

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Bruna Minetto

**MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM SOLOS SUBTROPICAIS**

Santa Maria, RS  
2021

**Bruna Minetto**

**MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM SOLOS SUBTROPICAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito para obtenção do Grau **de Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli

Coorientadora; Prof<sup>ª</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Rutineia Tassi

Santa Maria, RS  
2021

Minetto, Bruna  
MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS  
PERMEÁVEIS EM SOLOS SUBTROPICAIS / Bruna Minetto.-  
2021.  
58 p.; 30 cm

Orientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli  
Coorientadora: Rutineia Tassi  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2021

1. Pavimentos Permeáveis 2. Modelagem Hidrológica 3.  
Monitoramento Hidrológico 4. Solos Subtropicais I.  
Gustavo Allasia Piccilli, Daniel II. Tassi, Rutineia  
III. Título.

Bruna Minetto

## MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM SOLOS SUBTROPICAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 03 de setembro de 2021:

  
Daniel Gustavo Alberto Piccoli, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Rúbia Tassi, Dr. (UFSM)  
(Coorientadora)

  
Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves, Dr. (UFAL)  
(Examinador)

  
Facundo J. Alonso, Dr. (UNC)  
(Examinador)

Santa Maria, RS  
2021

## RESUMO

# MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM SOLOS SUBTROPICAIS

AUTOR: Bruna Minetto

ORIENTADOR: Prof. Daniel Gustavo Allasia Piccili

COORIENTADORA: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rutineia Tassi

As técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (DBI) vêm sendo aplicadas por seus inúmeros benefícios na atenuação dos impactos da crescente urbanização. Dentre elas estão os pavimentos permeáveis que reduzem volumes e melhoram a qualidade das águas pluviais, permitindo que a água pluvial infiltre em sua estrutura, podendo ser facilmente integrado nas cidades urbanizadas. Para comprovar seus benefícios, essas estruturas usualmente são monitoradas por um longo período de tempo. Quando isso não é possível, técnicas de modelagem hidrológica são aplicadas com o objetivo de simular seu comportamento. Diante disso, ferramentas adequadas de modelagem e de fácil utilização são essenciais para fornecer subsídios para o projeto e construção de tais sistemas. Assim, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de um modelo simplificado e de baixa exigência de dados para simulação hidrológica de pavimentos permeáveis. Para isso, foram monitorados módulos experimentais e vagas de estacionamento com revestimento permeável instalados na região de Santa Maria (RS). O monitoramento foi realizado por meio da utilização de pluviógrafos e sensores de nível de baixo custo desenvolvidos para esta aplicação. A modelagem se deu pela aplicação do método de Puls modificado, assumindo que os pavimentos permeáveis funcionam de maneira similar a reservatórios, onde a saída de água se dá pelo processo de infiltração no solo. Os resultados das simulações se mostraram satisfatórios. Para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) foram encontrados valores que variariam entre 0.66 e 0.97 e para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) valores entre 0.72 e 0.98. Dessa maneira, o método de Puls se mostrou eficiente nas simulações hidrológicas em pavimentos permeáveis podendo ser uma alternativa viável, de simples utilização e sem a necessidade de grandes volumes de dados.

**Palavras-Chave:** Método de Puls, Pavimentos Permeáveis, Modelagem Hidrológica.

## ABSTRACT

# MONITORAMENTO E MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM SOLOS SUBTROPICAIS

AUTHOR: Bruna Minetto

ADVISOR: Prof. Daniel Gustavo Allasia Piccoli

CO-ADVISOR: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rutineia Tassi

Low Impact Development (LID) techniques have been applied for their numerous benefits in mitigating the impacts of increasing urbanization. Among them are the permeable pavements that reduce volumes and improve the quality of rainwater, allowing rainwater to seep into its structure and can be easily integrated into urbanized cities. To prove their benefits, these structures are usually monitored over a long period of time. When this is not possible, hydrological modeling techniques are applied in order to simulate its behavior. Provided that, adequate modeling and easy-to-use tools are essential to provide subsidies for the design and construction of such systems. Thus, the present work aims to develop and evaluate the performance of a simplified model with low data requirements for hydrological simulation of permeable pavements. For this, experimental modules and permeable coating parking spaces installed in the Santa Maria region (RS) were monitored. Monitoring was performed using low cost level rain gauges and sensors developed for this application. The modeling was done by applying the Puls method, assuming that permeable pavements work in a similar way to reservoirs, where the water outlet occurs through the process of infiltration into the soil. The results of the simulations proved to be satisfactory, for the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) values were found that would vary between 0.66 and 0.97 and for the coefficient of determination ( $R^2$ ) values between 0.72 and 0.98. In this way, the Puls method proved to be efficient in hydrological simulations on permeable pavements and can be a viable alternative, simple to use and without the need for large volumes of data.

**Keywords:** Puls Method, Permeable Pavements, Hydrological Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO 1

Figura 2.1 - Localização do experimento. ....	17
Figura 2.2 – Sistema de monitoramento dos pavimentos permeáveis.....	18
Figura 2.3 - Sistema de Monitoramento baseado em uma combinação de boia e sensores ultrassônicos. ....	20
Figura 2.4 - Infiltração Acumulada nos Pavimentos Permeáveis no evento do dia 09/01/2019: a) Intertravado Poroso e b) Concreto Poroso .....	25
Figura 2.5 - Comportamento Hidrológico dos Pavimentos Permeáveis no evento do dia 09/01/2019: a) Intertravado Poroso e b) Concreto Poroso. ....	26
Figura 2.6 - Infiltração Acumulada nos Pavimentos Permeáveis no evento do dia 18/11/2018: a) Intertravado Poroso e b) Concreto Poroso. ....	27

### ARTIGO 2

Figura 3.1 - Localização do experimento. ....	39
Figura 3.2 - Esquema ilustrativo do monitoramento dos pavimentos permeáveis: (a Esquema em planta (sem escala); (b Esquema da seção transversal (sem escala). ....	41
Figura 3.3 - Modelagem do Evento 08.10: a) CP1 e b) CP2.....	47
Figura 3.4 - Modelagem do Evento 08.10: a) IP1 e b) IP2.....	49

## **LISTA DE TABELAS**

### **ARTIGO 1**

Tabela 2.1 - Eventos de Precipitação Monitorados .....	22
--	----

### **ARTIGO 2**

Tabela 3.1 - Modelos Hidrológicos para aplicação em pavimentos permeáveis.....	36
--	----

Tabela 3.2 - Eventos utilizados para a modelagem dos pavimentos permeáveis.....	45
---	----

Tabela 3.3 - Resultados da Modelagem pelo Método de PULS para os CPs.....	46
---	----

Tabela 3.4 - Resultados da Modelagem pelo Método de PULS para os IPs. ....	48
--	----



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ARTIGO 1 - COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE DIFERENTES PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM CLIMA SUBTROPICAL.....</b>	<b>12</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	14
2.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Monitoramento.....</b>	<b>19</b>
2.2.1.1	<i>Coleta e análise de dados .....</i>	<i>20</i>
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
<b>2.3.1</b>	<b>Análise dos Coeficientes de Escoamento e Retenção dos Pavimentos.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Análise do Processo de Infiltração de Água no Solo.....</b>	<b>25</b>
2.4	CONCLUSÃO .....	29
2.5	REFERÊNCIAS.....	30
<b>3</b>	<b>ARTIGO 2 – MODELO SIMPLIFICADO PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS BASEADO NO MÉTODO DE PULS.....</b>	<b>34</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	36
3.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Local de Estudo .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PULS PARA SIMULAÇÃO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.3</b>	<b>CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....</b>	<b>43</b>
3.2.3.1	<i>Análise Estatística da Calibração e Validação .....</i>	<i>43</i>
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
<b>3.3.1</b>	<b>Calibração e Validação – Revestimento Concreto Poroso (CP) .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Calibração e Validação – Revestimento Intertravado Poroso (IP) .....</b>	<b>48</b>
3.4	CONCLUSÃO .....	51
3.5	REFERÊNCIAS.....	52
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 APRESENTAÇÃO

O Desenvolvimento de Baixo Impacto (DBI), tem como objetivo mitigar os efeitos negativos das superfícies impermeáveis decorrentes da crescente urbanização e preservar os processos hidrológicos de um determinado local, garantindo comportamentos hídricos semelhantes aos que ocorriam antes da urbanização, adotando técnicas de infiltração, armazenamento, filtração, evapotranspiração e retenção do escoamento na fonte (FLETCHER; ANDRIEU; HAMEL, 2013; KURUPPU; RAHMAN, 2019; ONO et al., 2019), trincheiras de infiltração (BAEK et al., 2015), biorretenção (CADORE, 2016; FLETCHER et al., 2015) e telhados verdes (HAKIMDAVAR et al., 2014; TASSI et al., 2014).

Dentre estas estruturas se destacam os pavimentos permeáveis devido à facilidade de integração nas cidades pois, são alternativa à utilização de superfícies impermeáveis tradicionais na pavimentação que causam acréscimo no escoamento superficial. Seu princípio é permitir a passagem total ou parcial da água da chuva através das camadas de sua estrutura facilitando a infiltração da água pluvial no solo em regiões urbanas (AHIABLAME; ENGEL, 2012; FASSMAN et al., 2010; SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007). Ainda, podem atuar no tratamento das águas pluviais armazenando o escoamento e controlando a poluição difusa (HOLMES; HART; KEVERN, 2016; HUANG et al., 2015; JATO-ESPINO et al., 2016).

Apesar de todos os benefícios dos pavimentos permeáveis, a adoção destes sistemas ainda é muito lenta, já que existem poucas diretrizes para seu dimensionamento que possam ser aplicados à todas as regiões do Brasil. Também faltam métodos de análise simplificados que por meio de sua aplicação possam influenciar as políticas de gestão de recursos hídricos nas cidades e difundir a aplicação dessa técnica.

As temáticas expostas acima serão discutidas ao longo desse estudo na forma de dois artigos. O primeiro artigo abordou o monitoramento hidrológico dos pavimentos permeáveis, desde a importância da aquisição de dados a sua utilização para possibilitar o estudo do desempenho hidrológico em solos subtropicais. Para isso, foram monitorados módulos experimentais de pavimentos permeáveis por meio de sensores automáticos que possibilitou a quantificação de suas eficiências na retenção e redução de escoamento superficial. Além disso, também possibilitou uma análise mais aprofundada de seu comportamento em solos subtropicais durante os eventos de precipitação.

No segundo artigo foi feita a aplicação do Método de Modificado de Puls para desenvolver um modelo hidrológico simplificado e de fácil aplicação. Foram utilizados os dados obtidos pelo monitoramento hidrológico para calibrar o modelo e para avaliar sua

eficácia. Com essa ferramenta, foi possível simular o desempenho hidrológico dos pavimentos permeáveis.

Após a apresentação dos artigos, foi exposta uma discussão geral sobre o que foi explanado, integrando cada temática e contemplando os resultados dos dois como um todo.

## **2 ARTIGO 1 - COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE DIFERENTES PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM CLIMA SUBTROPICAL**

### **RESUMO**

Os pavimentos permeáveis são técnicas de desenvolvimento de baixo impacto que reduzem os volumes e melhoraram a qualidade das águas pluviais, permitindo que a água pluvial infiltre em sua estrutura e finalmente no solo, podendo ser facilmente integrado nas cidades urbanizadas. No entanto, no Brasil, ainda não são utilizados em larga escala, entre outros motivos, por faltarem diretrizes de instalação e dimensionamento para os diversos tipos de solos brasileiros. Assim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho hidráulico de pavimentos permeáveis em argissolos subtropicais do Brasil. Foram construídos quatro módulos experimentais de pavimentos permeáveis de 1m<sup>2</sup> cada um, sendo dois em concreto poroso e dois de blocos intertravados de concreto poroso. A partir do monitoramento da precipitação e água infiltrada nos pavimentos permeáveis constatou-se que os pavimentos permeáveis foram capazes de reter significativamente o escoamento pluvial com eficiências médias de 89% e 97,6% para os pavimentos de intertravado e concreto poroso respectivamente num solo não recomendável para esse tipo de estruturas nos manuais existentes. A elevada eficiência foi atribuída ao efeito combinado da pedofauna e aos macroporos criados pela ação cimentante dos óxidos de ferro. Também foi observado que mesmo em pavimentos instalados lado-a-lado, o comportamento do solo de subleito não foi idêntico entre as estruturas em concordância com estudos similares em solos tropicais. Isso ressalta a necessidade de diretrizes específicas para os solos tropicais brasileiros, de forma que o dimensionamento dos pavimentos abranja sua diversidade e não apresentem falhas decorrentes das diferentes características destes.

Palavras chave: Drenagem urbana, Técnicas de baixo impacto, Pavimentos permeáveis.

