

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

POLIANI ALESSANDRA VARTHA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ESCOAMENTO NÃO
SATURADO EM PAVIMENTOS PERMEÁVEIS COM
PRESENÇA DE DRENO DE FUNDO**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO 2023

POLIANI ALESSANDRA VARTHA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ESCOAMENTO NÃO
SATURADO EM PAVIMENTOS PERMEÁVEIS COM
PRESENÇA DE DRENO DE FUNDO**

**Numerical Modeling of Unsaturated Flow in Permeable
Pavement with The Presence of a Bottom Drain**

Dissertação apresentado(a) como requisito para obtenção do título(grau) de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco**



POLIANI ALESSANDRA VARTHA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ESCOAMENTO NÃO SATURADO EM PAVIMENTOS PERMEÁVEIS COM
PRESENÇA DE DRENOS DE FUNDO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 28 de Junho de 2023

Dr. Murilo Cesar Lucas, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rafael De Oliveira Tiezzi, Doutorado - Universidade Federal de São Carlos (Ufscar)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 28/06/2023.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha mãe, Marivete, por ser um exemplo inspirador como professora. Meu pai, André, merece um agradecimento especial por nunca medir esforços e estar sempre presente quando mais preciso. À minha irmã, Emili, agradeço as constantes palavras de motivação e fé nas minhas capacidades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas, agradeço sinceramente pela orientação ao longo desses anos. Sua dedicação profissional e valiosas contribuições a este trabalho são essenciais para o meu crescimento acadêmico. Também disso, suas palavras de encorajamento são uma fonte de inspiração.

Agradeço também ao meu coorientador, Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes, pela presteza em ajudar e por suas ideias sempre precisas e relevantes, que enriqueceram significativamente este trabalho.

Aos membros da banca examinadora, agradeço as valiosas sugestões que me fornecem para contribuir com o aprimoramento deste estudo.

Minha colega, Djuliana, merece um agradecimento especial por toda sua ajuda e apoio durante todo o processo de pesquisa. Sua colaboração foi inestimável.

Agradeço à equipe do laboratório de materiais pela presteza e disponibilidade sempre que preciso de ajuda. Suas contribuições são fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Quero expressar minha gratidão à secretária do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial à Silmara, pela atenção dedicada e ajuda prestada em relação às minhas dúvidas e necessidades ao longo desta jornada acadêmica.

Por fim, reconheço que chegar a este momento não teria sido possível sem o apoio e incentivo das pessoas ao meu redor. A todos que me deram força e motivação para terminar este dia, meu muito obrigada.

Cada uma de suas vozes desempenhou um papel importante em minha jornada acadêmica e profissional, e sou grata por todas as contribuições e incentivos ao longo do caminho.

RESUMO

Um dos principais motivos do aumento da frequência das inundações em áreas urbanas é o aumento de superfícies impermeáveis. Práticas sustentáveis de drenagem urbana (*Sustainable Drainage Systems*, SuDS), como Pavimentos Permeáveis (PP), são alternativas que reduzem o volume e vazão de pico de escoamento superficial. Poucos estudos apresentando sobre modelagem numérica computacional têm considerado o processo físico do escoamento não saturado de água através das camadas do PP. O objetivo é calibrar os parâmetros hidráulicos, exclusivamente, por meio de simulações inversas. O modelo utilizado foi o Hydrus-1D e o algoritmo de otimização de parâmetros foi o de Levenberg-Marquardt. Os dados de entrada do modelo foram medidos em módulos experimentais de PP (escala de parcelas). Os módulos experimentais de PP são compostos pelas camadas de revestimento, assentamento, armazenamento e drenos de fundo. As entradas e saídas de água através do PP foram monitoradas em escala subhorária para 12 eventos de chuva. Os resultados mostram excelente ajuste com valores de $NSE > 0.89$ e $NSE > 0.95$ para o PP com revestimento convencional e poroso, respectivamente, pequeno erro médio (MAE e $RMSE < 0.34$ cm) e super e subestimação ($-0,73 \leq Pbias \leq 10,52$) do modelo em relação aos dados medidos de drenagem. O PP com revestimento poroso apresentou melhores ajustes em relação as métricas aplicadas ($-0.83 \leq Pbias \leq 5.02$) Foi possível observar que o revestimento é a camada do PP que predominantemente influencia na drenagem. Portanto, apesar da ênfase no dimensionamento da camada de armazenamento, é preciso adotar critérios mais específicos para a escolha de materiais da camada de revestimento de PP.

Palavras-chave: Inundações Urbanas, Pavimentos Permeáveis, Sistema de Drenagem Sustentável, Hydrus-1D.

ABSTRACT

One of the main reasons for the increased frequency of flooding in urban areas is the increase in impermeable surfaces. Sustainable urban drainage practices (Sustainable Drainage Systems, SuDS), such as Permeable Pavements (PP), are alternatives that reduce the volume and peak flow of surface runoff. Few studies presenting computational numerical modeling have considered the physical process of unsaturated water flow through PP layers. The objective is to calibrate the hydraulic parameters exclusively through inverse simulations. The model used was the Hydrus-1D, and the parameters optimization algorithm was the Levenberg-Marquardt. The model input data were measured in experimental modules of PP (plot scale). The PP experimental modules comprise the wear layer, bedding layer, base layer, and bottom drains. Water inflows and outflows through the PP were monitored on a sub-hourly scale for 12 rainfall events. The results show excellent fit with NSE values > 0.89 and > 0.95 for PP with conventional and porous wear layers, respectively, small mean error (MAE and RMSE < 0.34 cm) and over and underestimation ($-0.73 \leq P_{bias} \leq 10.52$) of the model concerning the measured drainage data. The PP with porous wear layer showed better adjustments concerning the applied metrics ($-0.83 \leq P_{bias} \leq 5.02$). It was possible to observe that the coating is the PP layer that predominantly influences drainage. Therefore, despite the emphasis on sizing the base layer, more specific criteria need to be adopted for the choice of materials for the PP wear layer is necessary.

