devido a diferença entre a taxa de infiltração nos dias de experimento, ocorrida principalmente, ao que podemos observar pela umidade presente no solo, devido às chuvas.

Durante o experimento é notável uma nova mudança desta taxa de infiltração, representada por uma mudança de comportamento gráfico do nível de água da

estrutura próximo do tempo 5.000 segundos, requerendo uma nova adaptação e calibração da equação a partir deste tempo.

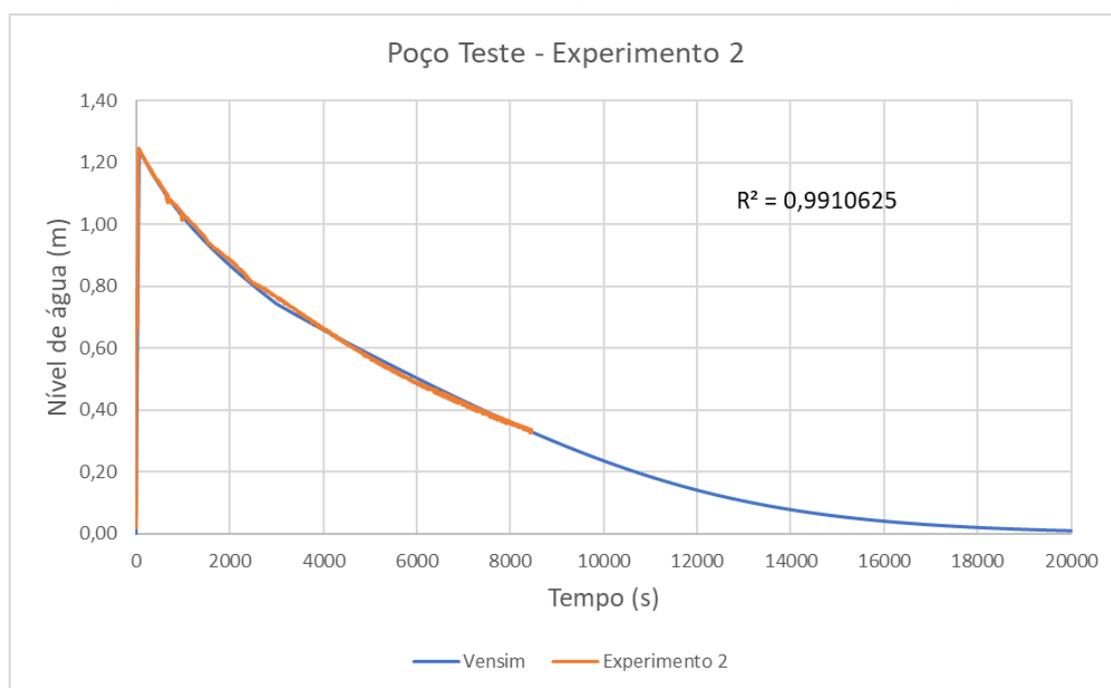
A primeira taxa de infiltração adotada entre os períodos de 0 a 5.000 segundos contava com uma redução de 55% em relação àquela obtida no primeiro experimento.

A segunda taxa de infiltração adotada, entre os períodos de 5.000 a 8.000 segundos, foi reduzida em 70%, em relação à obtida experimentalmente (Equação (25)).

A redução da taxa de infiltração durante o experimento é possível de ser explicada devido a saturação do solo ao longo do tempo em que a água infiltra sobre ele. Com isso reduzindo ainda mais a capacidade de infiltração que este apresenta.

Para o segundo experimento, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 60 para os níveis de água coletados em campo e obtidos durante a simulação no Vensim.

Figura 60 - Comparativo dos níveis de água para o experimento 2 no poço teste



Fonte: Autora, 2024

O experimento 2 obteve valores de R^2 igual a 0,9911 e NS igual a 0,9902, indicando um bom ajuste.