## **ARTICLE 1 – HYDROLOGICAL BEHAVIOUR OF DIFFERENTS PERVIOUS PAVMENTS IN SUBTROPICAL CLIMATE**

### **ABSTRACT**

Pervious pavements are low-impact development techniques that reduce volumes and improve the quality of rainwater, allowing rainwater to seep into its structure and finally into the ground, and can be easily integrated into urbanized cities. However, in Brazil, they are still not used on a large scale, among other reasons, for lack of installation and dimensioning guidelines for the different types of Brazilian soils. Thus, the present work aims to evaluate the hydraulic performance of permeable pavements in subtropical clay soils in Brazil. Four experimental modules of permeable pavements of 1m<sup>2</sup> each were built, two in porous concrete and two in interlocking porous concrete blocks. From the monitoring of precipitation and water infiltrated in the permeable pavements, it was found that the permeable pavements were able to significantly retain the rain runoff with average efficiencies of 89% and 97.6% for the interlocking and porous concrete pavements respectively in a soil not recommended for this type of structures in existing manuals. The high efficiency was attributed to the combined effect of the soil fauna and the macropores created by the cementing action of iron oxides. It was also observed that even in pavements installed side-by-side, the behavior of the subgrade soil was not identical between the structures in agreement with similar studies in tropical soils. This highlights the need for specific guidelines for Brazilian tropical soils so that the design of the pavements encompasses their diversity and does not present flaws resulting from their different characteristics.

**Keywords:** Urban drainage, Low impact techniques, Pervious pavements.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Uma das estruturas que pode ser utilizada para atingir os objetivos do Desenvolvimento de Baixo Impacto é o pavimento permeável que consiste em uma estrutura com superfície permeável projetada para a infiltração da chuva e percolação das águas pluviais através de suas camadas (BALBO, 2020; SHAFFER et al., 2009; YANG e JIANG, 2003). Isso permite que a água da precipitação incidente infiltre no solo reduzindo o volume, velocidade e descarga de poluentes decorrentes do escoamento superficial, além de promover o aumento da recarga de aquíferos subterrâneos (AHIABLAME; ENGEL, 2012; FASSMAN *et al.*, 2010; SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007).

Diversos estudos demonstram o potencial dos pavimentos permeáveis no controle e detenção de escoamento pluvial, como os de Drake (2013), Gilbert e Clausen (2016) e Jayasuriya e Kadurupokune (2010) que verificaram que o volume escoado superficialmente em pavimentos permeáveis era em média de 40 a 60% menor quando comparados com pavimentos de asfalto ou concreto tradicional. Inclusive, autores como Roseen et al. (2012), Fassman e Blackburn (2010) e Dreelin et al. 2006 constataram que esse valor pode ser inferior a 10% para volumes de chuva menores que 20 mm. Valores similares foram reportados no Brasil por Ono (2017), Pinto (2011), Acioli (2005) e Araújo et al. (2002) a partir de dados experimentais com volumes escoados menores que 5% ou seja, retenções do escoamento de mais de 95%.

A colmatagem da superfície do pavimento permeável é uma das principais causas de falha da estrutura no manejo de águas pluviais (KUMAR et al., 2016; SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007; YONG et al., 2008). Para isso, existem recomendações para a frequência da limpeza do pavimento, que variam entre uma e quatro limpezas anuais, dependendo da agressividade dos intemperes e do volume de tráfego (KIA et al., 2017; MARCHIONI E SILVA, 2010; RAZZAGHMANESH & BEECHAM, 2018). Quando o pavimento permeável recebe manutenção adequada, a infiltração da água pluvial através de suas camadas, de forma geral, não será um fator limitante e dependerá apenas dos processos de infiltração de água no solo (FASSMAN, 2010; KAYHANIAN et al., 2015; WEISS, 2017). Vários fatores condicionam esses processos de infiltração de água no solo, como porosidade, densidade, cobertura e textura do solo, encrostamento superficial, umidade inicial, matéria orgânica, estrutura e variabilidade espacial do terreno (POTT e DE MARIA, 2003).

No Brasil há uma grande diversidade de tipos de solo, resultante da interação dos diferentes relevos, climas, material de origem, vegetação e organismos associados. Segundo Coelho et al. (2002) e FAO (2004), de uma forma geral, no Norte do país os solos são profundos,

altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade natural. No Nordeste, uma grande proporção dos solos é rasa devido ao baixo grau de intemperismo. Já, o Planalto Central Brasileiro, na região centro-oeste, é uma planície formada por processos erosivos naturais e existem extensas áreas de solos profundos e bem drenados. A região sudeste é caracterizada por planaltos e áreas de altitude, com diversos picos superiores a 2.000 metros e solos predominantemente profundos. Por último a região sul, os solos são originários de rochas básicas e existem vários solos sedimentares, possuindo, em relação às outras regiões do Brasil, solos mais férteis, sendo predominantemente dos tipos Latossolos, Neossolos, Argissolos e Nitossolos.

Além da característica geral dos solos, outras características particulares devem ser consideradas para a caracterização do comportamento hidráulico de solos brasileiros como a existência de camada restritiva à passagem de água, localização do lençol freático, atividade da argila do horizonte subsuperficial que afeta o potencial de contração-expansão, o papel da biodiversidade, propriedades ácricas e o efeito dos óxidos de ferro (BRADY e WEIL, 2000; HARA e OLIVEIRA, 2005; SARTORI e GENOVEZ, 2011).

As propriedades ácricas são uma característica de solos altamente intemperizados com considerável teor de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita, goetita), óxidos de alumínio (gibbsita) e caulinita. Devido à composição mineralógica são solos de atividade coloidal muito baixa e apresentam em geral elevada porosidade e boa condutividade hidráulica, mesmo aqueles muito argilosos [ $> 60\%$  de argila] (HARA e OLIVEIRA, 2005). Os próprios óxidos de ferro, com sua ação cimentante, produzem pequenos agregados bastante estáveis os quais são às vezes chamados de “pseudo-areias” em certos solos de regiões úmidas e quentes (BRADY e WEIL, 2010).

Os solos ricos em óxidos de ferro no Brasil possuem, em geral, boa porosidade, alta condutividade hidráulica e baixa densidade aparente (ARGENTON et al. 2005; GHIDIN et al., 2006; GUEVARA, 2007; MARQUES et al. 2002; TOGNON, 1991). Não menos importante, em solos tropicais e, particularmente no Brasil com sua grande biodiversidade, devem ser analisados os caminhos preferenciais de escoamento criados pelas raízes apodrecidas, em diversas direções no interior do solo além da pedofauna existente, principalmente com atuação das formigas, cupins e minhocas (BASILE et al.; SANTOS, 2001; SHIPITALO et al., 2000; SILVA 2016).

Vários estudos de estruturas desenvolvimento de baixo impacto de infiltração (Ex, ACIOLI, 2005; CADORE, 2016; GUEDES, 2015; MOURA 2005; SOUZA, 2002), observaram diferenças na taxa de infiltração no interior do solo causada por essa variabilidade e notaram

impactos no funcionamento mencionando a hipótese de escoamento preferencial em macroporos. Dessa forma, mesmo com a utilização crescente deste tipo de sistema, restam ainda lacunas relativas ao seu desempenho em diferentes solos entre outros fatores (MOURA, BERNAUD e BATISTA, 2009) agravado pela escassez de dados observados e disponíveis sobre características hidráulicas dos solos uma vez que as medições consomem muito tempo e são custosas. (COELHO et al., 2002; SARTORI e GENOVEZ 2011; ZONTA, 2012).

Isso ressalta a necessidade de mais estudos no Brasil, de forma a disseminar a construção de manuais similares aos que existem em países desenvolvidos, como o de CIRIA (2015), County et al., (1999), Haubner (2001), que permitam o dimensionamento desse tipo de estruturas nos diferentes solos e climas do Brasil. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho hidráulico de pavimentos permeáveis em argissolos do Brasil subtropical. Foram construídos quatro módulos experimentais de pavimentos permeáveis de 1m<sup>2</sup>cada um, sendo dois em concreto poroso e dois de blocos intertravados de concreto poroso.



## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram coletados em uma área experimental de pavimentos permeáveis localizada no interior da cidade de Itaara (Figura 2.1) na transição entre os biomas Pampa e Mata Atlântica na região central do Rio Grande do Sul. O experimento se localiza numa área plana dentro de um relevo geral ondulado escolhida para garantir as mesmas características entre os pavimentos pareados.

De acordo com a classificação clássica de Köppen (WMO, 2018), encontra-se em clima subtropical úmido (Cfa), com temperatura média de 19,3 °C. No entanto, durante os verões quentes e úmidos, as máximas frequentemente ultrapassam os 30 °C, com as mínimas médias caindo para 19 °C. No inverno, as máximas chegam a 19 °C e as mínimas geralmente vão abaixo de 9 °C, até -5 °C, mas a neve é uma ocorrência rara (LÖBLER et al., 2015). A precipitação média anual é de 1.688 mm, bem distribuída ao longo do ano, embora os eventos de chuva convectiva (maior intensidade) sejam mais comuns na primavera e verão, e os eventos de chuva frontal predominem no inverno (INMET, 2019).

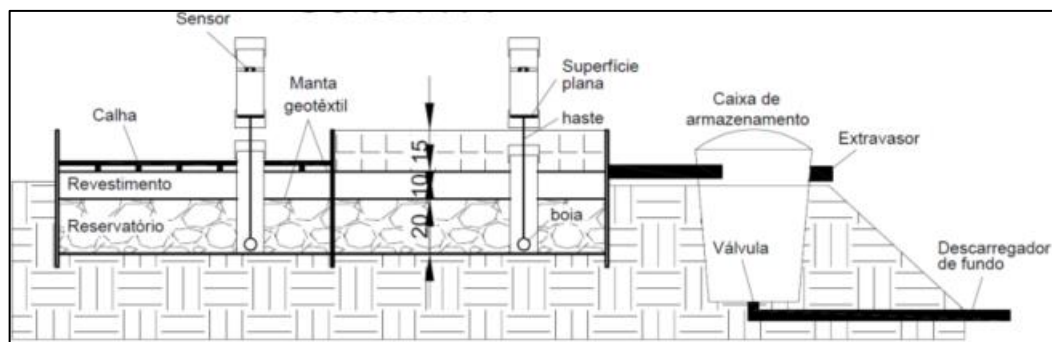
Figura 2.1 - Localização do experimento.



Fonte: Autor (2021).

O experimento ao todo contou com 6 módulos de pavimentos permeáveis (Figura 2.1), cada um com 1 m<sup>2</sup> de dimensão, sendo dois módulos com revestimento de intertravado poroso (IP), dois módulos de intertravado de concreto convencional (IC) e dois módulos de laje de concreto poroso moldada no local (CP). Neste trabalho não foram avaliados os pavimentos IC devido a diversos problemas na aquisição dos dados. Todos os módulos foram construídos com declividade de 2% e dispostos em pares com caimento para as duas laterais opostas onde foi instalada uma calha para coletar a parcela de água que não infiltrou nos pavimentos (Figura 2.2). O escoamento superficial de cada pavimento foi coletado em uma caixa de armazenamento específica. Sob o revestimento foram instalados reservatório de brita, responsáveis por armazenar as águas temporariamente até sua infiltração completa no solo.

Figura 2.2 – Sistema de monitoramento dos pavimentos permeáveis.



Fonte: Adaptado de Lamberti (2019).

Foi realizado apenas o dimensionamento hidrológico visto que os pavimentos não receberam tráfego de veículos. Empregou-se o método da curva envelope (ABNT, 2015; CIRIA, 2015), com tempo de retorno (TR) e duração da chuva (t) de 10 anos e 60 minutos, respectivamente, valores mínimos determinados por norma. Obteve-se uma espessura de 15,32 cm para o reservatório de brita, porém, por questões de segurança optou-se por executar uma camada de 20 cm de brita para o reservatório.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-amarelo (PVA) distrófico. Os PVA são solos que apresentam horizonte de acumulação de argila, B textural (Bt), com cores vermelho-amareladas devido à presença da mistura dos óxidos de ferro hematita e goethita. São solos profundos e muito profundos; bem estruturados e bem drenados; com sequência de horizontes A, Bt; A, BA, Bt; A, E, Bt etc. Há predominância do horizonte superficial A do tipo moderado e proeminente, apresentam principalmente a textura média/argilosa, no entanto, em função dos

óxidos de ferro que com sua ação cimentante produzem pequenos agregados bastante estáveis podem ser considerados em alguns casos como “pseudo-areias” pela sua boa porosidade e condutividade hidráulica saturada (BRADY e WEIL, 2010; SARTORI e GENOVEZ 2011). No entanto, o simples trânsito de uma pá carregadeira pode compactar o solo quase eliminando essa boa infiltração (VOGELMANN et al., 2012).

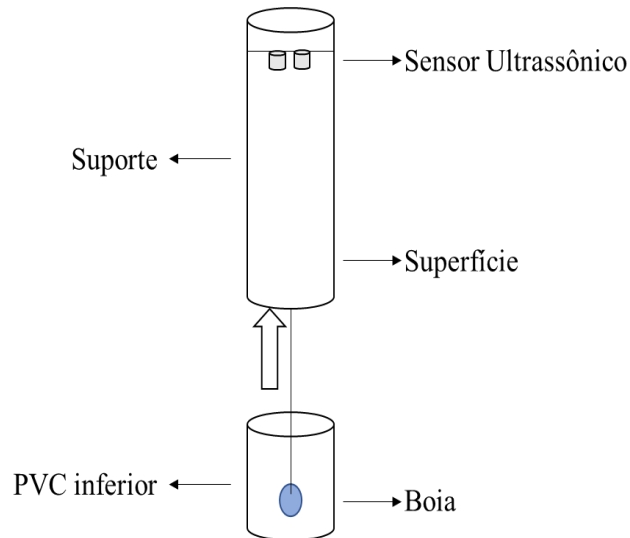
Antes da implantação do experimento foi realizado o ensaio com anéis concêntricos conforme ABNT NBR 14545 (2000) para determinar a capacidade de infiltração do solo. O ensaio foi realizado em 3 pontos cravando os anéis diretamente no solo, sem vegetação e levemente regularizado. Através do ajuste da equação de Horton, obteve-se a taxa de infiltração média do solo saturado de 8,75 mm/h, com saturação em 15 minutos. Esse valor se encontra fora do recomendado para esse tipo de pavimentos pelo guia francês (GRAND LYON, 2007) por ter taxas inferiores a  $10^{-5}$  m/s ou dentro dos valores que requerem obrigatoriamente um dreno para escoamento (CIRIA, 2015). Seguindo as recomendações de WoodsBallard et al. (2015), para a etapa de dimensionamento foi aplicado um coeficiente de segurança de 1,5 sobre a taxa de infiltração, que resultou em um valor de 5,83 mm/h.