Keywords: *Urban Floods, Permeable Pavements, SuDS, Sustainable Drainage Systems, Hydrus-1D.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Estacionamento em pavimento permeável. | 25 |
| Figura 2: Componentes do pavimento permeável..... | 26 |
| Figura 3: Tipos de sistemas de pavimentos permeáveis: (a) Infiltração total; (b) Infiltração..... | 27 |
| Figura 4: Localização da área onde foram construídas e monitoradas as parcelas experimentais de pavimentos permeáveis. O Sistema de Referência de Coordenadas é o SIRGAS 2000 e a imagem de satélite do município de Pato Branco foi adquirida a partir do banco de dados da Esri..... | 34 |
| Figura 5: Chuva acumulada (mm) mensalmente no período de 1989 a 2019..... | 35 |
| Figura 6: Perfil transversal e dimensões dos sistemas de pavimentos permeáveis. . | 36 |
| Figura 7: Representação das camadas de PP sem infiltração de água no subleito. . | 37 |
| Figura 8: Bloco de concreto poroso (a) e bloco de concreto convencional (b)..... | 38 |
| Figura 9: Etapas de execução dos módulos: (a) teste de estanqueidade, (b) camada de armazenamento, (c) instalação das calhas. | 39 |
| Figura 10: Etapas de execução dos módulos: (d) manta geotêxtil, (e) camada de assentamento, (f) camada de revestimento. | 39 |
| Figura 11: Componentes do Sistema PP. | 40 |
| Figura 12: Revestimento bloco de concreto não-poroso (a) e bloco de concreto poroso (b)..... | 41 |
| Figura 13: Dreno de fundo instalado próximo a base da estrutura que delimita os pavimentos permeáveis. | 44 |
| Figura 14: Fluxograma com as etapas referentes a simulação direta e simulação inversa..... | 47 |
| Figura 15: Simulações referentes ao evento do dia 06/10/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 58 |
| Figura 16: Simulações referentes ao evento do dia 20/10/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 59 |
| Figura 17: Simulações referentes ao evento do dia 29/10/2022 e 18/01/2023, revestimento convencional (RC) (1a e 2a) e revestimento poroso (RP) (1b e 2b), respectivamente..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 18: Simulações referentes ao evento do dia 19/01/2023, 14/02/2023 e 22/01/2023, revestimento convencional (RC) (1a, 1b e 1c) e revestimento poroso (RP) (2b, 2b e 2b), respectivamente..... | 61 |
| Figura 19: Simulações referentes ao evento do dia 13/11/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 62 |
| Figura 20: Simulações referentes ao evento do dia 01/12/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 63 |
| Figura 21: Simulações referentes ao evento do dia 19/12/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 63 |
| Figura 22: Simulações referentes ao evento do dia 02/02/2023, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 64 |
| Figura 23: Simulações referentes ao evento do dia 03/02/2023, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente. | 64 |
| Figura 24: Distribuição estatística dos parâmetros otimizados para o PP com revestimento convencional: (a) umidade residual, (b) umidade saturada, (c) relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar (d) relacionado à distribuição do tamanho dos poros e (e) condutividade hidráulica saturada. | 68 |
| Figura 25: Distribuição estatística dos parâmetros otimizados para o PP com revestimento poroso: (a) umidade residual, (b) umidade saturada, (c) relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar (d) relacionado à distribuição do tamanho dos poros e (e) condutividade hidráulica saturada..... | 69 |
| Figura 26: Relação do eventos de chuvas com a drenagem acumulada nos sistemas de pavimentos permeáveis, referente ao tipo de revestimento poroso e convencional, respectivamente (Eventos de chuva 1-6). | 72 |
| Figura 27: Relação do eventos de chuvas com a drenagem acumulada nos sistemas de pavimentos permeáveis, referente ao tipo de revestimento poroso e convencional, respectivamente (Eventos de chuva 7-12). | 73 |
| Figura 28: Curva Granulométrica da camada de assentamento (Pedrisco). | 84 |
| Figura 29: Comparação entre a Curva granulométrica do material de assentamento e limites aceitáveis da ABNT NBR 16416/2015. | 85 |
| Figura 30: Curva Granulométrica da camada de armazenamento (Brita). | 88 |

Figura 31: Comparação entre a Curva granulométrica do material de armazenamento e limites aceitáveis da ABNT NBR 16416/2015.89

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Valores dos parâmetros adotados nos estudos. | 31 |
| Tabela 2: Valores dos parâmetros adotados nos estudos (continuação)..... | 32 |
| Tabela 3: Caracterização do material de assentamento | 41 |
| Tabela 4: Caracterização do material de armazenamento | 42 |
| Tabela 5: Valores dos parâmetros hidráulicos das diferentes camadas utilizados para a simulação direta. | 53 |
| Tabela 6: Característica dos Eventos de Chuva | 55 |
| Tabela 7: Valores de K_s , α e n para os eventos de chuva 8 e 9 que apresentaram AMC III. | 56 |
| Tabela 8: Valor das métricas usadas para avaliar o desempenho das simulações numéricas (MAE, RMSE , R^2 , NSE e Pbias), usando exclusivamente, parâmetros otimizados, para cada evento de chuva. Os eventos estão apresentados conforme a data de ocorrência para o PP com revestimento convencional..... | 65 |
| Tabela 9: Valor das métricas usadas para avaliar o desempenho das simulações numéricas (MAE, RMSE , R^2 , NSE e Pbias), usando exclusivamente, parâmetros otimizados, para cada evento de chuva. Os eventos estão apresentados conforme a data de ocorrência para o PP com revestimento poroso..... | 66 |
| Tabela 10: Composição granulométrica do material de assentamento..... | 83 |
| Tabela 11: Distribuição recomendada para o material de assentamento..... | 84 |
| Tabela 12: Massa específica aparente do material de assentamento (Pedrisco). | 85 |
| Tabela 13: Massa unitária do material de assentamento (Pedrisco)..... | 86 |
| Tabela 14: Índice de volume de vazios do material de assentamento (Pedrisco). | 86 |
| Tabela 15: Composição granulométrica do material de armazenamento. | 87 |
| Tabela 16: Distribuição granulométrica recomendada para o material de armazenamento. | 88 |
| Tabela 17: Massa específica aparente do material de armazenamento | 89 |
| Tabela 18: Massa Unitária do material da camada de armazenamento (Brita)..... | 90 |
| Tabela 19: Índice de volume de vazios do material da camada de armazenamento (Brita). | 90 |

| | |
|---|----|
| Tabela 20: Resultados dos ensaios dos materiais das camadas de assentamento (pedrisco) e armazenamento (brita). | 90 |
| Tabela 21: Evento de chuva do dia 06 de outubro de 2022. | 91 |
| Tabela 22: Evento de chuva do dia 20 de outubro de 2022. | 92 |
| Tabela 23: Evento de chuva do dia 29 de outubro de 2022. | 92 |
| Tabela 24: Evento de chuva do dia 13 de novembro de 2022. | 93 |
| Tabela 25: Evento de chuva do dia 01 de dezembro de 2022. | 93 |
| Tabela 26: Evento de chuva do dia 19 de dezembro de 2022. | 94 |
| Tabela 27: Evento de chuva do dia 18 de janeiro de 2023. | 94 |
| Tabela 28: Evento de chuva do dia 19 de janeiro de 2023. | 94 |
| Tabela 29: Evento de chuva do dia 22 de janeiro de 2023. | 95 |
| Tabela 30: Evento de chuva do dia 02 de fevereiro de 2023. | 95 |
| Tabela 31: Evento de chuva do dia 03 de fevereiro de 2023. | 95 |
| Tabela 32: Evento de chuva do dia 14 de fevereiro de 2023. | 96 |
| Tabela 33: Valores otimizados dos parâmetros hidráulicos dos materiais para as camadas de revestimento, assentamento e armazenamento do PP com revestimento convencional (RC). | 97 |
| Tabela 34: Valores otimizados dos parâmetros hidráulicos dos materiais para as camadas de revestimento, assentamento e armazenamento do PP com revestimento poroso (RP). | 98 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMC - Antecedent Moisture Condition
BMP Best Management Practices
CBR California Bearing Ratio
CIRIA Construction Industry Research and Information Association
CSO: Combined Sewer Overflow
PP: Pavimentos Permeáveis
LID: Low-Impact Development
SuDS: Sustainable Urban Drainage System
SWUD: Water Sensitive Urban Design
LIUDD: Low Impact Urban Design and Development
BMPs: Best Management Practices
LVd – Latossolo Vermelho distrófico;
LVa - Latossolo Vermelho háplico;
LVe - Latossolo Vermelho eutrófico;
NVd – Nitossolo Vermelho distrófico;
NVe - Nitossolo Vermelho eutrófico;
RLe – Neossolo Litólico eutrófico;
RU – Neossolo flúvico;
CXe – Cambissolo eutrófico;
CXd - Cambissolo distrófico
DER Departamento de Estradas e Rodagem
DNER Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
EPA Environmental Protection Agency's
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PCP Pavimento de Concreto Poroso

PICP Intertravado de Concreto Permeável

IBPG Pavimento de Blocos Intertravados com Cascalho

Cbf Clima temperado, com verão ameno

D Drenagem

Q Escoamento superficial

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_b Absorção de água em cada amostra
- m Massa da amostra seca
- m_1 Massa da amostra saturada
- d Massa específica do agregado seco
- m_a Massa em água da amostra
- ρ_{ap} Massa unitária do agregado
- m_{ar} Massa do recipiente mais o agregado
- m_r Massa do recipiente vazio
- V Volume do recipiente
- E_V Índice de volume de vazios nos agregados
- $K(\theta)$ Condutividade hidráulica em função do teor de umidade
- h Potencial mátrico ou carga de pressão ou sucção
- z Componente vertical que representa profundidade do solo
- x Componente horizontal do escoamento
- θ_s Teor de umidade saturada
- θ_r Teor de umidade residual
- α Parâmetro (empírico) relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar
- n Parâmetro (empírico) relacionado à distribuição do tamanho dos poros
- K_s Condutividade hidráulica saturada
- S_e Saturação efetiva
- l Coeficiente de tortuosidade do meio poroso
- $\Phi(b,g,p)$ Função objetivo
- m_g Número de diferentes conjuntos de medida
- n_{gj} Número de medidas em um conjunto específico
- $g_j * (x, t_i)$ Medidas específicas no termo t_i para a j -ésima medida no local x