Semelhante ao descrito para o experimento 1, foi realizada a variação e calibração da equação de infiltração (25) para o caso apresentado.

Assim como no caso anterior, pode-se observar uma mudança na direção do gráfico, indicando uma mudança na taxa de infiltração dentro do mesmo experimento, em torno do tempo de 3.000 segundos.

Para a primeira parte do experimento, entre os tempos 0 e 3.000 segundos, a taxa de infiltração (Equação (25)) foi reduzida em 64%. Para o resto do experimento entre 3.000 e 8.000 segundos a taxa sofreu uma redução de 73%.

Observa-se uma redução maior de taxa de infiltração para o experimento 2, em relação ao experimento 1. Esta particularidade pode ser explicada devido aos experimentos terem sido realizados na mesma data, e na sequência, sendo o experimento 1 responsável por uma saturação do solo, ocasionando a realização do segundo experimento em condições de solo diferentes do primeiro.

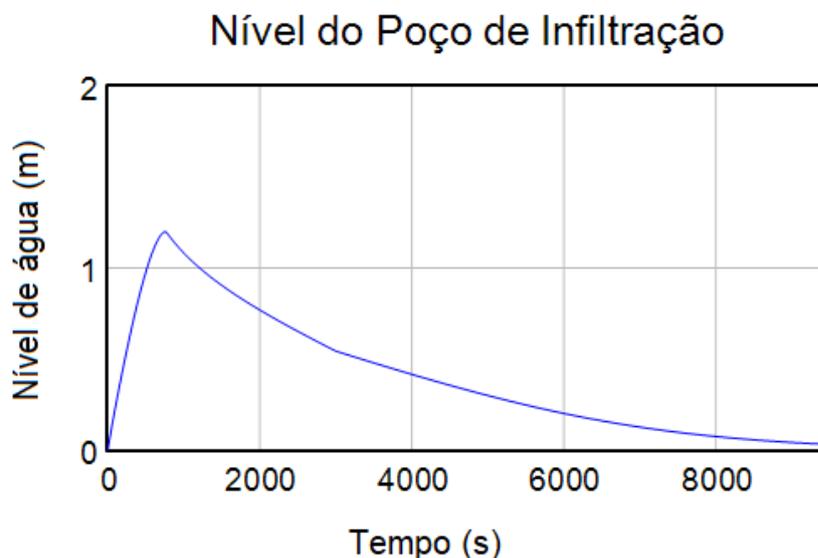
6.4. MODELO DO VENSIM PARA O POÇO DE INFILTRAÇÃO

Como apresentado, o poço de infiltração real foi modelado no Vensim e simulado segundo as variáveis de tempo, passo de tempo e método de integração apresentados.

Após a simulação, o modelo proporciona a possibilidade de geração de gráficos e tabelas para todas as variáveis presentes no sistema. Esses artifícios são gerados a partir de todos os pontos calculados durante a simulação.

A variável de maior importância, e que de fato demonstra a função do poço de infiltração, é, o nível de água do poço de infiltração. Nele é possível ser observado o comportamento da estrutura durante seu enchimento e esvaziamento, além de determinar sua segurança operacional, com a observação de seu nível de água máximo e da necessidade de utilização ou não da estrutura de ladrão existente.

O gráfico gerado pelo Vensim, para o poço P-SC, pode ser observado a seguir.