### **2.2.1 Monitoramento**

O monitoramento dos dados foi realizado por três equipamentos, instalados um em cada tipo de pavimentos (IP, IC e CP), baseados em Minetto et al (2021), cada um com 2 sensores ultrassônicos (HC-SR04) acoplados a um sistema de boia, 1 sensor de temperatura e umidade relativa do ar (DHT11) e 1 coletor de dados do tipo ECOLOGGER (MINETTO et al 2021). Adicionalmente, foi acoplado um pluviógrafo a um dos protótipos. Os sensores foram confeccionados e validados por Minetto (2018) e o intervalo de medição foi de 20 segundos.

Em função dos requerimentos de umidade e superfície livre dos sensores ultrassônicos, foi confeccionado um suporte com uma boia (Figura 2.3). Mudanças no nível de água movimentam a boia, que pela sua vez é monitorada pelos sensores.

Figura 2.3 - Sistema de Monitoramento baseado em uma combinação de boia e sensores ultrassônicos.



Fonte: Autor (2021).

#### 2.2.1.1 Coleta e análise de dados

Os dados foram coletados semanalmente para verificar e garantir o funcionamento do sistema de monitoramento. O período total de coleta de dados compreendeu de 28 de agosto de 2018 à 06 de abril de 2019. Os dados foram separados em séries de eventos de precipitação independentes considerando um período entre eventos de 12 horas que, segundo as recomendações de Bracken et al. (2008) e Dunkerley (2008), é suficiente para reduzir os efeitos da umidade antecedente do solo. Ao todo, foram efetivamente monitorados 33 eventos chuvosos.

Os eventos também foram caracterizados com relação a umidade antecedente do solo (UAS) pela precipitação acumulada dos 5 dias anteriores ao evento, conforme o método CN do NRCS (SCS, 1971). Para uma precipitação acumulada  $\leq 13$  mm o solo classifica-se como UAS I; entre 13 mm e 28 mm o como UAS II; e acima de 28 mm como UAS III. A eficiência dos pavimentos foi avaliada através do coeficiente de escoamento (Equação 1) e o percentual de retenção de volume precipitado (equação 2) para cada pavimento permeável.

$$\text{Coeficiente de escoamento} = \frac{\text{Volume escoado}}{\text{Precipitação}} \quad (1)$$

$$\% \text{ Retenção de Volume} = \left( \frac{\text{Precipitação} - \text{Volume escoado}}{\text{Precipitação}} \right) * 100 \quad (2)$$

Foi analisado o processo de infiltração com os dados do monitoramento hidrológico para que sejam detectadas possíveis influências da anisotropia do solo no desempenho hidrológico dos pavimentos permeáveis. Para isso, foi traçado gráfico da infiltração, juntamente com a precipitação acumulada em função do tempo. A infiltração foi calculada através do balanço hídrico, sendo a diferença entre a precipitação acumulada e a variação de nível dentro do pavimento, em cada intervalo de tempo.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 Análise dos Coeficientes de Escoamento e Retenção dos Pavimentos

Nos 33 eventos monitorados (Tabela 2.1) a precipitação acumulada no período foi de 1050,4 mm. Após a verificação dos resultados, os dados obtidos nos pavimentos intertravados convencionais foram descartados, focando, portanto, somente na análise dos IPs e CPs.

Mesmo em pavimentos instalados lado a lado, observou-se diferenças significativas no comportamento dos pavimentos IPs. Os coeficientes de escoamento do IP1 variaram de 0 a 0,4 e do IP2 de 0 a 0,23, ou seja, o IP2 apresentou um coeficiente de escoamento muito menor para o período monitorado o que resulta em uma maior capacidade de retenção de escoamento superficial. Isso é comprovado ao se observar o percentual de retenção média de escoamento, no qual o IP1 apresentou 89% de retenção, enquanto o IP2 97,9%.

Tabela 2.1 - Eventos de Precipitação Monitorados

	Evento	P (mm)	td (h)	UAS	Volume Escoado (l)				% Volume Retido				Coeficiente de Escoamento			
					IP1	IP2	CP1	CP2	IP1	IP2	CP1	CP2	IP1	IP2	CP1	CP2
1	24/08/2018	32.2	16.1	I	7.83	0.59	0.00	1.64	75.7	98.2	100.0	94.9	0.24	0.02	0.00	0.05
2	31/08/2018	45.4	47.9	I	18.28	10.32	2.89	2.55	59.7	77.3	93.6	94.4	0.40	0.23	0.06	0.06
3	02/09/2018	13.8	25.0	III	1.34	0.00	0.31	0.57	90.3	100.0	97.8	95.9	0.10	0.00	0.02	0.04
4	04/09/2018	20.0	sd	II	3.06	0.00	0.42	0.87	84.7	100.0	97.9	95.7	0.15	0.00	0.02	0.04
5	15/09/2018	25.0	sd	I	3.25	0.00	0.00	0.46	87.0	100.0	100.0	98.2	0.13	0.00	0.00	0.02
6	16/09/2018	8.0	sd	II	0.38	0.00	0.00	0.00	95.3	100.0	100.0	100.0	0.05	0.00	0.00	0.00
7	18/09/2018	14.0	19.3	I	0.97	0.00	0.00	0.05	93.0	100.0	100.0	99.7	0.07	0.00	0.00	0.00
8	23/09/2018	39.0	10.9	II	8.52	1.88	0.19	0.46	78.2	95.2	99.5	98.8	0.22	0.05	0.00	0.01
9	24/09/2018	52.0	sd	III	13.31	4.92	17.53	0.51	74.4	90.5	66.3	99.0	0.26	0.09	0.34	0.01
10	25/09/2018	12.0	13.9	III	1.88	0.65	0.37	0.28	84.3	94.6	96.9	97.7	0.16	0.05	0.03	0.02
11	30/09/2018	38.0	18.5	I	5.43	0.70	0.78	0.81	85.7	98.1	98.0	97.9	0.14	0.02	0.02	0.02
12	02/10/2018	55.0	31.4	III	17.49	4.73	7.72	1.52	68.2	91.4	86.0	97.2	0.32	0.09	0.14	0.03
13	09/10/2018	3.0	4.3	I	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
14	13/10/2018	24.0	11.8	I	0.00	0.00	0.00	0.05	100.0	100.0	100.0	99.8	0.00	0.00	0.00	0.00
15	28/10/2018	6.0	sd	I	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
16	01/11/2018	23.0	sd	I	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
17	03/11/2018	17.0	4.2	II	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
18	15/11/2018	31.0	15.5	I	0.20	0.00	0.00	0.11	99.4	100.0	100.0	99.7	0.01	0.00	0.00	0.00
19	18/11/2018	35.0	13.3	III	2.31	0.05	0.00	0.00	94.7	99.9	100.0	100.0	0.05	0.00	0.00	0.00

20	24/11/2018	114.0	57.0	I	17.73	sd	0.54	sd	84.5	sd	99.5	sd	0.16	sd	0.00	sd
21	02/12/2018	10.0	sd	I	0.44	0.00	0.00	0.00	95.6	100.0	100.0	100.0	0.04	0.00	0.00	0.00
22	15/12/2018	5.0	12.1	I	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
23	19/12/2018	44.0	56.0	I	4.71	0.00	0.00	0.40	89.3	100.0	100.0	99.1	0.11	0.00	0.00	0.01
24	20/12/2018	115.0	12.7	III	17.49	7.50	14.13	2.73	84.8	93.5	87.7	97.6	0.15	0.07	0.12	0.02
25	21/12/2018	24.0	sd	III	0.00	0.00	0.00	0.22	100.0	100.0	100.0	99.1	0.00	0.00	0.00	0.01
26	29/12/2018	24.0	0.7	I	4.52	0.32	0.02	0.05	81.2	98.7	99.9	99.8	0.19	0.01	0.00	0.00
27	03/01/2019	15.0	8.9	II	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
28	09/01/2019	56.6	23.4	I	14.80	4.18	0.78	2.36	83.9	95.5	99.2	97.4	0.16	0.05	0.01	0.03
29	13/01/2019	5.0	sd	III	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	100.0	100.0	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
30	15/01/2019	26.0	sd	I	7.97	0.43	0.00	0.28	69.3	98.3	100.0	98.9	0.31	0.02	0.00	0.01
31	18/01/2019	37.0	7.5	II	sd	0.00	0.42	0.69	sd	100.0	98.9	98.1	sd	0.00	0.01	0.02
32	20/01/2019	17.0	sd	III	0.62	0.00	0.00	0.40	96.4	100.0	100.0	97.7	0.04	0.00	0.00	0.02
33	02/02/2019	20.0	sd	I	3.44	0.00	0.07	0.28	82.8	100.0	99.6	98.6	0.17	0.00	0.00	0.01
<b>Total</b>		<b>1050.4</b>			<b>155.97</b>	<b>36.31</b>	<b>46.17</b>	<b>17.26</b>								
<b>Média</b>					<b>4.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>0.5</b>	<b>89.0</b>	<b>97.9</b>	<b>97.6</b>	<b>98.6</b>	<b>0.11</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>

P: Volume total precipitado, em milímetros; td: tempo de duração do evento de precipitação em horas; IP: pavimento permeável de intertravado poroso 1 e 2; CP: pavimento permeável de concreto poroso 1 e 2; sd: sem dados.

Fonte: Autor (2021).

Já para o caso dos CPs, apresentaram um desempenho hidrológico semelhante, possuindo coeficientes de escoamento e percentuais de retenção de escoamento parecidos para a maioria dos eventos de precipitação. A variação para o CP1 foi de 0 a 0,34 e para o CP2 foi de 0 a 0,06. Porém, no evento do dia 24/09 observou-se uma discrepância no valor obtido para o coeficiente de escoamento do pavimento CP1. Caso este fosse descartado, em média, teria se obtido 0,01 para o CP1 e 0,02 para o CP2, valores estes bem próximos indicando um comportamento similar entre eles. As eficiências de retenção dos dois módulos foram similares, indicando uma ótima capacidade de redução de escoamento superficial. Na maioria dos eventos obteve-se valores acima de 93% de retenção de escoamento.

Outros autores também observaram esse mesmo desempenho na redução de escoamento. Trabalhos como os de Roseen et al. (2012), Bean et al. (2008), Kwiatkowski (2007) Brattebo e Booth (2003) e de Hunt et al. (2002). Porém essas eficiências foram relatadas em solos arenosos ou em siltes arenosos, onde o solo possui uma alta capacidade de infiltração.

Em contrapartida para solos similares, argilosos, um estudo realizado por Dreelin et al. (2006) demonstrou que os pavimentos permeáveis sob solos argilosos podem infiltrar quantidades substanciais de escoamento durante pequenos eventos de chuva. Para nove eventos de chuva, com precipitação variando de 2 a 20 mm, 93% da chuva total foi infiltrada. No entanto os autores sugerem que em solos argilosos os pavimentos permeáveis sejam utilizados para o controle de pequenos eventos de chuva e que para eventos de maiores volumes de precipitação sejam utilizados para apenas para retenção do "first-flush" em combinação com outras técnicas de controle de escoamento na fonte. Recomendação similar de Rushton (2001), que em eventos chuvosos com volumes maiores que 50 mm constatou uma perda significativa na eficiência de retenção dos pavimentos permeáveis chegando a apenas 30%. Mesmo assim, estudos como o de Fassman e Blackburn (2010) que compararam a efetividade da aplicação de pavimentos permeáveis também em solos argilosos para retomada das condições de pré-desenvolvimento de sua cidade, ressaltaram que o desempenho hidrológico do pavimento permeável foi excepcional, sendo que em mais de 80% dos eventos de chuva o hidrograma de saída dos pavimentos foi compatível com as condições de pré-desenvolvimento.

Outro fator que mede a intensidade da chuva, é o tempo de duração dos eventos de precipitação, comparando os eventos dos dias 13/10/2018 e 29/12/2018, que tiveram o mesmo volume precipitado, pode ser visto uma menor eficiência dos pavimentos quando o tempo de duração do evento é menor, ou seja, precipitações mais intensas. Principalmente para o IP1, no evento com maior tempo de duração (13/10), o pavimento foi capaz de reter todo escoamento, mas quando o tempo foi menor sua capacidade caiu para 81,2%. O mesmo ocorreu para os



outros pavimentos, porém as perdas nas eficiências foram menores. Esse comportamento é corroborado por estudos como os de Winston et al. (2018) e Lin et al. (2014) que também observaram que para eventos de chuva mais intensos houve perdas na eficiência dos pavimentos permeáveis de 20-30% podendo em alguns casos chegar até 50%.