$g_j(x, t_i, b)$ Previsões do modelo correspondentes para o vetor de parâmetros otimizados

V_j e $w_{i,j}$ Pesos associados a um determinado conjunto ou ponto de medição

N Número de dados medidos

D_{SIMi} Drenagem simulada pelo modelo em cada intervalo de tempo

D_{OBSi} Drenagem medida em campo em cada intervalo de tempo

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | OBJETIVOS | 19 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 19 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 19 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 3.1 | CRESCIMENTO POPULACIONAL URBANO | 20 |
| 3.2 | INUNDAÇÕES E DRENAGEM URBANA | 21 |
| 3.3 | SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEIS..... | 22 |
| 3.4 | PAVIMENTOS PERMEÁVEIS | 24 |
| 3.5 | MODELAGEM NÚMERICA EM PAVIMENTOS PERMEÁVEIS..... | 28 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 34 |
| 4.1 | LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 34 |
| 4.2 | DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS DE PP | 36 |
| 4.3 | CONSTRUÇÃO DOS MÓDULOS DE PAVIMENTO PERMEÁVEL..... | 37 |
| 4.3.1 | Camada de Revestimento | 40 |
| 4.3.2 | Camada de Assentamento | 41 |
| 4.3.3 | Camada de Armazenamento | 42 |
| 4.3.4 | Dreno de Fundo | 43 |
| 4.4 | MONITORAMENTO HIDROLÓGICO | 44 |
| 4.5 | MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL | 45 |
| 4.5.1 | Estimativa de solução inversa | 46 |
| 4.5.2 | Calibração | 48 |
| 4.6 | DOMÍNIO NUMÉRICO E CONDIÇÕES DE CONTORNO..... | 49 |
| 4.7 | MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO..... | 50 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 53 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO | 53 |
| 5.1.1 | Características dos eventos de chuva..... | 54 |
| 5.1.2 | Calibração do modelo | 57 |
| 5.1.3 | Influência do tipo de revestimento na drenagem no PP | 70 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 74 |
| | REFERÊNCIAS..... | 76 |
| | APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA CAMADA DE ASSENTAMENTO | 83 |
| | APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA CAMADA DE ARMAZENAMENTO..... | 87 |
| | Apêndice C – ALTURAS DE DRENAGEM OBSERVADAS EXPERIMENTALMENTE E SIMULADAS PELO HYDRUS-1D | 91 |
| | APÊNDICE D – Parâmetros HIDRÁULICOS OTIMIZADOS PARA O PP COM REVESTIMENTO CONVENCIONAL E POROSO | 97 |
| | ANEXO A – LAUDO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO BLOCO POROSO..... | 99 |
| | ANEXO B – LAUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DO BLOCO..... | 103 |
| | ANEXO C – LAUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO DO BLOCO..... | 106 |
| | POROSO..... | 106 |

1 INTRODUÇÃO

A falta de planejamento, aliada à urbanização descontrolada, resulta em altos índices de impermeabilização do solo e, conseqüentemente, na falta de espaços urbanos, como parques e jardins, que possibilitam a infiltração de água e de recarga subterrânea desses locais (PINTO, 2011).

Nas últimas décadas, com a rápida expansão da urbanização, essas áreas tem experimentado um aumento de superfícies impermeáveis, como telhados, estradas e outras superfícies pavimentadas (TURCO et al., 2017). Essa expansão da urbanização, reduz a drenagem natural do solo e aumenta o volume de escoamento superficial (FINKENBINE; ATWATER; MAVINIC, 2000).

Além disso, com as mudanças climáticas (mudanças de temperatura do ar e precipitação) o aumento da frequência e/ou magnitude das inundações podem ocorrer em escala global (ARNELL; GOSLING, 2016).

A maior ocorrência de inundações são registradas nas grandes cidades devido aos maiores índices de impermeabilização e ocupação do solo (MARINHO, 2018). Em 2021, 56,61% da população mundial vivia em centros urbanos, e as projeções indicam que esse número será de 68% até 2050 (ONU, 2018).

As redes de drenagem urbana convencionais não conseguem atender a demanda devido à expansão das áreas construídas, que são espacialmente desordenadas, principalmente nas grandes áreas metropolitanas (MARINHO, 2018). Bem como, as sobrecargas geradas nesses sistemas são ocasionadas, sobretudo, por eventos de precipitação de curta duração e alta intensidade (YU et al., 2018).

As inundações também se tornam mais comuns em decorrência da ineficiência e escassez dos atuais sistemas de drenagem urbana, causando sérios problemas, além de prejuízos sociais, ambientais, patrimoniais e econômicos (TUCCI, 2008). Estima-se que o número de mortes humanas e danos materiais aumente como resultado das inundações urbanas e do aquecimento global (DOTTORI et al., 2018).

Algumas alternativas vêm sendo estudadas e implementadas com o objetivo de evitar a sobrecarrega desses sistemas tradicionais em uso, a aplicação dos Sistemas Sustentáveis de Drenagem (*Sustainable Drainage Systems, SuDS*). Essa abordagem tem como objetivo restaurar o ciclo hidrológico natural das bacias urbanas, aumentando sua evapotranspiração e capacidade de infiltração (BRUNETTI; ŠIMÚNEK; PIRO, 2016). Telhados verdes, trincheiras de infiltração, Pavimentos

Permeáveis (PP) e biorretenção são alguns exemplos de práticas SuDS (BALLARD WOODS et al., 2015).

Os PP são projetados para promover maior infiltração de água não só, buscando alcançar condições hidrológicas semelhantes à pré-urbanização (Woods-Ballard et al., 2015) como contribuir para a remoção de poluentes (Huang et al., 2016; Jiang et al., 2015). Estes pavimentos podem ser constituídos por quatro camadas, desde a superfície até à base: revestimento, assentamento, armazenamento e sub-base, podendo ser inserido um dreno de fundo entre a camada de armazenamento e a sub-base.

No entanto, apesar dos resultados satisfatórios dos estudos citados, a falta de ferramentas apropriadas de modelagem representa um obstáculo na concepção e construção desses sistemas. Além disso, a maior parte dos modelos numéricos utilizados em PP não descrevem de forma completa os processos físicos envolvidos no seu funcionamento (TURCO et al., 2017).

O software Hydrus-1D e Hydrus (2D/3D) são modelos de elementos finitos que simulam o movimento unidimensional, bidimensional, ou tridimensional de água, calor, e múltiplos solutos em ambientes com saturação variável (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN; ŠEJNA, 2016). A equação de Richards (RICHARDS, 1931), implementada no software, é utilizada com o objetivo de simular o escoamento na zona não saturada do solo ou dos materiais em estudo. Os estudos sobre a modelagem de escoamento não saturado de água, em regime transiente, através do PP tiveram início na última década (COUTINHO et al., 2016; BRUNETTI et al., 2016; TURCO et al., 2017).