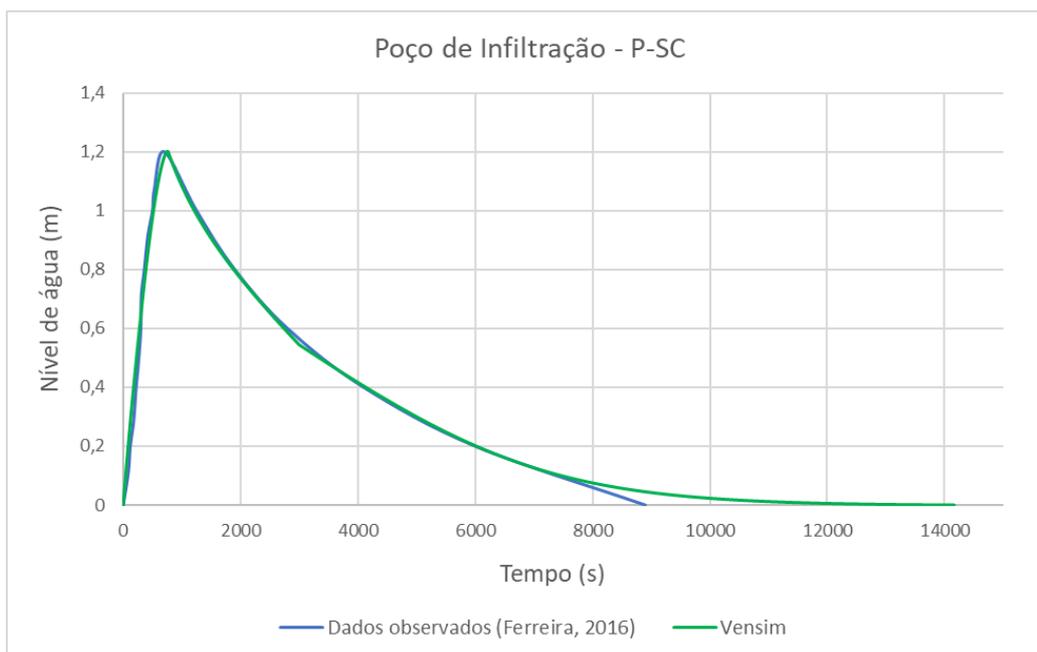
Figura 61 - Gráfico de nível do Vensim

Fonte: Autora, 2024

O comportamento gráfico do nível do reservatório é o considerado normal para tais estruturas. O gráfico indica uma grande entrada de água até que seja atingido um nível máximo, que também pode ser chamado de pico, que depois de atingido muda o comportamento gráfico para uma descida lenta, indicando a saída desta água pelas estruturas de infiltração. Essa descida é proporcional à taxa de infiltração, que por sua vez tem uma relação de dependência com o nível de água presente dentro do poço, como apresentado no caso da Equação (25).

Vale ressaltar que, o nível de água não atingiu a cota de 2,0 metros, sendo assim, toda a saída de água apresentada pelo gráfico foi realizada pela estrutura de infiltração, uma vez que a cota da estrutura de ladrão não foi atingida durante a simulação.

Com o objetivo de compreender se o gráfico gerado coincide com modelo real, foi utilizada as tabelas de dados geradas pelo Vensim e os dados coletados no modelo físico realizados por Ferreira (2016) no P-SC. Com os dados, foi construído um gráfico comparativo com as duas séries, e pode ser observado na Figura 62.

Figura 62 - Comparação de nível para o poço real

Fonte: Autora, 2024

O modelo gerado para o poço real, assim como os apresentados para o poço simulado, apresentou a necessidade de uma calibração para a determinação da vazão de infiltração, através da Equação (25).

Para o poço real, a taxa de infiltração sofreu uma mudança durante a infiltração do sistema. Até os 3.000 segundos, a taxa de infiltração foi adotada com uma redução de 20%, em relação à medida durante o experimento de infiltração realizado no poço teste. Após os 3.000 segundos até o fim da simulação, adotou-se uma redução desta taxa de infiltração em 50%.

O ensaio de infiltração realizado por Ferreira (2016), também apresentou mudanças na taxa de infiltração no decorrer do experimento. No caso apresentado pela autora há alteração desta taxa após 600 segundos de experimento, apresentando uma redução de 13 vezes na permeabilidade do solo (FERREIRA, 2016).

Assim como observado no caso dos experimentos realizados para o poço teste, o gráfico de nível obtido pela simulação computacional comporta-se de forma semelhante ao apresentado na realidade da estrutura.