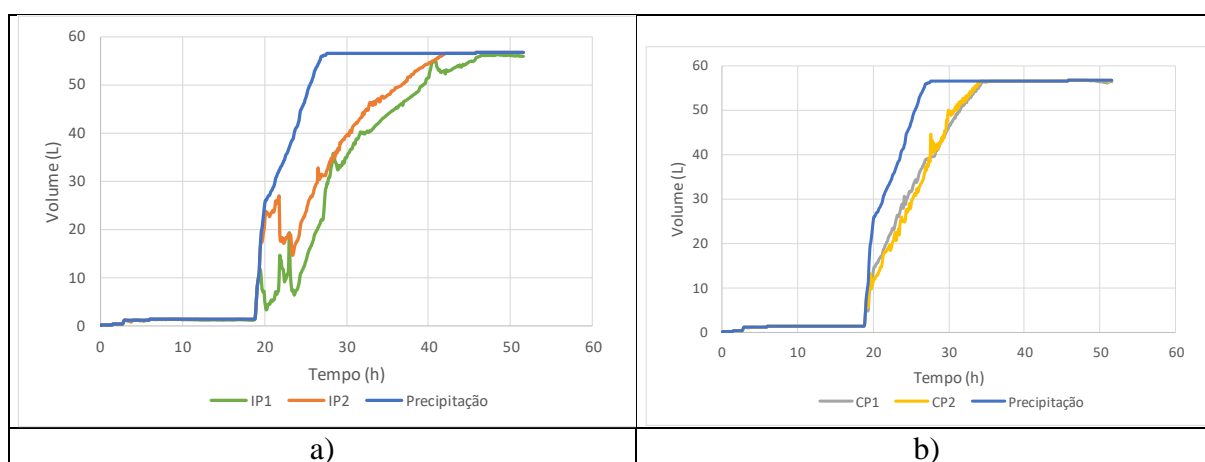
Com relação a condição de umidade antecedente do solo (UAS) era esperado uma perda na capacidade de retenção do volume precipitado quando o solo estava em condições UAS III. Porém, em apenas um evento chuvoso do dia 24/09/2018 é possível observar uma diminuição na retenção de precipitação.

Nos itens a seguir será analisado o processo de infiltração na camada de subleito dos pavimentos permeáveis.

### 2.3.2 Análise do Processo de Infiltração de Água no Solo

A análise da infiltração procura entender as causas do comportamento distinto observado nos módulos IPs construídos lado a lado. Para descrever o comportamento com mais detalhe, foi escolhido o evento do dia 09/01/2019 que teve uma precipitação de 56,6 mm quando o solo estava em condições de UAS I, ou seja, seco (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Infiltração nos Pavimentos Permeáveis no evento do dia 09/01/2019: a) Intertravado Poroso e b) Concreto Poroso



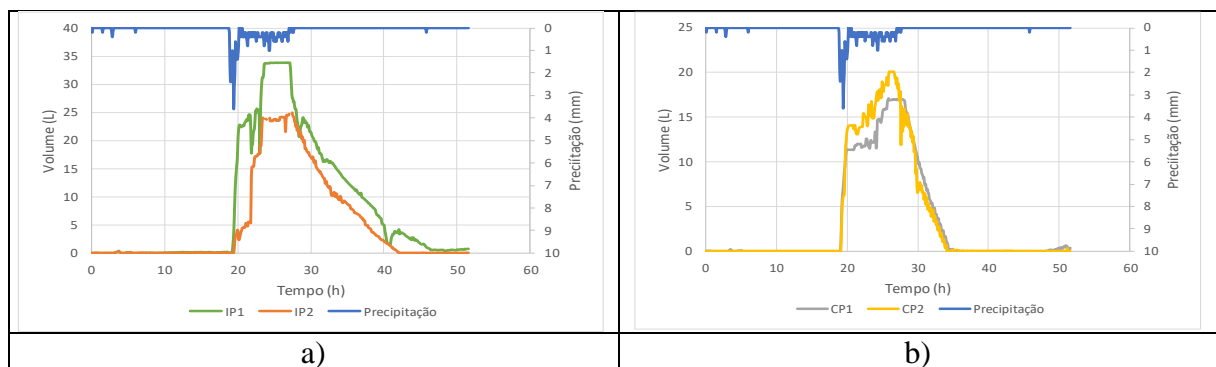
Fonte: Autor (2021).

A infiltração ilustra que o pavimento permeável IP1 tem uma taxa de infiltração no solo menor que o do IP2, especialmente no início do evento de precipitação, quando a taxa de infiltração do IP2 chega a ser aproximadamente o dobro da taxa de infiltração do IP1. No caso

dos CPs, esse comportamento diferenciado na infiltração não é observado, sendo praticamente igual. Por isso, acredita-se que no item discutido anteriormente não foi possível visualizar grandes diferenças no desempenho hidrológico dos CPs.

Ainda, para demonstrar o impacto no desempenho hidrológico dos pavimentos, na Figura 2.5 observam-se os gráficos com a precipitação e volume dentro dos pavimentos permeáveis para o evento do dia 09/01/2019.

Figura 2.5 - Comportamento Hidrológico dos Pavimentos Permeáveis no evento do dia 09/01/2019: a) Intertravado Poroso e b) Concreto Poroso.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 2.5 a fica clara a diferença no comportamento dos IPs, enquanto que o IP1 chegou a um volume máximo de água acumulada na estrutura de 33,6 l, enquanto que no IP2 foi de 24,9 l. Isso mostra que o subleito do IP1 possui uma taxa de infiltração menor e, por isso, o volume de água acumulada dentro do IP1 é maior. Esse comportamento também pode ser observado no tempo de esvaziamento, sendo 6,6 horas maior que o do IP2. Por consequência, isso explica as diferenças na eficiência e no desempenho hidrológico do pavimento.

Para os CPs também é observada uma diferença no volume máximo dentro do pavimento, porém, em uma menor magnitude, em torno de 2,5 l de diferença. A Figura 2.5b demonstra a similaridade no comportamento entre os dois pavimentos, possuindo aproximadamente mesma taxa de infiltração durante todo o evento de chuva.

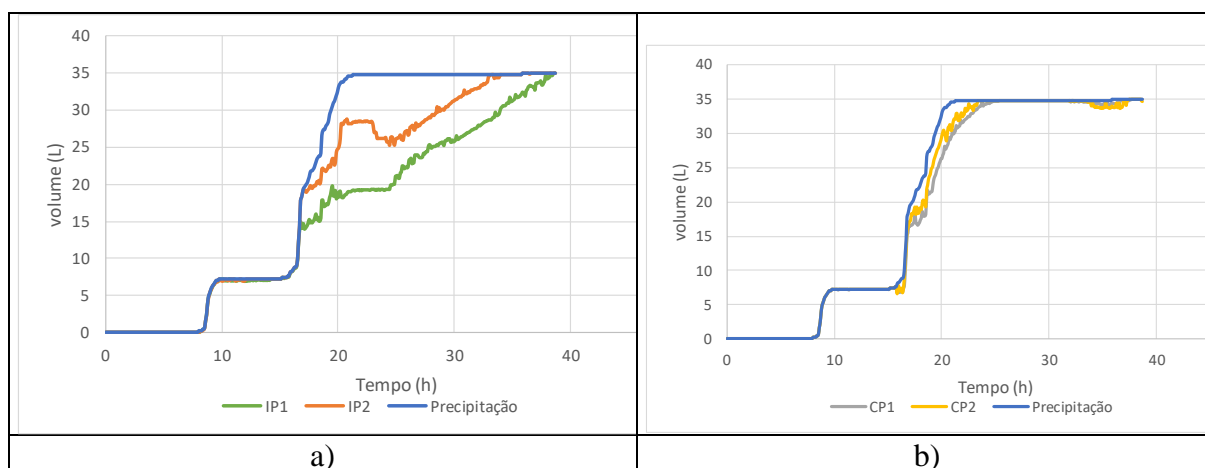
Estudo de monitoramento hidrológico de pavimentos permeáveis realizado por Acioli (2005) Guedes (2015) e Moura (2005) e biorretenções (CADORE et al 2015) em solos argilosos tropicais, ressaltaram a importância de realizar ensaios de infiltração em vários pontos no local de implantação dos pavimentos permeáveis pois observou-se uma grande variabilidade de valores para a taxa de infiltração. Acioli (2005) menciona taxas de infiltração saturada com valores variando de  $1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , em ensaios de infiltração de anéis concêntricos locais

próximos (menos de 10m entre eles). Cadore et al. 2015, numa região próxima ao experimento apresentado nesse trabalho, e com o mesmo tipo de solo, menciona taxas de infiltração saturada variando de  $8.9 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $16 \text{ mm.h}^{-1}$  também em poucos metros.

As diferenças de comportamento dos solos IPs, não podem ser atribuídas exclusivamente ao próprio comportamento heterogêneo natural dos solos tropicais observado inclusive por outros pesquisadores (Ex, ACIOLI, 2005; CADORE, 2016; GUEDES, 2015; MOURA 2005; SOUZA, 2002). Mas também causada por uma possível compactação diferencial involuntária do solo dificultando a passagem da água. Autores como Brady e Weil (2010), Ghidin et al. (2006); Guevara (2007); Silva da Filho 2016; Voguelmann et al. (2012) constataram que devido a presença de óxidos de ferro nos latossolos estes podem se comportar de maneira semelhante a um “solo arenoso”, mas são facilmente compactáveis devido sua baixa densidade e boa macroporosidade.

Para exemplificar o possível efeito da condição de umidade que antecede a infiltração do solo é também apresentado com mais detalhe o evento do 18/11/2018 (Figura 2.6) que teve uma precipitação de 35mm e UAS III.

Figura 2.6 - Infiltração Acumulada nos Pavimentos Permeáveis no evento do dia 18/11/2018: a) Intertravado Poroso e b) Concreto Poroso.



Fonte: Autor.

Da mesma forma, ocorre o que já foi visto anteriormente, o pavimento IP1 apresenta uma taxa de infiltração menor que do IP2. Acredita-se que essas diferenças podem ser causadas pela heterogeneidade do solo como granulometria e textura de forma que algumas porções possuem

maiores capacidades de infiltração. Semelhante ao ocorrido nos outros eventos de chuva não sendo perceptível possíveis interferências devido a umidade antecedente do solo.

## 2.4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que o pavimento permeável se mostrou uma técnica eficiente para atingir os objetivos do Desenvolvimento de Baixo Impacto, com retenções do escoamento superficial variando entre 89 % e 97,9% para os IPs e entre 97,6% e 98,6 % para os CPs em um argissolo. Valores similares foram reportados por diversos autores como Roseen et al. (2012), Bean et al. (2008), Kwiatkowski (2007) Brattebo e Booth (2003) e de Hunt et al. (2002), porém em solos arenosos ou siltosos, de reconhecida alta taxa de infiltração.

O bom desempenho foi atribuído às propriedades típicas dos solos tropicais como a presença de grande biodiversidade criando canais preferenciais ou óxidos de ferro que pela sua ação cimentante, produzem pequenos agregados bastante estáveis chamados de “pseudo-areias” já que podem se comportar hidrológicamente de maneira semelhante a um “solo arenoso”.

No entanto, foi observado que os módulos de pavimentos avaliados apresentaram comportamentos diferentes com relação à retenção da água da chuva e escoamento superficial, dependendo de variáveis como as características da precipitação (intensidade e duração). Mas, principalmente, percebeu-se a grande influência do solo do subleito de cada pavimento, mesmo em pavimentos localizados a poucos centímetros um do outro. A heterogeneidade foi atribuída ao efeito difícil de estimar de raízes ou pedofauna e a facilidade com que macroporos criados nas “pseudo-areias” podem ser compactados em concordância com observações de diversos autores como Brady e Weil (2010), Ghidin et al. (2006); Guevara (2007); Silva da Filho 2016; Voguelmann et al 2012.

Também se ressalta a importância da necessidade de realizar ensaios de infiltração em vários pontos no local de implantação dos pavimentos permeáveis em solos subtropicais para ter uma estimativa mais precisa da taxa de infiltração acompanhando recomendações de autores como Acioli (2005) Guedes (2015) e Moura (2005) e Cadore et al. (2015). Da mesma forma, a necessidade de controlar cuidadosamente a construção dos pavimentos de forma a evitar que a eventual compactação do solo e eliminação de macroporos. Maiores estudos sobre as cargas admissíveis são necessários, mas podem admitir-se, como guia preliminar, a necessidade de manter uma intensidade de tráfego inferior a  $2.67 \text{Mg km.ha}^{-1}$  seguindo a Voguelmann et al 2012. Também, considerando a textura do argissolo, a necessidade de um melhor estudo do processo de colmatção do solo no longo prazo.