Este estudo evidencia a simulação do escoamento não saturado de água através das camadas PP, usando o *software* Hydrus-1D, sendo possível aprimorar o dimensionamento de pavimentos permeáveis e também podendo ser acoplado a modelos de gestão de águas pluviais, como por exemplo o EPA SWMM, para melhorar as simulações dos processos hidrológicos em PP.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIO GERAL

O principal objetivo é calibrar inversamente um modelo numérico de escoamento de água em meio não saturado, em regime transiente, para pavimentos permeáveis com presença de dreno de fundo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Conforme o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão apresentados:

- Construir o módulo de PP no *Campus* da UTFPR em Pato Branco;
- Otimizar os parâmetros hidráulicos das camadas dos pavimentos permeáveis.
- Avaliar a funcionalidade e eficiência da modelagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CRESCIMENTO POPULACIONAL URBANO

O processo de urbanização é um fenômeno em progresso. No ano de 1800, apenas 1% da população vivia em centros urbanos (TUCCI; BERTONI, 2003). Com os efeitos da revolução industrial, a partir do século XVIII, a urbanização teve um grande crescimento ao redor do mundo, em ritmo cada vez mais acelerado (TUCCI; BERTONI, 2003). A estimativa é que até 2050 cerca de 68% da população mundial passe a viver em áreas urbanas (ONU, 2018).

As mudanças climática e a urbanização, alteram o ciclo hidrológico natural, resultando em mudanças nos padrões de chuva, e modificando os padrões de uso da terra e consumo de água, respectivamente (ASTARAIE-IMANI et al., 2012). Como resultado de chuvas de curta duração e alta intensidade, e um aumento da taxa de impermeabilização dos solos, os efeitos combinados dos dois processos influenciam de maneira considerável na velocidade e no volume do escoamento superficial nos centros urbanos (ZHOU, 2014).

De acordo com a literatura, a urbanização simulada e o cenários de mudanças climáticas para 2100 preveem um aumento de 20% na impermeabilização das superfícies urbanas e na intensidade das chuvas (SALERNO; VIVIANO; TARTARI, 2018). Os resultados mostram que superfícies urbanas impermeáveis e intensidade de chuva influenciam significativamente no transbordamento de esgoto combinado (CSO) e, conseqüentemente, na qualidade da água do corpo receptor. Reduzir as áreas impermeáveis, em apenas 15%, aponta melhoras significativas na qualidade da água (SALERNO; VIVIANO; TARTARI, 2018).

Miller et al. (2014) analisaram as mudanças no escoamento superficial em duas bacias hidrográficas na cidade britânica de Swindon. Essas bacias passaram por alterações na paisagem, foram de áreas rurais para áreas urbanas. Uma bacia tornou-se densamente povoada, enquanto a outra era uma área periurbana recentemente desenvolvida com sistemas de drenagem de águas pluviais. Os resultados para a bacia periurbana mostraram um aumento na cobertura do solo impermeável de 11% na década de 1960 para 44% na década de 2010, reduzindo a característica de duração da inundação em mais de 50% e aumentando o pico de fluxo em mais de

400%. Com a inserção de sistemas de drenagem sustentáveis, foi observado a redução do volume de escoamento superficial em mais de 50%.

3.2 INUNDAÇÕES E DRENAGEM URBANA

As inundações urbanas são tão antigas quanto as cidades ou qualquer aglomeramento urbano (TUCCI; BERTONI, 2003). Elas ocorrem quando a água de rios, córregos e bueiros deixa o leito de drenagem por falta de capacidade de transporte em um desses sistemas e inunda áreas onde as pessoas vivem, transitam (ruas, rodovias e passeios), os comércios e indústrias, entre outras coisas (TUCCI; BERTONI, 2003).

Com o processo de urbanização das últimas décadas, as inundações passaram a causar problemas à sociedade, como por exemplo, perdas financeiras, destruição da infraestrutura urbana (rede elétrica, rede de abastecimento de água e transporte) e mortes humanas (KOTZEE; REYERS, 2016). O dano total esperado está relacionado às propriedades físicas da inundação, ou seja, o nível da água acima do nível do solo, a extensão da inundação em termos de volume de água que escapa, ou que não entra no sistema de drenagem e a duração das inundações (SCHMITT; THOMAS; ETTRICH, 2004).

O aumento global na magnitude e frequência dos eventos de inundação levantam preocupações de que as abordagens tradicionais de gestão de inundações podem não ser suficientes para lidar com futuras incertezas (KOTZEE; REYERS, 2016). Os sistemas de drenagem convencionais são projetados para coletar e transportar o escoamento de água das áreas urbanas o mais rápido possível, através de redes de esgoto e estações de tratamento de água para corpos d'água receptores mais próximos (ZHOU, 2014).

Os impactos do uso e cobertura da terra, assim como os impactos da urbanização em relação as inundações foram investigadas para uma bacia hidrográfica do Rio Oshiwara em Mumbai, considerando 43 anos de dados. A análise mostrou um aumento de 43,55% na área construída e redução de 28,3% e 44% em espaços abertos e corpo d'água, respectivamente, entre 1966 e 2001. Já em um período de 8 anos, entre 2001 e 2009, o aumento foi de 31,29% de área construída e redução de 14,49% e 18% em espaços abertos e corpo d'água, respectivamente. A

análise de risco de inundação da área de estudo revelou que a área de extensão da zona de risco muito alto aumentou significativamente até 64% entre 1966 e 2009, enquanto a área de extensão da zona de risco baixo diminuiu para 32% (ZOPE; ELDHO; JOTHIPRAKASH, 2016).

Li e Bortolot (2022), classificaram imagens aéreas de sensoriamento remoto e, em seguida, quantificaram as mudanças na porcentagem de superfícies impermeáveis de captação entre 1950 e 2018, com uma precisão média de 92%, na cidade de Salt Lake, Utah, EUA. Foi notado que as áreas impermeáveis aumentaram até 32% sob os impactos induzidos pela reurbanização. O aumento das áreas impermeáveis resultou em um crescimento máximo de 575% e 753% no pico de inundação e volume, respectivamente, sob eventos de tempestade com períodos de retorno de 10 a 100 anos.

Segundo Borges de Souza (2013), no Brasil, os sistemas de drenagem urbana são planejados seguindo um padrão baseado apenas na eficiência hidráulica dos condutos, mesmo havendo conhecimento de que esse tipo de abordagem não resolve problemas a longo prazo. As incertezas nos parâmetros utilizados no projeto e modelagem desses sistemas de drenagem convencionais ainda são significativas, e os manuais utilizados desatualizados.

A urbanização das cidades provoca a impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração e o escoamento subterrâneo, sendo comum o aparecimento dos primeiros sinais de inundação poucos minutos após o início da precipitação (TEIXEIRA et al., 2020). Os problemas decorrentes dos impactos ambientais da urbanização tornam-se mínimos com tecnologias alternativas de drenagem e gestão adequada das águas pluviais, gerando benefícios e melhores condições para o trânsito de pessoas e veículos, favorecendo o meio ambiente, a saúde humana e a redução de custos de manutenção de estradas e infraestrutura, entre outras coisas (SOUZA; MORAES; BORJA, 2013).

3.3 SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEIS

As práticas de sistemas de desenvolvimentos sustentáveis (SuDS) surgem como uma proposta sustentável de drenagem urbana, a fim de almejar soluções para o manejo das águas pluviais (HAGHIGHATAFSHAR; YAMANEE-NOLIN; LARSON,

2019; ZHOU, 2014). Outros conceitos e práticas também têm sido utilizados para gerenciar águas pluviais urbanas e reduzir os impactos causados pelo uso do solo, como Best Management Practices (BMPs) e Low-Impact Development (LID) nos Estados Unidos, Sustainable Urban Drainage System (SuDS) no Reino Unido, Water Sensitive Urban Design (SWUD) na Austrália e Low Impact Urban Design and Development (LIUDD) na Nova Zelândia (FLETCHER et al., 2015).