Comparativamente, o poço de infiltração obteve um tempo de pico de aproximadamente 11 minutos para Ferreira (2016) e de 12 minutos e 38 segundos para o Vensim.

Os valores de pico de nível de água da estrutura são de aproximadamente 1,20 metros nas observações realizadas no poço real por Ferreira (2016) e de 1,2012 metros para as simulações geradas no Vensim.

7. CONCLUSÕES

O software Vensim é um modelo de dinâmica de sistemas que possibilita a modelagem de equações diferenciais, como a conservação de massa, de modo simples e com uma interface amigável ao usuário.

A visualização do modelo em forma de diagrama possibilita uma compreensão mais dinâmica do processo, e uma interpretação facilitada das dependências entre variáveis, como nível de água e vazão de saída, por exemplo, e estruturas presentes no modelo, como a entrada do poço e a saída do reservatório de alimentação.

O software garante uma facilidade de comparação de eventos simulados e de mudanças de variáveis durante o estudo do modelo. É possível alterar os valores utilizados na simulação para a compreensão de sua relação de comportamento com as variáveis críticas, por exemplo, aumento ou diminuição de diâmetro do poço para um mesmo evento de chuva, e sua relação com os níveis do reservatório. Alterações como essas são complexas de serem realizadas em modelos físicos (reais), pois, a alteração da construção da estrutura é cara e complexa, entretanto, após a construção e validação de um modelo numérico, comparativos como esses são simples de serem realizados.

Os ensaios de infiltração e, posteriormente, as simulações realizadas no Vensim, apontaram uma relação entre a velocidade de infiltração e a cota de água presente na estrutura estudada. Relação essa que indica um aumento da velocidade de infiltração e, conseqüentemente, da vazão de infiltração com o aumento do nível de água no interior da estrutura de infiltração.

A relação apontada pelos experimentos de infiltração foi obtida para as características de tipo e umidade do solo considerando o local e o dia em que o experimento foi realizado, sendo necessárias calibrações para a extrapolação e aplicação do modelo aqui desenvolvido para condições distintas das características experimentais originais. Entretanto, a base da equação se manteve a mesma, indicando assim uma proporcionalidade entre as características.

A possibilidade de adoção do mesmo modelo, para dois testes, com estruturas distintas, a partir das adequações de variáveis de dimensão, indicou a coerência do modelo diante da representação da estrutura física (real), e apontou a possibilidade de uso da forma apresentada para a descrição dos poços de infiltração.

8. SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A partir do trabalho realizado, pode-se expandir a pesquisa realizada, conforme algumas possibilidades:

- Novas análises da relação entre a vazão e velocidade de infiltração de um solo em relação ao nível de água.
- Aplicação do modelo de dinâmica de sistemas para outras estruturas compensatórias, como: trincheiras, telhados armazenadores, planos de infiltração, pavimentos permeáveis, entre outros.
- Melhoramento do modelo apresentado, para o poço de infiltração, com a inserção de variáveis condicionantes à infiltração, como a umidade do solo, por exemplo.
- Novas análises a partir do modelo gerado, com as devidas adaptações, com a utilização de eventos de chuva reais.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI L. A. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. Dissertação de Mestrado, (2005) UFRGS – IPH, 2005.
- AHMAD, S.; SIMONOVIC, S. P. System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. **Journal of computing in civil engineering**, v. 14, n. 3, p. 190-198, 2000.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Ciclo Hidrológico e Águas Subterrâneas**. Brasília, DF, 2014(a).
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS; BANCO MUNDIAL. **Manual de Segurança de Pequenas Barragens**. Brasília, DF, 2014(b).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 6416:2015**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 25 p.
- BAPTISTA, M.B.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2ªed, Porto Alegre: ABRH, 2015.
- BARBASSA, Ademir Paceli; ANGELINI SOBRINHA, Loide; MORUZZI, Rodrigo Braga. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 91-107, 2014.
- BARBROOK-JOHNSON, P.; PENN, A. S. **Systems Mapping: How to build and use causal models of systems**. Springer Nature, 2022.
- BOSONA, T. G.; GEBRESENBET, G. Modeling hydropower plant system to improve its reservoir operation. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 2, n. 4, p. 87-94, 2010.
- BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A., PRUSKI, F.F., SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 3ª ed., Viçosa: Ed. UFV, 2012.
- BRITO, D.S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 131p. 2006. Disponível