## 2.5 REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_. **NBR 16416 – Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro; ABNT, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14545 – Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro: ABNT, 2000
- ABDOLLAHIAN, S. et al. Stormwater quality benefits of permeable pavement systems with deep aggregate layers. **Environments**, v. 5, n. 6, p. 68, 2018.
- ACIOLI, L. A. Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2005.
- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A. Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. p. 4253–4273, 2012.
- ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.
- BAEK, S. et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach. **Water Research**, v. 86, p. 122–131, 2015.
- BALBO, J. T. Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. 1. Ed. São Paulo, 2020. 175 p.
- BASILE, R. O. N. C.; et al. A estrutura da Floresta Atlântica de encosta e arquitetura de raízes arbóreas: maciço da Tijuca - RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: v.1, p.1909-1917, 2003.
- BEAN, E. Z. et al. Evaluation of Four Permeable Pavement Sites in Eastern North Carolina for Runoff Reduction. v. 133, n. 6, p. 583–592, 2008.
- BEELDENS, A.; HERRIER, G. Water pervious pavement blocks: The Belgian experience. In: **Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, CA, USA.** 2006. p. 6-8.
- BRACKEN, L. J.; COX, N. J.; SHANNON, J. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south–east Spain. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 22, n. 5, p. 683-696, 2008.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. Elements of the nature and properties of soils. 2010.
- BRATTEBO, B. O.; BOOTH, D. B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. v. 37, p. 4369–4376, 2003.
- CADORE, R. et al. AVALIAÇÃO DO ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DA ABNT-NBR 13969/97.
- CADORE, R. C. Critérios de dimensionamento de biorretenções. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L.; MARQUES, D. M. **Avaliação da evolução do comportamento quantitativo de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. Vol. 18, n.1,

2013.

CASTRO, T. Q. **Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis**. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia Civil -UFG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do meio Ambiente, Goiânia, 2011.

CLARY, J. et al. Integration of low-impact development into the international stormwater BMP database. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 3, p. 190-198, 2011.

COUNTY, Prince George's et al. Low-impact development hydrologic analysis. Department of Environmental Resource, Prince George's County, Maryland, 1999.

DE ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. EM; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Braz. J. Water Resources**, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

DREELIN, E. A.; FOWLER, L.; CARROLL, C. R. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events. **Water Research**, v. 40, n. 4, p. 799-805, 2006.

DUNKERLEY, David. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 22, n. 26, p. 5024-5036, 2008.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, p. 413–432, 2017.

ENGEL, B. et al. A Hydrologic/Water Quality Model Application 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 5, p. 1223-1236, 2007.

FATEHNIA, M. et al. Automating double ring infiltrometer with an Arduino microcontroller. **Geoderma**, v. 262, p. 133-139, 2016.

FASSMAN, E. A. et al. Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. v. 15, n. June, p. 475–485, 2010.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

GHIDIN, André Ademir et al. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: I-mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 293-306, 2006.

GILBERT, Jennifer K.; CLAUSEN, John C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut. **Water research**, v. 40, n. 4, p. 826-832, 2006.

HAKIMDAVAR, R. et al. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 494–508, 2014.

HAUBNER, S. M. Georgia stormwater management manual. (2001)

HOLMES, R. R.; HART, M. L.; KEVERN, J. T. Heavy Metal Removal Capacity of Individual Components of Permeable Reactive Concrete US CR. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2016.

HUANG, J. et al. Temporal Evolution Modeling of Hydraulic and Water Quality Performance of Permeable. **Journal of Hydrology**, 2015.

HUNT, W. F.; STEPHENS, S.; MAYES, D. Permeable pavement effectiveness in eastern

North Carolina. In: **Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage**. ASCE. Portland, OR. 2002.

JAYASURIYA, Niranjali; KADURUPOKUNE, Nilmini. Comparative performance of permeable and porous pavements. 2010.

JATO-ESPINO, D. et al. Coupling GIS with Stormwater Modelling for the Location Prioritization and Hydrological Simulation of Permeable Pavements in Urban Catchments. 2016.

KURUPPU, U.; RAHMAN, A.; RAHMAN, M. A. Permeable pavement as a stormwater best management practice : a review and discussion. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 10, p. 1–20, 2019.

LAMBERTI, L. A. Desempenho de Pavimentos Permeáveis em Região Subtropical. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MARCHIONI, M.; BECCIU, G. Experimental results on permeable pavements in urban areas: a synthetic review. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 10, n. 6, p. 806-817, 2015.

MINETTO, B. Desenvolvimento de sensores de baixo custo para monitoramento hidrológico. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

MNETTO, B; ALLASIA D.G.A; TASSI R. **ECOLOGGER**. Depositante: Universidade Federal de Santa Maria. BR n. BR512021000388-8. Concessão: 09 mar. 2021.

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

MOURA, P.; BARRAUD, Sylvie; BAPTISTA, Márcio Benedito. O funcionamento dos sistemas de infiltração de águas pluviais urbanas. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, 2009.

HARA, F.; OLIVEIRA, L. Physiological and ecological characteristics of rhizobia isolates from acid soils of Iranduba, Amazonas. Volume 40, Número 7, Pags. 667-672, 2005.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Revista Transportes**, v. 25, n. 3, São Paulo, 2017.

POTT, C.A.; DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. r. Bras. ci. Solo, 27:19-27, 2003.

QIN, H.; LI, Z.; FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 577–585, 2013.

ROSEEN, R. M., BALLESTERO, T. P., HOULE, J. J., BRIGGS, J. F., and HOULE, K. M. Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate. **Journal of Environmental Engineering**, 2012.

ROY, A. H. et al. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. **Environmental management**, v. 42, n. 2, p. 344-359, 2008.



RUSHTON, B. T. Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 3, p. 172-179, 2001.

SANTOS, C. A. Comportamento hidrológico superficial, subsuperficial e a erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto – MG. Dissertação de Mestrado. UFOP, Depto. Geologia - Evolução crustal e recursos naturais. 108p. 2001.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. Critérios Para Classificação Hidrológica de Solos Tropicais Brasileiros. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 19, 2011.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3830–3836, 2007.

SCS - Soil Conservation Service. **SCS National Engineering Handbook**. U.S. Department of Agriculture, 1971.

SHAFFER, P. et al. Understanding permeable and impermeable surfaces: technical report on surfacing options and cost benefit analysis. 2009.

SHIPITALO, M. J., DICK, W. A., EDWARDS, W. M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. **Soil Tillage Res.**, **53**, 167–183, 2000.

SHUSTER, W. D.; MORRISON, M. A.; WEBB, R. Front-loading urban stormwater management for success—a perspective incorporating current studies on the implementation of retrofit low-impact development. **Cities and the Environment (CATE)**, v. 1, n. 2, p. 8, 2008.

SILVA FILHO, E. P. Velocidade de infiltração em área pastagem degradada e floresta natural no município de Porto Velho (RO). **Revista franco-brasileira de geografia-Confins**, n. 29, 2016.

SOUZA, V. C. B. Estudo Experimental de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração do Escoamento Superficial. Porto Alegre, 2002.

SUDHAN, R. H. et al. Arduino Atmega-328 Microcontroller. **Ijireeice**, v. 3, n. 4, p. 27–29, 2015.

TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 139–164, 2014.

TOTA-MAHARAJ, K.; SCHOLZ, M. Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions. **Environmental progress & sustainable energy**, v. 29, n. 3, p. 358-369, 2010.

VOGELMANN, E. S. et al. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 291-297, 2012.

WINSTON, Ryan J. et al. Hydrologic performance of four permeable pavement systems constructed over low-permeability soils in northeast Ohio. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 4, p. 04018007, 2018.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2003.

YONG, C. F. et al. The clogging behaviour and treatment efficiency of a range of porous pavements. In: **11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK**. 2008.

### **3 ARTIGO 2 – MODELO SIMPLIFICADO PARA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS BASEADO NO MÉTODO DE PULS**

#### **RESUMO**

A modelagem hidrológica de pavimentos permeáveis deve representar processos naturais complexos e altamente variáveis que podem requerer, se aplicados em grande escala, necessidades computacionais elevadas ou informações que são difíceis de obter, medir ou extrapolar de locais próximos. O método de Puls, originalmente proposto para a simulação de reservatórios, vem ganhando adeptos para simular estruturas de controle na fonte, pela sua simplicidade e baixos requerimentos computacionais. Nesse trabalho é feita a sua adaptação para a simulação de eventos hidrológicos em pavimentos permeáveis. Para isso, foram monitorados módulos experimentais e vagas de estacionamento com revestimento permeável instalados na região de Santa Maria (RS). Os resultados das simulações apresentaram coeficiente de Nash-Sutcliffe que variaram entre 0,66 e 0,97 e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variando entre 0,66 e 0,98. Dessa maneira, o modelo proposto baseado no método de Puls se mostrou eficiente para simulações hidrológicas em pavimentos permeáveis podendo ser uma alternativa viável e de simples utilização para a simulação dessas estruturas.

Palavras Chave: Modelagem hidrológica, método de PULS, Pavimentos permeáveis.

## **ARTICLE 2 - SIMPLIFIED MODEL FOR THE HYDROLOGICAL SIMULATIONS OF PERVIOUS PAVEMENTS BASED ON THE LEVEL-POOL (PULS) METHOD.**

### **ABSTRACT**

The hydrological modeling of permeable pavements must represent complex and highly variable natural processes that may require, if applied on a large scale, high computational needs or information that is difficult to obtain, measure or extrapolate from nearby locations. The Puls method, originally proposed for the simulation of reservoirs, has been gaining adepts to simulate source control structures, due to its simplicity and low computational requirements. In this work, it is adapted to the simulation of hydrological events in pervious pavements. For this, experimental modules and parking spaces with pervious coating installed in the region of Santa Maria (RS) were monitored. The simulation results showed a Nash-Sutcliffe coefficient ranging between 0.66 and 0.97 and coefficient of determination ( $R^2$ ) ranging between 0.66 and 0.98. Thus, the proposed model based on the Puls method proved to be efficient for hydrological simulations in pervious pavements and could be a viable and simple to use alternative for the simulation of these structures.

Keywords: Hydrological modeling, PULS method, pervious pavements.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Diversos modelos computacionais são empregados para simular o comportamento de pavimentos permeáveis (Tabela 3.1) oferecendo diretrizes quanto ao dimensionamento, operação e manutenção dos sistemas. Modelos como o Storm Water Management Model (SWMM) (ROSSMAN, 2008), System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration (*SUSTAIN*) (LEE et al., 2012); HYDRUS 1D e 2D (SIMUNEK et al., 2008) e Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualization (MUSIC) (WONG et al., 2002) têm sido largamente empregados e sua performance consolidada em diversos estudos e pesquisas.

Tabela 3.1 - Modelos Hidrológicos para aplicação em pavimentos permeáveis.

Modelo	Descrição	Aplicação
SWMM (ROSSMAN, 2008)	Modelo de chuva-vazão e hidrodinâmico utilizado para simulações contínuas e por evento permitindo simular: biorretenções, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, reservatórios de água da chuva e filtro vegetal.	ZHANG e GUO, 2015; ZHU et al., 2019; LIN et al., 2015.
SUSTAIN (LEE et al., 2012)	Permite a simulação contínua e discreta de eventos de chuva. O usuário pode escolher 14 diferentes tipos de técnicas de baixo impacto e possui um banco de dados integrado para simulação de custos das estruturas.	GAO et al., 2015; AHIABLAME e ENGEL, 2012;
HYDRUS 1D e 2D (SIMUNEK et al., 2008)	É uma ferramenta de modelagem para simular o movimento da água em meios porosos. O modelo soluciona a equação de Richards para fluxo de água saturado-insaturado. Tem sido utilizado devido a sua capacidade de descrever eficientemente o comportamento hidrológico em meio poroso sob diferentes condições de contorno.	BRUNETTI et al., 2016; ILGEN et al., 2007; CARBONE et al., 2014.
MUSIC (WONG et al., 2002)	É um modelo de simulação contínua que permite aos usuários determinar a qualidade da água em bacias hidrográficas, prever o desempenho de	IMTEAZ et al., 2013; YONG et al.,

	medidas de baixo impacto e projetar um plano para a gestão de águas pluviais.	2013; RAHMAN et al., 2015.
--	---	----------------------------

Fonte: Autor.

No entanto, a representação dos processos naturais complexos e altamente variáveis que ocorrem nos pavimentos permeáveis pode demandar, se aplicados em grande escala, elevada demanda computacional ou diversas informações que são difíceis de obter, medir ou extrapolar (ELLIOTT; TROWSDALE, 2007; ZHOU, 2014; HAKIMDAVAR et al., 2014). Nesse contexto, Elliott e Trowsdale (2007) em uma extensa pesquisa encontraram 40 modelos para a simulação de pavimentos permeáveis e, destes, apenas 10 estavam disponíveis ou possuíam informações suficientes para a sua utilização.

Portanto, mesmo com diversos modelos disponíveis, para a gestão efetiva das bacias urbanas, ainda faltam métodos adaptados aos dados disponíveis para o cálculo dos processos de escoamento, infiltração e evaporação nas estruturas dos pavimentos permeáveis e que sejam econômicos computacionalmente. Também faltam métodos simplificados que, por meio de sua aplicação, possam influenciar as políticas de gestão de recursos hídricos nas cidades. Diante disso, modelos de armazenamento que representam os processos hidrológicos utilizando um menor número de dados, podem ser o caminho para o desenvolvimento dessas metodologias de avaliação generalizada de pavimentos permeáveis.

Dentre esses modelos de armazenamento, o método Puls (PULS, 1928), originalmente proposto para a simulação de reservatórios, vem ganhando adaptações para simular estruturas de controle na fonte. Alguns autores já adequaram com sucesso o método para a simulação de técnicas compensatórias e de baixo impacto onde representaram os dispositivos de maneira similar a um reservatório, porém adaptando a saída de água para ocorrer por meio do processo de infiltração no solo e desprezando a evaporação. Ferreira et al., (2018) e Sobrinha (2012) simularam poços de infiltração de água pluvial no qual observaram que o método representou adequadamente o comportamento hidrológico. Já, Ferreira et al., (2019) e Rosa, (2016) utilizaram o Método de Puls modificado para simular biorretenções e Hirata, (2011) aplicou o método em trincheiras de infiltração.