Os Sistemas de Desenvolvimento Urbano Sustentável (SuDS) são uma rede de espaços abertos e áreas com vegetação (telhados verdes, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, etc.) usados para proteger os princípios e funções do ecossistema natural, ao mesmo tempo que proporcionam uma ampla gama de benefícios para as pessoas e a vida selvagem (TANG et al., 2021). São sistemas compostos por uma variedade de instalações que visam replicar os processos hidrológicos naturais do local, utilizando técnicas de infiltração, filtração, armazenamento, evaporação e retenção do escoamento superficial próximo à fonte geradora (BALLARD WOODS et al., 2015; SEO et al., 2017).

Lu et al. (2021), propôs um novo tanque tampão enterrado no solo para lidar com a água da chuva no local como controle de pico de fluxo para mitigação de inundações urbanas. Foi possível verificar que o tanque tampão atenua o pico de vazão maior em chuvas mais intensas em até 50%, captando o escoamento e descarregando a água retida através de um orifício no fundo do tanque.

Enquanto isso, o sistema de *Sponge City* vêm sendo muito utilizado na China e recentemente na Austrália, é considerado um mecanismo eficaz de gestão de águas pluviais e redução de enchentes, pois é capaz de promover infiltrações e reter as águas pluviais, funciona como uma esponja, absorvendo as gotas de chuva, captando água para reuso (Li et al., 2016; Li et al., 2020; Qi et al., 2021). Um cenário de alta capacidade de infiltração reduz significativamente o risco de inundação urbana em 80% no volume de escoamento durante um evento de chuva de 50 anos, porém pode custar o dobro de outras opções (LI et al., 2020).

Entender os efeitos hidrológicos nos estudos do SuDS é fundamental para estabelecer objetivos apropriados de mitigação de enchentes. Rodríguez-Rojas et al. (2018), analisaram o desempenho hidrológico de 3 tipos de pavimentos permeáveis, comparando a eficiência de pavimentos permeáveis com pavimentos convencionais. No geral, as eficiências são muito altas, gerando grande atenuação de vazão (acima

de 95%), com isso, desacelerando e retardando a vazão de água e produzindo uma grande redução nos volumes despejados e reduzindo significativamente o risco de inundações.

3.4 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

A pavimentação de estradas e outras superfícies impermeáveis associadas ao movimento de veículos, como calçadas e estacionamentos, representam até 70% dos terrenos impermeáveis urbanos, e todas essas fontes contribuem para o aumento da carga de drenagem do local (SURIPIN et al., 2018). Técnicas compensatórias de drenagem urbana (pavimentos permeáveis, valas de infiltração, telhados verde, etc.) podem restaurar uma condição quase natural de infiltração em bacias hidrográficas, reduzindo os impactos em áreas urbanas por meio da promoção de longo prazo da gestão das águas pluviais (BONNEAU et al., 2017; COUTINHO et al., 2020).

Os sistemas de pavimentos permeáveis podem ser utilizados em vários lugares distintos, como áreas externas de residências, comércios e algumas aplicações industriais, como calçadas ou áreas de acesso de veículos (Figura 1). Entretanto, a utilização dos pavimentos permeáveis estão confinados a serviços leves e de uso infrequente, mesmo que sua capacidade permita uma gama muito mais ampla de uso (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007).

A aceitação dos sistemas de pavimentos permeáveis, como um método de gerenciamento de águas de enchentes, é relativamente limitada e lenta devido à falta de conhecimento científico avançado e incertezas econômicas (KURUPPU; RAHMAN; RAHMAN, 2019). Acredita-se que o comportamento hidrodinâmico do PP durante eventos de chuva seja um processo complexo influenciado por vários fatores, como tipo de superfície, natureza do agregado, espessura da camada, intensidade da chuva e período seco antecedente (ALSUBIH et al., 2017; RODRIGUEZ-HERNANDEZ et al., 2016; KURUPPU; RAHMAN; RAHMAN, 2019).

Kumar et al. (2016), relatou desempenho medido da infiltração in situ de três seções de estacionamento permeáveis (pavimentações permeáveis, concreto permeável e asfalto permeável) de um estacionamento de funcionários durante um período de quatro anos. Notou-se uma diminuição nas taxas de infiltração após um ano de uso entre 2% a 15%, após isso os declínios aceleraram para todas as três superfícies, no quarto ano as taxas de infiltração apresentaram um decréscimo de

82% até 90% nas áreas de tráfego e 60% a 79% em relação ao primeiro ano observado.

Figura 1: Estacionamento em pavimento permeável.

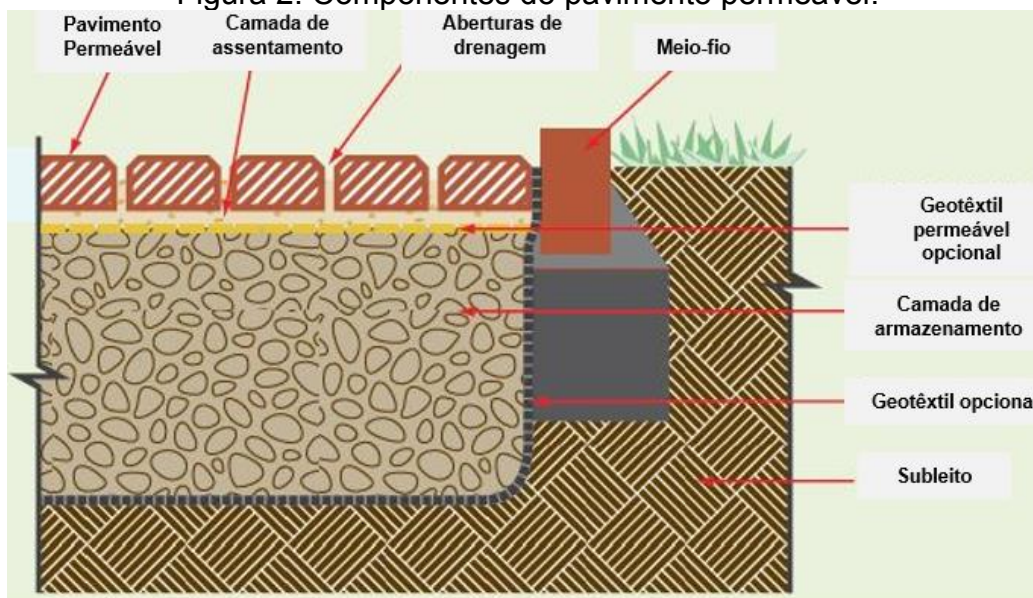


Fonte: KUMAR et al. (2016).

Apesar disso, muitas são as vantagens do uso dos pavimentos permeáveis. O sistema permite reduzir o volume de escoamento superficial, desde que utilizados de forma adequada, respeitando seus limites físicos de carga e realizando manutenções preventivas regularmente (GONÇALVES et al., 2014). Além disso, auxiliam no controle da poluição e na recarga das águas subterrâneas, os pavimentos permeáveis podem remover entre 80% a 96% do total de sólidos em suspensão das águas pluviais, principalmente por meio de sedimentação e interceptação (BROWN et al., 2009; HUANG et al., 2016).

A principal diferença entre os pavimentos permeáveis e os tradicionais é o seu sistema construtivo. De modo geral, os pavimentos permeáveis são sistemas em camadas que consistem, em uma camada de desgaste, geralmente de concreto, uma camada filtrante, composta por areia grossa ou cascalho fino, uma camada de base de agregado de cascalho e uma camada de sub-base de pedras britas, (Figura 2) (CMAA, 2010).

Figura 2: Componentes do pavimento permeável.