em: <http://ptarh.unb.br/dissertacoes/metodologia-para-selecao-de-alternativas-de-sistemas-de-drenagem/>

BUTLER, D.; DIGMAN, C.J.; MAKROPOULOS, C.; DAVIES, J.W. **Urban drainage**. 4ªed, Boca Raton: Crc Press, 2018.

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

CASTRO, L.M.A. **Proposição de indicadores para avaliação de sistemas de drenagem urbana**. 2002. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 118p. Disponível em: https://www.smarh.eng.ufmg.br/diss_defesas_detalhes.php?aluno=54

CHAPRA, S.C.; CANALE, R.P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5ªed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CHAPRA, S. C. **Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists**. McGRAW-HILL. Second Edition. 2006.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1ªed. São Paulo: Blucher, 257p. 1999.

CHOW, V.T.; MAIDMENT; D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. McGraw-Hill. 572p. 1988.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2ª impressão, p. 336, 2015.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas**. São Paulo. 116p. 2005.

ELSHORBAGY, A.; JUTLA, A.; KELLS, J. Simulation of the hydrological processes on reconstructed watersheds using system dynamics. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 3, p. 538-562, 2007.

FELICIO, L.C. **Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta**. 2ª ed. São Carlos: RiMa, p.568. 2010.

FERREIRA, T.S. **Avaliação do comportamento hidrológico de poços de infiltração de águas pluviais sob diferentes concepções**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 149p. 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/7951>.

FERREIRA, T. S.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B. Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, p. 437-446, 2018.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3ª ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2002.

FORRESTER, J. W., **Principles of Systems: Text and workbook**. 5ªed. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971

GIORGETTI, M.F., **Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia**. São Carlos: Suprema, 2008.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 10, 2005.

HOFFMAN, J. D. **Numerical methods for engineers and scientists**. New York: CRC press, 2001.

JIANG, H.; SIMONOVIC, S. P.; YU, Z.; WANG, W. A system dynamics simulation approach for environmentally friendly operation of a reservoir system. **Journal of Hydrology**, v. 587 p. 124971, 2020.

KHAN, S.; YUFENG, L.; AHMAD, A. Analysing complex behaviour of hydrological systems through a system dynamics approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, n. 12, p. 1363-1372, 2009.

LI, L.; SIMONOVIC, S. P. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 13, p. 2645-2666, 2002.

MARENGO, J. A. et al. Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0, and 4.0 C global warming scenarios: an analysis for Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 3, p. 610433, 2021.

MIGUEZ, M. G. Modelo matemático de células de escoamento para bacias urbanas. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Países de Linha Portuguesa**. ABRH: Aracajú/SE, 2001.

MOURA, T. A. M. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos**. 2005. 136p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MÜLLER-MERBACH, H. Model design based on the systems approach. **Journal of the Operational Research Society**, v. 34, n. 8, p. 739-751, 1983.

PEDROSA, D.P.F. **Resolução Numérica de Equações Diferenciais Ordinárias**. Rio Grande do Norte: Universidade federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, 2003. Disponível em: <https://www.dca.ufrn.br/~diogo/FTP/dca0304/edo.pdf> (RK-4)

PEIXOTO, V.C. **Análise Paramétrica e Dimensionamento de Poços de Infiltração para Fins de Drenagem Urbana**. 2011. 111p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

REIS, R. P. A.; OLIVEIRA, L. H. de; SALES, M. M. Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 99–117, 2008.

RIGHETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F.; SALES, T. d. **Manejo de águas pluviais urbanas**. [S.l.]: ABES, 2009. v. 4.

SÃO CARLOS. **Lei nº 15.958, de 29 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre o Código de Obras e Edificações do Município de São Carlos, e dá outras providências. São Carlos: Câmara Municipal, [2011]

SÃO CARLOS. Plano Municipal de Saneamento - São Carlos/SP. São Carlos, 2012.

SARDO, M. S.; JALALKAMALI, N. A system dynamic approach for reservoir impact assessment on groundwater aquifer considering climate change scenario. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 17, p. 100754, 2022.

SIMÕES, A.L.A.; PORTO, R.M.; SCHULZ, H.E. Código para o dimensionamento de bacias de retenção com o método numérico de Runge e Kutta de 4ª ordem. **XXI SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. ABRH: Brasília/DF. 2015.

SIMONOVIC, S. P.; FAHMY, H. A new modeling approach for water resources policy analysis. **Water resources research**, v. 35, n. 1, p. 295-304, 1999.

SOUZA, V. C. B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 151p. 2002.

STERMAN, J. D. System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. **California management review**, v. 43, n. 4, p. 8-25, 2001.

SUSNIK, J. VAMVAKERDOU, L. S., SAVIC, D. A., KAPELANZ, Z., Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. **Science of the total environment**, v. 440, p. 290-306, 2012.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 1993.

TUCCI, C.E.M. Aspectos Institucionais do controle das inundações urbanas. I **Seminário de recursos hídricos do Centro-Oeste**. Brasília. 1999

TUCCI, C.E.M. et al. Inundações urbanas. **Porto Alegre: ABRH/Rhama**, v. 11, 2007 (a).

TUCCI, C.E.M., MELLER, A., **Regulação das águas pluviais urbanas**. REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina. Porto Alegre: ABRH, v.4, 2007(b).

TUCCI, C.E.M. Águas Urbanas Urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

VALLE, Karine Nayara Faria. **Métodos numéricos de Euler e Runge-Kutta**. Monografia (Especialização em Matemática). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p.40. 2012.

VASCONCELOS, Anaí Floriano et al. Modeling infiltration wells in SWMM and comparing its performance with a real-scale well. In: **New Trends in Urban Drainage Modelling: UDM 2018 11**. Springer International Publishing, 2019. p. 424-428.

VENDRAME, I. F. Considerações sobre o emprego de poços de infiltração. *Águas Subterrâneas*, 1998.

VILLANUEVA, A. O. N.; TUCCI, C. E. M. Simulação de alternativas de controle para Planos Diretores de Drenagem Urbana. **Soluções Para A Drenagem Urbana Em Países Da América Latina, Seminário De Drenagem Urbana Do Mercosul-V Seminário Nacional De Drenagem Urbana, Porto Alegre**, 2001.

VILLELA, P. R. C. Introdução à dinâmica de sistemas. **Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora**, 2005.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis Visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

ZHANG, X. H., ZHANG, H. W., CHEN, B., CHEN, G. Q., ZHAO, X. H. Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 13, n. 10, p. 2328-2336, 2008.

ZHOU, J.; JIA, B.; CHEN, X.; QIN, H.; HE, Z.; LIU, G. Identifying efficient operating rules for hydropower reservoirs using system dynamics approach—a case study of three gorges reservoir, China. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2448, 2019.

ANEXO I

```
/*
 * HC-SR04 example sketch
 *
 * https://create.arduino.cc/projecthub/Isaac100/getting-started-with-the-hc-
sr04-ultrasonic-sensor-036380
 *
 * by Isaac100
 */

const int trigPin = 9;
const int echoPin = 10;

float duration, distance;

void setup() {
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);

  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
  distance = (duration*.0343)/2;
  Serial.print("Distance: ");
  Serial.println(distance);
  delay(500);
}
```