Nestes estudos, os autores representaram os dispositivos de maneira similar a um reservatório, porém, adaptando a saída de água para ocorrer por meio do processo infiltração no solo e desprezando a evaporação ao concentrar na simulação de eventos. Apesar dessa

flexibilidade em simular diversas estruturas verdes, não foram encontradas referências do método Puls na simulação do comportamento hidrológico de pavimentos permeáveis. Assim, este trabalho avaliou um modelo simplificado de simulação de eventos hidrológicos em pavimentos permeáveis baseado no Método de Puls (PULS, 1928), comparando com resultados de monitoramento de pavimentos permeáveis apresentados em (LAMBERTI, 2019). Os resultados do modelo foram comparados a dados monitorados de uma estrutura de pavimento permeável localizada na cidade de Santa Maria – RS.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Local de Estudo

Os dados utilizados para embasar o presente estudo foram obtidos a partir do monitoramento de uma área experimental composta por pavimentos permeáveis localizada no interior da cidade de Itaara (Figura 3.1), região central do Rio Grande do Sul, Brasil. A região localiza-se na transição entre os biomas Pampa e Mata Atlântica. De acordo com a classificação clássica de Köppen (WMO, 2018), a região está inserida em um clima subtropical úmido (Cfa), com temperatura média de 19,3 °C. Durante os verões quentes e úmidos, as máximas frequentemente ultrapassam os 30 °C, com as mínimas médias caindo para 19 °C. No inverno, as máximas chegam a 19 °C e as mínimas giram em torno de 9 °C a -5 °C, todavia a neve é uma ocorrência rara (LÖBLER et al., 2015). A precipitação média anual é de 1.688 mm, bem distribuída ao longo do ano, embora os eventos de chuva convectiva (maior intensidade) sejam mais comuns na primavera e verão, e os eventos de chuva frontal predominem no inverno e outono (INMET, 2019).

Figura 3.1 - Localização do experimento.



Fonte: Autor (2021).

A área experimental está localizada em uma área plana, e conta com seis módulos de pavimentos permeáveis, pareados entre si, ambos com 1 m<sup>2</sup> de área (1,0 x 1,0m), sendo dois módulos de pavimento intertravado poroso, dois módulos de intertravado de concreto convencional e dois módulos de concreto poroso moldados no local. O conjunto está assentado sobre solo comum do tipo Argissolo Vermelho-amarelo distrófico, típico da região. A declividade é de 2% em ambas as direções, convergindo para uma estrutura de drenagem localizada nas laterais, que capta e conduz o excesso de escoamento para reservatórios localizados na parte inferior. A Figura 3.1 indica a localização do pavimento, e um esquema da seção transversal pode ser observado na Figura 3.2.

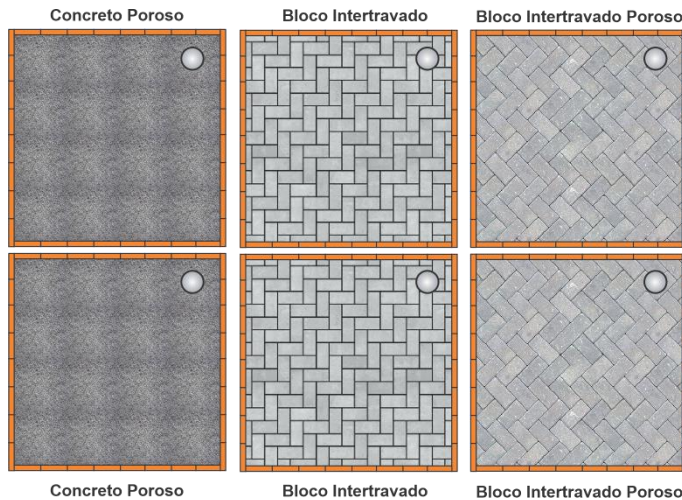
Os módulos não receberam tráfego e foram dimensionados hidrológicamente utilizando o método da curva envelope (CIRIA, 2015) para uma duração de chuva (t) de 60 minutos e tempo de retorno (TR) de 10 anos conforme preconizado pela NBR 16416 (ABNT, 2015). O dimensionamento resultou em uma altura de armazenamento de 15cm, porém, por questões práticas, foi adotado uma altura de 20 cm, seguindo recomendação de manuais para facilitar implementação (WOODS-BALLARD et al., 2015; PDDU, 2005).

Cada um dos módulos foi monitorado quanto ao nível de água percolado no interior do sistema após cada evento chuvoso, utilizando um conjunto de sensores ultrassônicos localizados em tubos de PVC acima dos pavimentos permeáveis (PNP) (Figura 3.2). Todos os sensores foram conectados a um sistema ECOLOGGER (MINETTO et al 2021) que realiza a leitura e registro das informações em um intervalo de 5 minutos. O volume precipitado foi mensurado a partir de um pluviômetro e pluviógrafo de balança localizado nas proximidades. Após cada evento de chuva, os dados registrados foram validados a partir de medições manuais de nível nos reservatórios e precipitação do pluviômetro.

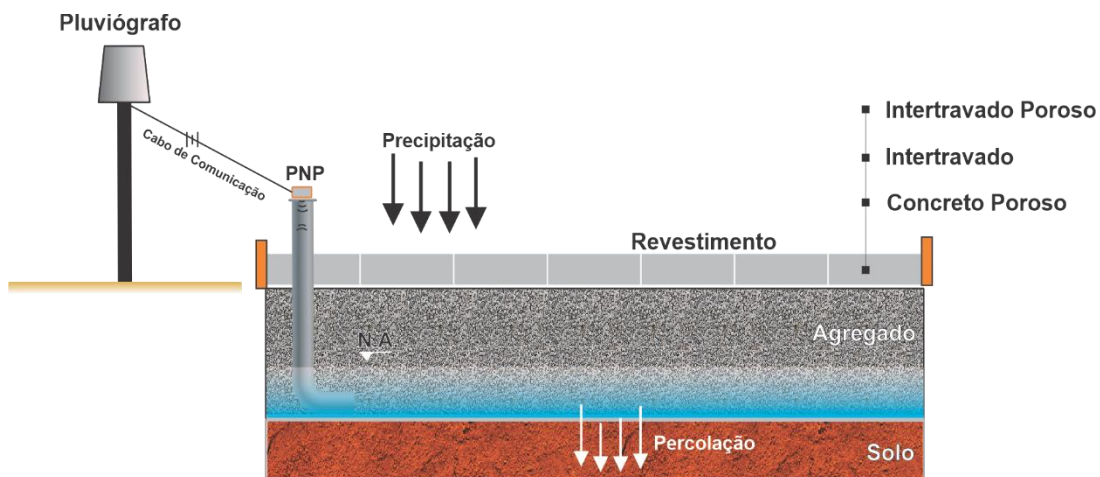


Figura 3.2 - Esquema ilustrativo do monitoramento dos pavimentos permeáveis: (a) Esquema em planta (sem escala); (b) Esquema da seção transversal (sem escala).

a)



b)



Fonte: Adaptado de Lamberti (2019).

### 3.2.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PULS PARA SIMULAÇÃO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

O Método de PULS (PULS, 1928), é um modelo hidrológico para simular a propagação de cheias em reservatórios. No entanto, diversos autores (FERREIRA et al., 2019; FERREIRA et al., 2018; ROSA, 2016; HIRATA, 2011) adaptaram com sucesso a metodologia para simular técnicas compensatórias e de baixo impacto, como o caso de trincheiras de infiltração e biorretenções. Para simulação de pavimentos permeáveis o método precisa ser adaptado a partir da Equação 1 originalmente apresentada por (PULS, 1928):

$$2 * \frac{V_{ARM,t+1}}{\Delta t} + Q_{S,t+1} = (Q_{e,t} + Q_{e,t+1}) + (2 * \frac{V_{ARM,t}}{\Delta t} - Q_{S,t}) \quad (1)$$

Sendo  $V_{ARM,t+1}$  e  $V_{ARM,t}$  volume de água armazenado na estrutura no intervalo de tempo  $t$  e  $t+1$  ( $m^3$ );  $Q_{e,t+1}$  e  $Q_{e,t}$  vazões de entrada no intervalo de tempo  $t$  e  $t+1$  ( $m^3/min$ );  $Q_{S,t+1}$  e  $Q_{S,t}$  vazões de saída ou infiltradas no intervalo de tempo  $t$  e  $t+1$  ( $m^3/min$ ).

Pela Equação 1, em cada intervalo de tempo são conhecidas a vazão de entrada no tempo  $t$  e em  $t+1$ ; a vazão de saída no intervalo de tempo  $t$ ; e o volume armazenado no intervalo  $t$ . Permanecem como incógnitas os termos ( $V_{ARM,t+1}$ ) e ( $Q_{S,t+1}$ ), e ambos dependem do nível da água dentro da estrutura. Como são duas incógnitas e uma única equação, para resolver o sistema é estimada uma relação entre ( $V_{ARM,t+1}$ ) e ( $Q_{S,t+1}$ ), que é gerada a partir da relação cota – volume armazenado no pavimento e a relação entre a cota e a vazão de saída  $Q_{S,t+1}$ .

Para a vazão de saída ( $Q_s$ ), foi considerada a ocorrência de infiltração de água no solo pelas laterais e fundo dos pavimentos permeáveis (Equação 2) uma vez que os dados disponíveis se referem a pavimentos permeáveis pequenos, com uma proporção relativamente grande de infiltração lateral. Importante destacar que em pavimentos grandes, as laterais poderiam ser eventualmente desprezadas e a Equação 2 ser função somente de  $K_1$  e  $A_f$ .

$$Q_s = K_1 * A_f + 2 * K_2 * H * (L + C) \quad (2)$$

Sendo  $K_1$  a taxa de infiltração no fundo do pavimento permeável ( $m/min$ );  $K_2$  taxa de infiltração das laterais do pavimento permeável ( $m/min$ );  $A_f$  área do fundo do pavimento permeável ( $m^2$ );  $L$  largura do pavimento permeável ( $m$ ) e  $C$  comprimento do pavimento permeável ( $m$ ) e  $H$  é a profundidade do pavimento ( $m$ ).

A vazão de entrada é representada pelo volume total precipitado ao longo do tempo e o volume inicial de armazenamento no pavimento permeável foi considerado igual à zero, uma vez que os eventos se encontraram suficientemente espaçados considerando um período de 12 horas, seguindo as recomendações de Bracken et al. (2008) e Dunkerley (2008) é suficiente para reduzir os efeitos da umidade antecedente do solo, o permitindo assim o completo esvaziamento do sistema (condição inicial em cada evento).

Para modelagem dos pavimentos permeáveis foram seguidos os seguintes procedimentos descritos abaixo:

1. Estimativa da relação entre cota e vazão de descarga por infiltração, que corresponde à saída dos pavimentos permeáveis;
2. No instante  $t+1$ , os termos da direita da Equação 1 são conhecidos e determina-se  $2 * \frac{V_{ARM,t+1}}{\Delta t} + Q_{S,t+1}$
3. A partir de  $2 * \frac{V_{ARM,t+1}}{\Delta t} + Q_{S,t+1}$  é obtido o nível de água armazenada pela curva cota  $x$  descarga;
4. O processo é repetido iterativamente para cada intervalo de tempo da série.

### 3.2.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

#### 3.2.3.1 Análise Estatística da Calibração e Validação

O desempenho do método foi avaliado, comparando-se o nível de água infiltrado (determinado pelas simulações) com o observado, além do volume total infiltrado, tempo ao pico e taxa de infiltração. Previamente foi realizada uma análise gráfica entre dados observados e simulados para cada evento, sendo necessário como um primeiro passo para avaliar os resultados de um modelo (Krause et al., 2005). A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio de dois testes estatísticos: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe - NSE (Nash; Sutcliffe, 1970) e o coeficiente de determinação –  $R^2$ . Estes testes são recomendados por Moriasi et al. (2015) para analisar o desempenho de modelos hidrológicos.

O NSE (Equação 3) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variação residual em comparação com a variação dos dados medidos (NASH; SUTCLIFFE, 1970). O NSE varia entre  $-\infty$  e 1,0, sendo  $NSE = 1$  o perfeito ajuste entre dados simulados e observados. De acordo com Moriasi et al. (2015), um modelo hidrológico pode considerado satisfatório com valores de  $NSE > 0,5$ .

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2}, \quad (3)$$

Sendo  $n$  número total de medições;  $X_{obs}$  os dados observados;  $X_{sim}$  os dados simulados e;  $\overline{X_{sim}}$  a média dos dados observados.

O coeficiente de determinação  $R^2$  é definido como o valor quadrático do coeficiente de correlação linear de Bravais-Pearson. Estima a dispersão combinada com a dispersão única das séries observada e simulada. O intervalo de  $R^2$  se concentra entre 0 e 1, descrevendo quanto da dispersão observada é explicada pela simulada. Um valor zero significa nenhuma correlação, ao passo que um valor 1 significa que a dispersão da simulação é igual ao da observação (MORIASI et al., 2015). É calculado como:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \overline{X_{obs}}) * (X_{sim} - \overline{X_{sim}})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \overline{X_{obs}})^2 - \sum_{i=1}^n (X_{sim} - \overline{X_{sim}})^2)}} \right)^2 \quad (4)$$

Sendo  $n$  número total de medições;  $X_{obs}$  os dados observados e;  $X_{sim}$  os dados simulados.