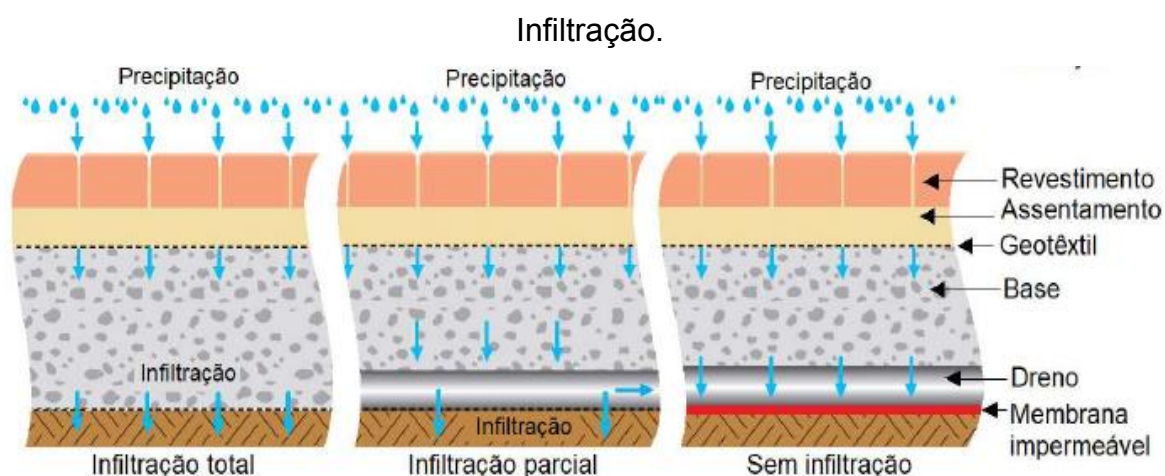


Fonte: CMAA adaptado, (2010).

O PP pode ser classificado com base no modo de infiltração da água após a passagem pela estrutura. Nesse sentido, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) considera três tipos na Norma Regulamentadora Brasileira (NBR) 16.416 (2015): infiltração total, infiltração parcial e o modelo que não permite infiltração no solo (Figura 3) (ABNT, 2015). Um sistema de drenagem é adicionado aos sistemas de infiltração parcial e não infiltração para remover a água da estrutura (INTERPAVE, 2018). A escolha do sistema de infiltração depende das características do solo ou de condicionantes do projeto (profundidade do lençol freático e utilização do espaço, por exemplo) WOODS-BALLARD et al., 2015).

Em termos de diferenciação dos PPs, para Ballard Woods et al. (2015), existem dois tipos de pavimentos permeáveis definidos pelo material de cobertura. Segundo os autores, os pavimentos porosos permitem que a água se infiltre em sua superfície, enquanto os pavimentos permeáveis são feitos de um material que não permite a infiltração, mas é acomodado para permitir espaços.

Figura 3: Tipos de sistemas de pavimentos permeáveis: (a) Infiltração total; (b)



O estudo de Alam et al. (2019), examinou o desempenho hidrológico e ambiental de três tipos de pavimentos permeáveis, Pavimento de Concreto Poroso (PCP), Intertravado de Concreto Permeável (PICP) e Pavimento de Blocos Intertravados com Cascalho (IBPG). Uma porcentagem notável de atenuação do fluxo de pico de aproximadamente 31% a 100% foi observada quando os pavimentos permeáveis foram construídos e implementados. O PCP obteve um resultado satisfatório na redução do escoamento superficial, 98% maior do que o pavimento tradicional, também demonstrou eficácia na remoção dos sólidos em suspensão em até 80%.

Apesar das vantagens do uso de PP e outros SuDS, a adoção de sistemas de drenagem sustentável em áreas urbanas ainda está em seus estágios iniciais (BRUNETTI et al., 2018). Um dos fatores que limitam seu uso é sua complexidade; assim, técnicas de modelagem são necessárias para explicar o funcionamento hidráulico do SuDS.

3.5 MODELAGEM NÚMERICA EM PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Mesmo com todos os benefícios dos SuDS, a adoção generalizada é bastante limitada. Um dos principais fatores limitantes é o acesso dos profissionais e a compreensão de ferramentas de modelagem confiáveis, pois a maioria deles carece de uma descrição abrangente dos processos hidrológicos envolvidos e frequentemente não inclui nenhuma técnica de otimização de parâmetros (TURCO et al., 2017). Esse problema é agravado pela complexidade dos vários processos físicos envolvidos, como por exemplo: infiltração, evapotranspiração, absorção de água pela raiz, transporte de solutos, transporte de calor, etc., o que exige um alto nível de especialização, bem como precisão de modelagem (BRUNETTI et al., 2018).

A modelagem numérica em relação aos sistemas de pavimentos permeáveis permite a simulação do desempenho de pavimentos permeáveis, proporcionando ao usuário uma melhor compreensão das respostas hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água o que proporciona melhorias em seu projeto, operação e manutenção (KURUPPU; RAHMAN; RAHMAN, 2019). Além disso, eles permitem a avaliação de cenários hipotéticos com baixo custo dos testes físicos (KIPKIE; JAMES, 2000; NUERNBERG, 2021).

Na literatura também são encontrados outros trabalhos que versam sobre o funcionamento e benefícios hidrológicos de PP (COUTINHO et al., 2016; MARINHO et al., 2020). Exemplificando, Ribas et al. (2021), avaliaram a capacidade de infiltração de um pavimento permeável (PP) em escala real, por meio de modelagem analítica e numérica, baseando-se em experimentos de infiltração de água e modelagem relacionada para a caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento (condutividade hidráulica saturada, K_s , e sorptividade, S), os resultados mostraram que aplicação dos modelos proporcionou ajustes precisos de acordo com todos os critérios estatísticos utilizados no estudo.

Outro software utilizado por Zhang e Guo (2015), com o objetivo de testar a confiabilidade do módulo LID na simulação do desempenho da redução de escoamento superficial de PP é o EPA SWMM. O módulo LID do SWMM produziu resultados imprecisos, principalmente ao descrever os efeitos da infiltração na camada de armazenamento, e os autores sugeriram utilizar as sub-bacia do modelo básico SWMM para obter representações mais precisas de PP. Finalmente, eles

ênfatizam que os resultados da modelagem devem ser verificados com observações experimentais sempre que possível.

O software Hydrus-1D vem sendo utilizado para descrever o comportamento hidráulico do PP com resultados promissores (CARBONE; BRUNETTI; PIRO, 2014; BRUNETTI; ŠIMŮNEK; PIRO, 2016 e TURCO et al., 2017a). O *software* Hydrus é muito utilizado para simular o movimento unidimensional, bidimensional, ou tridimensional de água, calor, e múltiplos solutos em ambientes com saturação variável (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN; ŠEJNA, 2016).

Nesse sentido Turco et al. (2017), construíram um pavimento permeável em escala de laboratório e mediram experimentalmente as propriedades hidrodinâmicas dos materiais usados nas três camadas do sistema com a modelagem computacional Hydrus-2D. Além disso, os autores realizaram testes de laboratório para obter os parâmetros hidráulicos dos materiais (umidade residual, umidade saturada, α e n do revestimento, umidade residual e umidade saturada do assentamento) para calibração do modelo, também foram obtidos, através do método de Marquadt-Levenberg implementado no Hydrus-1D, a condutividade hidráulica saturada do revestimento e assentamento e os parâmetros α e n da camada de assentamento. Os resultados demonstraram que o uso de um modelo específico de solo, combinado com procedimentos experimentais e numéricos precisos, foi capaz de descrever com precisão o comportamento hidráulico de um sistema de materiais multicamadas que não são solos.

Holanda e Soares (2019), utilizaram software Hydrus-1D para estimar a capacidade de infiltração de água do solo em uma região central e representativa de Recife, Brasil, com dados de parâmetros de precipitação, insolação e granulometria do solo. Os resultados dessas simulações mostraram que 355,18 mm dos 385,02 mm que precipitaram conseguem infiltrar, indicando que o solo da região, majoritariamente arenoso, possui alta capacidade de infiltração. A partir disso, é possível estimar que se apenas 17% do solo no local estudado fosse impermeável, a água da chuva seria capaz de se infiltrar sem causar inundações, sendo que dos 228.000 m² considerados no estudo apenas 38.760 m² são de solo não pavimentado.

Em um estudo recente de Baek et al. (2020), os autores desenvolveram uma nova ferramenta de modelagem (SWMM-H) o modelo SWMM-H foi desenvolvido combinando o modelo SWMM com Hydrus-1D para simular com precisão os efeitos

do LID no movimento da água para melhorar simulações de processos hidrológicos, com a intenção de apurar a precisão das simulações de movimento de água em sistemas de telhado verde. A análise do cenário mostrou que o SWMM-H selecionou o tipo de solo franco-arenosa para controlar o escoamento enquanto o SWMM recomendou a areia. Isso significa que conhecer a condutividade hidráulica ou capacidade de infiltração do solo é fundamental, pois, dependendo das características físicas de cada tipo de solo, a infiltração da água da chuva assumirá diferentes formas e intensidades, afetando a capacidade do solo em favorecer a percolação da água para o lençol freático.

Portanto, os procedimentos experimentais e numéricos para obtenção dos parâmetros hidráulicos das camadas de PP são componentes metodológicos críticos para o sucesso da modelagem numérica de uma estrutura de multicamada.

Tabela 1: Valores dos parâmetros adotados nos estudos.

| Referência | Objetivo do Estudo | Parâmetros Escolhidos | Simbologia | Intervalos | Parâmetros mais Sensíveis |
|---|---|---|-----------------|-----------------------|--|
| Turco et al., (2017) | Propor técnicas e procedimentos sobre como interpretar o fluxo de água através do sistema construtivo usando o modelo HYDRUS. | Parâmetros empírico de ajuste | α | 0,27 - 3,37 | Parâmetros empírico de ajuste da curva de retenção Condutividade hidráulica saturada |
| | | da curva de retenção | n | 1,47 - 2,41 | |
| | | Condutividade hidráulica saturada | K_s | 1,56 - 96,70 | |
| | | Teor de umidade saturado | θ_s | 0,01 - 0,106 | |
| | | Teor de umidade residual | θ_r | 0,00 - 0,04 | |
| Brunetti et al., Šimůnek Piro (2016) | Investigar a adequação do modelo Hydrus-1D para descrever corretamente o comportamento hidráulico de um PP instalado na Universidade de Calábria. | Parâmetros empírico de ajuste | α | 0,002 - 0,3 | Teor de umidade saturada Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção Condutividade hidráulica saturada |
| | | da curva de retenção | n | 2,17 - 4,47 | |
| | | Condutividade hidráulica saturada | K_s | 3,87 - 96,7 | |
| | | Teor de umidade saturado | θ_s | 0,01 - 0,3 | |
| | | Teor de umidade residual | θ_r | 0,00 - 0,045 | |
| Coutinho et al., (2016) | Caracterização hidráulica de um PP e a avaliação de sua eficiência hidrológica do ponto de vista do processo de infiltração. | Coefficiente de tortuosidade do meio poroso | l | 0,5 | NR |
| | | Parâmetros de forma | η | 0,00 | |
| | | | n | 2,056 - 2,617 | |
| | | | m | 0,027 - 0,235 | |
| | | Condutividade hidráulica saturada | K_s | 0,016e-02 - 2,959e-02 | |
| | | Teor de umidade saturado | θ_s | 0,493 - 0,562 | |
| Teor de umidade residual | θ_r | 0,00 | | | |
| | Ponto de inflexão na curva de retenção | h_g | -65,59 - -141,9 | | |

Tabela 2: Valores dos parâmetros adotados nos estudos (continuação).

| Referência | Objetivo do Estudo | Parâmetros Escolhidos | Simbologia | Intervalos | Parâmetros mais Sensíveis |
|--|---|---|------------|--------------|--|
| Marinho et al., (2020) | Avaliar a capacidade de infiltração de um PP de blocos de concreto vazados no estacionamento da UFPE. | Parâmetros de | m | 0,10 – 0,18 | NR |
| | | forma | n | 2,23 – 2,43 | |
| | | Condutividade hidráulica saturada | K_s | 1,31 – 1,93 | |
| | | Parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica | η | 7,67 – 11,56 | |
| | | Parâmetro dependente do parâmetro de forma e dos | C_p | 1,98 – 2,26 | |
| parâmetros de forma da curva de condutividade hidráulica | | | | | |
| Ponto de inflexão na curva de retenção | h_g | -387,08 – -572,79 | | | |
| Sorvidade | S | 3,09 – 3,21 | | | |
| Carbone, Brunetti e Piro (2014) | Aplicação de modelagem em um PP na Universidade de Calábria utilizando Hydrus-1D. | Parâmetros empírico de ajuste | α | 0,02 | NR |
| | | da curva de retenção | n | 1,36 | |
| | | Condutividade hidráulica não saturada | K_s | 400 | |
| | | Teor de umidade saturada | θ_s | 0,45 | |
| | | Teor de umidade residual | θ_r | 0,00 - 0,39 | |
| | | Coeficiente de tortuosidade do meio poroso | l | 0,5 | |
| Coeficiente de taxa de primeira ordem | ω | 0,00009 | | | |
| Baek et al., (2020) | Desenvolvimento de uma ferramenta de modelagem (SWMM-H) acoplando os modelos de gestão de águas | Parâmetros empírico de ajuste | α | 0,01 - 0,138 | Parâmetros empírico de ajuste da curva de retenção |
| | | da curva de retenção | n | 1,05 - 0,35 | |
| | | Condutividade hidráulica saturada | K_s | 0,001 - 0,35 | |

| | | | | | |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------------------------------|
| | pluviais e Hydrus-1D para | Teor de umidade saturado | θ_s | 0,32 - 0,48 | Conductividade hidráulica saturada |
| | melhorar as simulações | Teor de umidade residual | θ_r | 0,05 - 0,15 | |
| Baek et al., | dos processos hidrológicos | Porosidade | \emptyset | 0,32 - 0,6 | |
| (2020) | | Capacidade de campo | θ_{FC} | 0,3 - 0,5 | |
| | | Ponto de murcha | θ_{WP} | 0,05 - 0,3 | |
| | | Parâmetro de percolação | K-slope | 30 - 55 | |
| | | Cabeça de sucção | ψ | 5,08 - 10,16 | |
| | | NR: Não Revelado | | | |

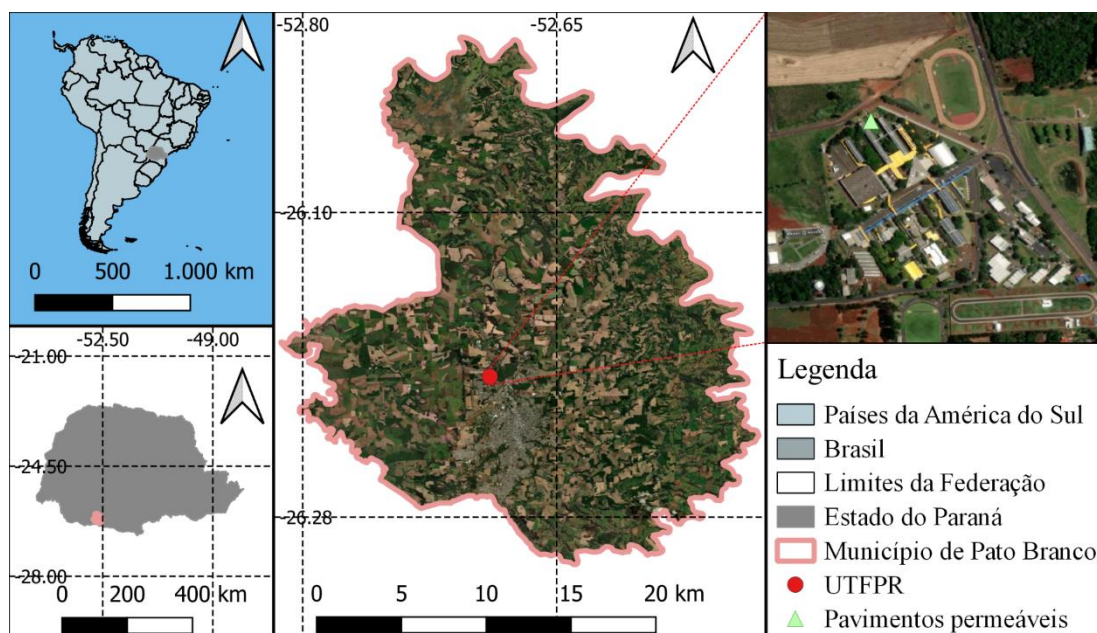
Fonte: Própria autoria (2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada nas parcelas experimentais de PP, dentro do *Campus* Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no município de Pato Branco. Pato Branco é um município brasileiro, localizado na região sudoeste do estado do Paraná, entre as coordenadas 26°13' 46" de latitude Sul e 52°40'14" de longitude Oeste (Figura 4). A área desse município corresponde a 539,087 km² e a população estimada em 2021 é de 84.779 (IBGE, 2021).