O parâmetro calibrado nas simulações são as taxas de infiltração (K1 e K2), adotando-se como critério inicial um solo completamente saturado, cuja estimativa inicialmente empregada foi de 8,75 mm/h (LAMBERTI, 2019). Com os resultados da primeira simulação calculados, foi analisado o ajuste do modelo pelo coeficiente de NSE e  $R^2$ . Caso o modelo não apresentasse desempenho satisfatório os valores de K1 e K2 são otimizados iterativamente manualmente até encontrar valores satisfatórios.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram agrupados e discutidos por tipo de pavimento permeável, os eventos monitorados são mostrados na Tabela 3.2 - Eventos utilizados para a modelagem dos pavimentos permeáveis. e sinalizados quais eventos foram utilizados para calibração (C) e validação (V). Os eventos que não foram utilizados em alguns casos foi porque não houve entrada de água significativa dentro do pavimento.

Tabela 3.2 - Eventos utilizados para a modelagem dos pavimentos permeáveis.

	<b>Evento</b>	<b>P (mm)</b>	<b>td (h)</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>IP1</b>	<b>IP2</b>
1C	24/08/2018	27.8	16.1	X	X	*	*
2C	02/09/2018	53.8	25.0	X	X	X	X
3C	24/09/2018	22.0	*	*	*	X	*
4C	08/10/2018	41.2	4.3	X	X	X	X
5V	18/11/2018	24.8	13.3	*	*	X	*
6V	09/01/2019	52.4	23.4	X	X	X	X
7V	18/01/2019	52.0	7.5	X	X	X	X

\* Não avaliado

Fonte: Autor.

#### 3.3.1 Calibração e Validação – Revestimento Concreto Poroso (CP)

Dos sete eventos monitorados apenas cinco foram utilizados para o pavimento de concreto poroso (CP1) e seis para o CP2 devido ao nível dentro dos pavimentos ser inferior a 0,05 metros o que não possibilitou a calibração do modelo. Na Tabela 3.3 podem se observar os valores obtidos na aplicação do Método de PULS.

Tabela 3.3 - Resultados da Modelagem pelo Método de PULS para os CPs.

Evento	CP1				CP2			
	K1 (mm/h)	K2 (mm/h)	R <sup>2</sup>	NSE	K1 (mm/h)	K2 (mm/h)	R <sup>2</sup>	NSE
24.08C	12	0.6	0.97	0.95	12	0.6	0.95	0.95
02.09C	12	0.6	0.66	0.66	12	0.6	0.84	0.83
24.09	sem escoamento significativo				sem escoamento significativo			
08.10C	12	0.6	0.98	0.97	12	0.6	0.93	0.92
18.11	sem escoamento significativo				sem escoamento significativo			
09.01V	12	0.6	0.93	0.76	12	0.6	0.82	0.74
18.01V	12	0.6	0.96	0.93	12	0.6	0.83	0.77

Fonte: Autor.

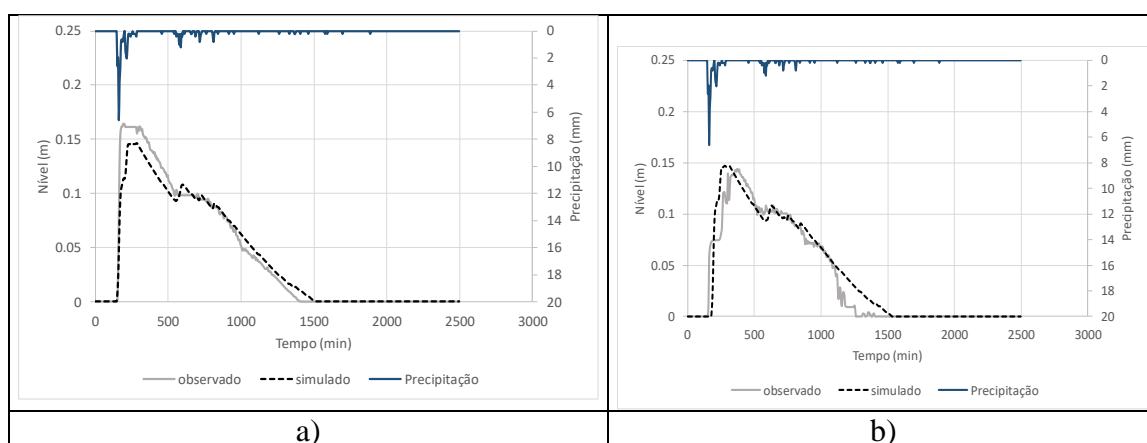
Com os resultados é possível perceber que o Método de PULS foi capaz de simular satisfatoriamente o comportamento dos pavimentos permeáveis para cada evento de chuva. O CP1 obteve valores médios para a calibração de R<sup>2</sup> de 0.87 e de NSE de 0.86 e para a validação R<sup>2</sup> de 0.94 e NSE de 0.85. O CP2 apresentou valores médios para calibração de R<sup>2</sup> de 0.91 e NSE de 0.90 e para a validação R<sup>2</sup> de 0.82 e NSE de 0.72. Lucas et al. (2013) que utilizaram o método de PULS para simular um sistema de filtro-vala-trincheira encontraram um valor médio para o NSE sendo de 0.43 e os autores observaram variações significativas de evento para evento no NSE, -0.98 a 0.98. Eles atribuíram essas variações a simplificações no método decorrentes da variação da infiltração e da lâmina armazenada em depressões do solo com o tempo. Os autores também recomendam que seja levado em conta o decréscimo da taxa de infiltração do em função do umedecimento do solo, visto que o método utiliza valores constante para a taxa de infiltração. Já Tecedor et al. (2015) aplicando o método de PULS para simular um plano de infiltração chegaram a valores mais próximos ao deste estudo R<sup>2</sup> de 0.75.

Todos os coeficientes de maneira geral se demonstraram satisfatórios, porém foi descartado das simulações os eventos de chuva que não apresentaram escoamento significativo no interior dos pavimentos. Esses níveis pequenos dificultaram a medição por meio de equipamentos automáticos o que por consequência dificultou o ajuste do modelo, por isso optou-se pela não utilização destes. Isso é corroborado por Lucas et al. (2013) que também constatou que os menores registros de nível apresentam os maiores erros de leitura, fato inerente

ao equipamento. De forma análoga, Hirata (2011) que também aplicou o Método de PULS em uma trincheira de infiltração, para níveis inferiores a 0,1 m a autora também não encontrou ajustes satisfatórios.

Na Figura 3.3 é demonstrado o resultado obtido na aplicação do Método de PULS na simulação do evento do dia 08.10. Neste evento, o total precipitado foi de 46,2mm e níveis máximos observado de 16,4 e 14,4 centímetros para o CP1 e CP2, respectivamente.

Figura 3.3 - Modelagem do Evento 08.10: a) CP1 e b) CP2.



Fonte: Autor.

A Figura 3.3 a) e b) mostram as variações observadas do nível de água, de acordo com essas figuras, o método Puls simulou o nível interno de água de forma semelhante ao observado o  $R^2$  obtido foi igual a 0,98 e o NSE igual a 0,97 na calibração. Weaver et al. (2015) usaram o modelo Puls para simular um plano de infiltração e encontrou um  $R^2$  médio de 0,72, usando valores para taxas de infiltração de um teste de infiltrômetro de anel duplo. Ferreira et al. (2018) modelaram dois poços de infiltração e encontraram  $R^2$  médio de 0,92 e NS médio de 0,56. Eles realizaram uma calibração semelhante a este estudo, mas ambos os estudos implementaram experimentos com controle total da entrada de água por meio de simulação de eventos de precipitação. Diferente do caso deste estudo, onde foi monitorado eventos de reais de chuva sujeito a interferências climáticas.

Vale destacar que, apesar de ter sido possível utilizar os mesmos valores de  $K_1$  e  $K_2$  para os dois revestimentos, houve em alguns casos uma diferença significativa nos resultados obtidos para o  $R^2$  e NSE. Considerando que os pavimentos são duplicatas iguais instaladas lado a lado, resultados próximos eram esperados. No entanto acredita-se que devido a heterogeneidade do solo desempenhos distintos foram obtidos. Acioli (2005) e Cadore (2016)

também observaram esse comportamento heterogêneo do solo e ressaltam a importância do estudo do solo para o dimensionamento de estruturas de infiltração.

### 3.3.2 Calibração e Validação – Revestimento Intertravado Poroso (IP)

Para a calibração e validação dos pavimentos do tipo intertravado poroso seis eventos foram utilizados para o IP1 e quatro para o IP2, sendo que no primeiro evento houve falha na obtenção dos dados e nos eventos do dia 24.09 e 18.11 no IP2 o nível dentro do pavimento foi inferior a 0,05 metros, impossibilitando a calibração do modelo. Na Tabela 3.4 - Resultados da Modelagem pelo Método de PULS para os IPs. podem ser observados os valores obtidos na aplicação do Método de PULS.

Tabela 3.4 - Resultados da Modelagem pelo Método de PULS para os IPs.

Evento	IP1				IP2			
	K1 (mm/h)	K2 (mm/h)	R <sup>2</sup>	NSE	K1 (mm/h)	K2 (mm/h)	R <sup>2</sup>	NSE
02.09C	7.2	0.6	0.92	0.91	7.2	0.6	0.93	0.92
24.09C	7.2	0.6	0.97	0.93	sem escoamento significativo			
08.10C	7.2	0.6	0.96	0.88	7.2	0.6	0.98	0.97
18.11V	7.2	0.6	0.98	0.97	sem escoamento significativo			
09.01V	7.2	0.6	0.78	0.79	7.2	0.6	0.72	0.89
18.01V	7.2	0.6	0.97	0.97	7.2	0.6	0.89	0.67

Fonte: Autor.

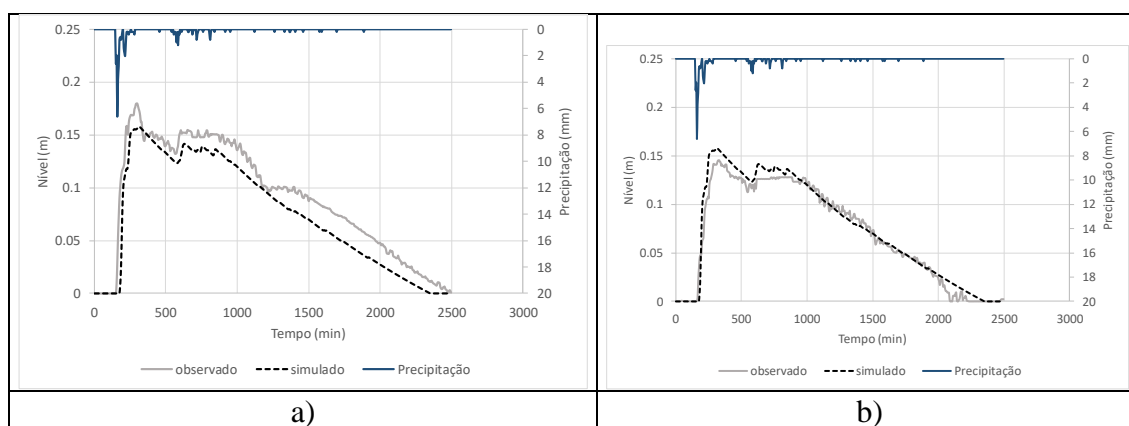
Neste caso também assumiu valores constantes de K1 e K2 para os IPs em todas as simulações e o modelo se manteve com desempenho satisfatório. O IP1 obteve valores médios para a calibração de R<sup>2</sup> de 0.95 e de NSE de 0.91 e para a validação R<sup>2</sup> de 0.91 e NSE de 0.91. O IP2 apresentou valores médios para calibração de R<sup>2</sup> de 0.96 e NSE de 0.94 e para a validação R<sup>2</sup> de 0.8 e NSE de 0.78. Porém, de forma análoga ao caso dos CPs anteriormente os IPs também apesar de estarem lado a lado diferentes resultados foram obtidos tanto na calibração quanto na validação o que mais uma vez evidencia a importância do estudo do solo para a instalação de estruturas de infiltração.



Apesar de em todos os casos resultados satisfatórios terem sido obtidos na modelagem, trabalhos como os de Tecedor (2015) e Ferreira (2019) que aplicaram o Método de PULS na simulação de plano de infiltração e de biorretenções sugerem a utilização de taxas de infiltração variáveis durante os eventos de chuva para obter um melhor desempenho do modelo. Isto porque há um decréscimo na taxa de infiltração em função do umedecimento do solo. Sobrinha (2012) que também utilizou o método de PULS para modelagem de um poço de infiltração ressalta que apesar do método ter simulado adequadamente o comportamento do dispositivo, um fator limitante é que os valores de K são constantes o que limita a representação real do processo de infiltração do solo.

Na Figura 3.4 - Modelagem do Evento 08.10: a) IP1 e b) IP2. encontra-se o resultado obtido na modelagem pelo Método de PULS para o evento do dia 08.10, onde o total precipitado foi de 46,2mm. Os níveis máximos foram de 17,9 e 14,6 centímetros para o IP1 e IP2, respectivamente.

Figura 3.4 - Modelagem do Evento 08.10: a) IP1 e b) IP2.



Fonte: Autor.

Analisando visualmente o resultado do modelo Figura 3.4 percebe-se que o modelo foi capaz de representar adequadamente os tempos de subida e tempo ao pico. Aqui é possível perceber nos hidrogramas observados demonstrando a diferença de comportamento dos pavimentos o que leva a acreditar que foi a razão de terem se obtidos valores diferentes para os coeficientes  $R^2$  e NSE principalmente na validação do modelo. Outro fator importante é que poucos eventos de precipitação foram utilizados para calibração tanto do IP1 quanto do IP2 mas no caso do IP2 que apenas 2 eventos para calibração e 2 para validação fica ainda mais limitada

a modelagem. Para trabalhos futuros há necessidade de se monitorar mais eventos para que possibilite uma análise mais detalhada do método.

Com relação aos parâmetros K1 e K2 adotados, o parâmetro K1 que descreve a taxa de infiltração do solo no fundo variou entre 0.00012 mm/min e 12 mm/min. Silva Filho (2016) encontrou taxas similares em seus estudos de velocidade de infiltração em pastagens degradadas sob argilossolos vermelhos e amarelos distróficos. Já o K2 que descreve a infiltração lateral percebe que foi possível utilizar tanto para os CPs do item anterior quanto para os IPs o mesmo valor. Porém é K2 é muito menor que K1, o que se deve que neste estudo os pavimentos foram impermeabilizados nas laterais por azulejos, mas acredita-se que houve pequenas perdas entre as juntas não cimentadas dos azulejos, por isso houve a necessidade da utilização do K2. Ainda, este estudo é em escala onde os pavimentos são pequenos logo há uma maior influência das laterais, no caso de pavimentos permeáveis maiores as perdas nas laterais podem eventualmente tornar-se desprezíveis, eliminando a necessidade do coeficiente K2.

### 3.4 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou o Modelo de Puls modificado como uma alternativa na modelagem de pavimentos permeáveis. Foram utilizados sete eventos, e os resultados mostraram coeficientes  $R^2$  e NSE médios variando de 0.72 a 0.98 e 0.66 a 0.97, respectivamente. O Método de PULS apresentou, em geral, resultados satisfatórios na modelagem dos pavimentos permeáveis e representou com qualidade o funcionamento do sistema. Principalmente, em contraste com a simplicidade e facilidade de uso do modelo, observou-se representatividade do complexo funcionamento real do sistema e coerência nas curvas de armazenamento de água, demonstrando ser alternativa para a verificação do dimensionamento e simulação da operação de estruturas de infiltração.

No entanto, esperava-se que para todos os revestimentos seria possível adotar os mesmos parâmetros de K1 e K2 em todos os eventos de chuva. Apesar de bons resultados terem sido obtidos na modelagem pelo Método de PULS, vale ressaltar a importância do estudo em escala e com duplicatas. Os pavimentos levantam a importância do estudo em escala reduzida que viabiliza a construção de duplicatas, pois exercem papel fundamental no entendimento dos processos que ocorrem nessas estruturas de infiltração possibilitando a concepção adequada do pavimento permeável.

Por fim, apenas sete eventos de chuva foram utilizados para análise do método. Recomenda-se que mais estudos sejam realizados com períodos de monitoramento maior, para aprimorar o Método de PULS bem como o entendimento do comportamento hidrológico dos pavimentos permeáveis. Para trabalhos futuros também se recomenda avanços na modelagem do sistema como a utilização da taxa de infiltração variável e também o monitoramento de mais variáveis para aprimorar o modelo.

### 3.5 REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_. **NBR 16416 – Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** São Paulo; ABNT, 2015.
- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2005.
- AHIABLAME, Laurent M.; ENGEL, Bernard A.; CHAUBEY, Indrajeet. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 223, n. 7, p. 4253-4273, 2012.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- BRACKEN, L. J.; COX, N. J.; SHANNON, J. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 22, n. 5, p. 683-696, 2008.
- BRUNETTI, Giuseppe; ŠIMŮNEK, Jiří; PIRO, Patrizia. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1146-1161, 2016.
- CADORE, R. C. Critérios de dimensionamento de biorretenções. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- CARBONE, M.; BRUNETTI, G.; PIRO, P. Hydrological performance of a permeable pavement in Mediterranean climate. **14th SGEM GeoConference on Water Resources: Forest, Marine and Ocean Ecosystems, Albena, Bulgaria**, p. 17-26, 2014.
- CLARY, J. et al. Integration of low-impact development into the international stormwater BMP database. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 3, p. 190-198, 2011.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia.** 2008. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas-UFRGS, 2008.
- DE LEMOS, R. C. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Embrapa Solos-Séries anteriores (INFOTECA-E), 1973.
- DUNKERLEY, David. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 22, n. 26, p. 5024-5036, 2008.
- ELLIOTT, A. H.; TROWSDALE, S. A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. **Environmental modelling & software**, v. 22, n. 3, p. 394-405, 2007.
- ENGEL, B. et al. A Hydrologic/Water Quality Model Application 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 5, p. 1223-1236, 2007.

- 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 Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 437-446, 2018.
- FERREIRA, L. M.; NEVES, M.; SOUZA, V. Método de PULS aplicado a um sistema de biorretenção em escala de lote para simulação de eventos. **RBRH**, v. 24, 2019.
- GAO, Jie et al. Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area. **Ecological Modelling**, v. 318, p. 177-183, 2015.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.
- HIRATA, A. H. **Monitoramento e Modelagem de um sistema Filtro–Vala–Trincheira de infiltração em escala real**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- ILLGEN, Marc et al. Runoff and infiltration characteristics of pavement structures—Review of an extensive monitoring program. **Water Science and Technology**, v. 56, n. 10, p. 133-140, 2007.
- IMTEAZ, Monzur Alam et al. Modelling stormwater treatment systems using MUSIC: Accuracy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 71, p. 15-21, 2013.
- LAMBERTI, L. A. **Desempenho de Pavimentos Permeáveis em Região Subtropical**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- LEE, G. et al. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. **Environmental Modelling and Software**, 2012.
- LIN, Wuguang et al. Performance evaluation of the runoff reduction with permeable pavements using the SWMM model. **International Journal of Highway Engineering**, v. 17, n. 4, p. 11-18, 2015.
- LUCAS, A. H.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, E. B. Modelagem de um sistema filtro-vala-trincheira de infiltração pelo método de puls adaptado para calibração de parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 225-236, 2013.
- MORIASI, D. N. et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.
- PDDU – PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA. Manual de drenagem urbana. Departamento de Esgotos Pluviais, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Vol. VI, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- PULS, L. G. Flood regulation of the Tennessee River. In: **Proceedings of the 70th congress, Ist Session**, HD. 1928.
- RAHMAN, Md Aminur et al. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 183-194, 2015.
- ROSA, A. **Bioretention for diffuse pollution control in SUDS using experimental-adaptive approaches of ecohydrology**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ROSSMAN, L. A. Modeling Low Impact Development Alternatives with SWMM. v. 6062, 2008.

- ROY, A. H. et al. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. **Environmental management**, v. 42, n. 2, p. 344-359, 2008.
- SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, Francisco; GENOVEZ, Abel Maia. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.
- SHUSTER, W. D.; MORRISON, M. A.; WEBB, R. Front-loading urban stormwater management for success—a perspective incorporating current studies on the implementation of retrofit low-impact development. **Cities and the Environment (CATE)**, v. 1, n. 2, p. 8, 2008.
- SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. 2008.
- SOBRINHA, L.A. **Monitoramento e modelagem de um poço de Infiltração de águas pluviais em escala real e com filtro na tampa**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos.
- TECEDOR, N.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R.; GONÇALVES, L M. Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20. P. 594-604, 2015.
- TUCCI, C. E. M. *Gestão de Águas Pluviais Urbanas*. 2005.
- URBONAS, Ben; STAHR, Peter. **Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management**. 1993.
- WOODS-BALLARD, B., et al. **The SUDS manual (C753)**. CIRIA - Construction Industry Research and Information Association, London, 2015.
- WONG, T. et al. A model for urban stormwater improvement: conceptualization. In: **Global Solutions for Urban Drainage**. 2002. p. 1-14.
- YONG, Chui Fern; MCCARTHY, David Thomas; DELETIC, Ana. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. **Journal of Hydrology**, v. 481, p. 48-55, 2013.
- ZHANG, Shouhong; GUO, Yiping. SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, n. 8, p. 06014010, 2015.
- ZHU, Haoran et al. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. **International journal of transportation science and technology**, v. 8, n. 4, p. 373-382, 2019.
- ZHOU, Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. **Water**, v. 6, n. 4, p. 976-992, 2014.

## 4 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo constatou-se a importância do monitoramento desse tipo de estruturas para propiciar o bom entendimento do seu comportamento ao longo do tempo. Por meio dele foi possível compreender os processos que ocorrem durante os eventos de precipitação e como eles influenciam os pavimentos permeáveis em sua eficiência na retenção e redução de escoamento.

A eficiência dos pavimentos permeáveis foi avaliada por meio da sua capacidade de retenção e redução de escoamento em 33 eventos chuvosos. Sendo que foi obtido uma eficiência média de retenção de escoamento de pelo menos 89% para todos os casos. Vale ressaltar, que os módulos de concreto poroso (CP) obtiverem eficiências maiores, aproximadamente 98%. Evidenciando a importância do estudo dessas técnicas em escala reduzida para tomada de decisão na etapa de concepção do projeto. A infiltração do solo, juntamente com o tempo de duração e intensidade dos eventos de precipitação se mostraram como variáveis importantes no desempenho dos pavimentos permeáveis. Por outro lado, a umidade antecedente do solo mostrou-se pouco influente na capacidade de retenção de escoamento.

A aplicação do Método de Puls na simulação dos pavimentos permeáveis foi eficaz. Em todos os casos foram obtidos coeficientes de NSE e  $R^2$  se enquadraram como satisfatórios para um modelo hidrológico. Ferramentas como esta, podem difundir a aplicação de pavimentos permeáveis pois possibilita a simulação de cenários sendo necessária apenas a calibração da infiltração do solo. Percebeu-se que, apesar de existirem vários modelos hidrológicos na literatura ainda, faltam métodos simplificados que por meio de sua aplicação possam influenciar as políticas de gestão de recursos hídricos nas cidades. Modelos de armazenamento como o de Puls que representam os processos hidrológicos utilizando um menor número de dados, podem ser o caminho para o desenvolvimento dessas metodologias de avaliação generalizada de pavimentos permeáveis.

Outro fator importante é a realização de estudos que propiciem a criação de diretrizes básicas para a instalação e dimensionamento desses dispositivos. Foi observada a influência que a infiltração do solo tem sob o desempenho hidrológico, pois pavimentos de mesmo revestimento e instalados lado a lado obtiveram para os mesmos eventos de chuva eficiências

médias de retenção de escoamento diferentes, sendo que para o IP1 89% e IP2 98% totalizando quase 10%. Evidenciando, a importância do conhecimento solo de sub leito no qual o pavimento permeável será instalado e isso se dá pela criação de diretrizes.

De forma geral, analisando os dados obtidos, pode-se concluir que os pavimentos permeáveis se constituem em uma alternativa eficiente para mitigar problemas de alagamentos no meio urbano, em 3 revestimentos valores muito próximos de 100% para retenção de escoamento foram obtidos. Porém, para sua aplicação em larga escala ainda faltam estudos com períodos de monitoramento longos e também em diferentes tipos de solo para que se possam atingir todos seus benefícios. Com um conhecimento mais detalhado sobre essa técnica mais cidades terão interesse em utilizá-la.



## 5 REFERÊNCIAS

- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A. Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. p. 4253–4273, 2012.
- BALBO, J. T. Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. 1. Ed. São Paulo, 2020. 175 p.
- CADORE, R. C. Critérios de dimensionamento de biorretenções. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L.; MARQUES, D. M. **Avaliação da evolução do comportamento quantitativo de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. Vol. 18, n.1, 2013.
- DHAKAL, Krishna P.; CHEVALIER, Lizette R. Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. **Journal of environmental management**, v. 203, p. 171-181, 2017.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, p. 413–432, 2017.
- FASSMAN, E. A. et al. Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. v. 15, n. June, p. 475–485, 2010.
- FLETCHER, T D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. **Advances in water resources**, v. 51, p. 261-279, 2013.
- FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.
- GRIMM, Nancy B. et al. Global change and the ecology of cities. **Science**, v. 319, n. 5864, p. 756-760, 2008.
- HAKIMDAVAR, R. et al. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 494–508, 2014.
- HOLMES, R. R.; HART, M. L.; KEVERN, J. T. Heavy Metal Removal Capacity of Individual Components of Permeable Reactive Concrete US CR. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2016.
- HUANG, J. et al. Temporal Evolution Modeling of Hydraulic and Water Quality Performance of Permeable. **Journal of Hydrology**, 2015.
- JACOBSON, Carol R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. **Journal of environmental management**, v. 92, n. 6, p. 1438-1448, 2011.
- JATO-ESPINO, D. et al. Coupling GIS with Stormwater Modelling for the Location Prioritization and Hydrological Simulation of Permeable Pavements in Urban Catchments. 2016.

KURUPPU, U.; RAHMAN, A.; RAHMAN, M. A. Permeable pavement as a stormwater best management practice : a review and discussion. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 10, p. 1–20, 2019.

LAMBERTI, L. A. **Desempenho de Pavimentos Permeáveis em Região Subtropical**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. **Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado**. Revista Transportes, v. 25, n. 3, São Paulo, 2017.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3830–3836, 2007.

TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 139–164, 2014.

TUCCI, C. E. M. *Gestão de Águas Pluviais Urbanas*. 2005.