Figura 4: Localização da área onde foram construídas e monitoradas as parcelas experimentais de pavimentos permeáveis. O Sistema de Referência de Coordenadas é o SIRGAS 2000 e a imagem de satélite do município de Pato Branco foi adquirida a partir do banco de dados da Esri.



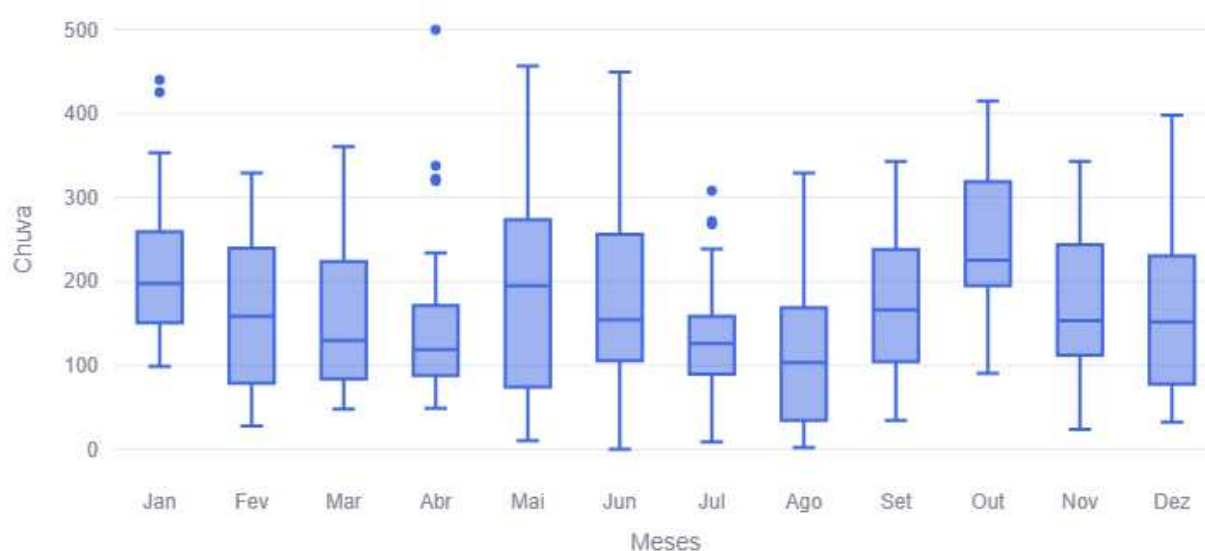
Fonte: Autoria Própria (2023).

Os tipos do solo encontrados no município de Pato Branco, segundo BALENA; BORTOLINI; TOMAZONI (2009), foram: LVd – Latossolo Vermelho distrófico; LVa - Latossolo Vermelho háplico; LVe - Latossolo Vermelho eutrófico; NVd – Nitossolo Vermelho distrófico; NVe - Nitossolo Vermelho eutrófico; RLe – Neossolo Litólico eutrófico; RU – Neossolo flúvico; CXe – Cambissolo eutrófico; CXd - Cambissolo

distrófico. Os tipos de solos predominantes são o NVd e o CXd, com 32,24% e 22,19% da área total, respectivamente.

De acordo com a classificação de Köppen, é o tipo Cfb, o clima característico do município apresenta chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano (ALVARES et al., 2013) variando entre 14°C e 22 °C, com velocidade média dos ventos de 10 km/h, principalmente nas direções Sudeste (23,05% do total) e Sul (21,60% do total) (TABALIPA; FIORI, 2008).

Figura 5: Chuva acumulada (mm) mensalmente no período de 1989 a 2019.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Os dados utilizados para o regime de precipitações (Figura 5), foram retirados na estação pluviométrica do Instituto Água e Terra (IAT) de Pato Branco. O mês de outubro e agosto apresentam a maior (225,05 mm) e menor (103,2 mm) altura média (mensal) de precipitação, respectivamente, enquanto que a precipitação média anual é de 1921,29 mm (1989-2019).

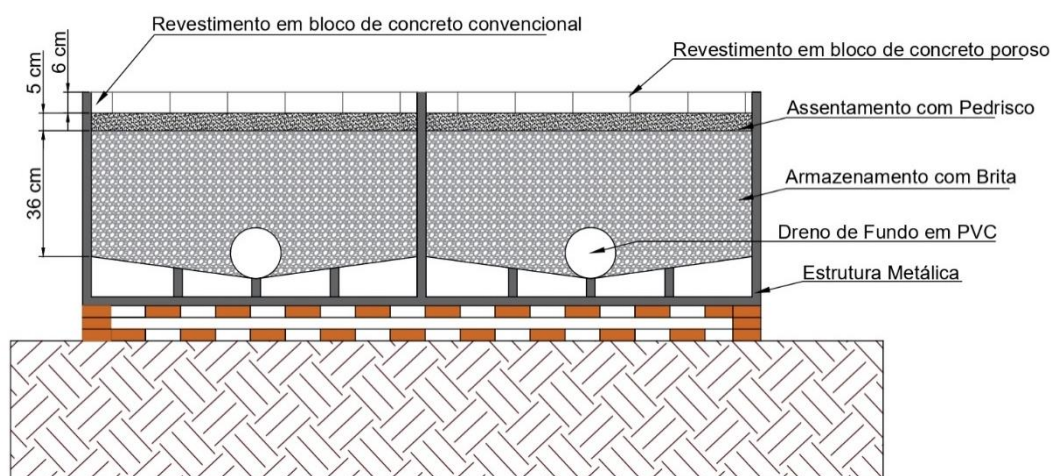
4.2 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS DE PP

O pavimento permeável foi dimensionado usando dois métodos, conforme a ABNT (2015): o dimensionamento hidrológico e o mecânico. O dimensionamento hidrológico associa uma chuva de projeto com um balanço hídrico, que por sua vez, determina a espessura máxima da camada de armazenamento capaz de drenar a água precipitada pela chuva (NUERNBERG, 2021; SILVEIRA e GOLDENFUM, 2007).

O dimensionamento dos módulos foi previamente realizado por Pazetti (2021); Nuernberg (2021) e Sangalli (2021). Assim, para dimensionamento hidrológico e mecânico do pavimento permeável foi adotado o maior valor descoberto para a altura da camada de armazenamento (PAZETTI, 2021; NUERNBERG, 2021; SANGALLI, 2021). Como o PP possui dreno de fundo, a infiltração não foi considerada no dimensionamento.

O dimensionamento mecânico foi feito seguindo o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (SOUZA, 1981), onde primeiramente, é calculado o índice de suporte, tanto dos materiais granulares constitutivos quanto do subleito, através do CBR (SANGALLI, 2021), também são considerados os dados de tráfego no local de implantação. Dessa maneira, foi possível calcular as dimensões das camadas referente ao Pavimento Permeável que foram utilizados nessa pesquisa (Figura 6).

Figura 6: Perfil transversal e dimensões dos sistemas de pavimentos permeáveis.

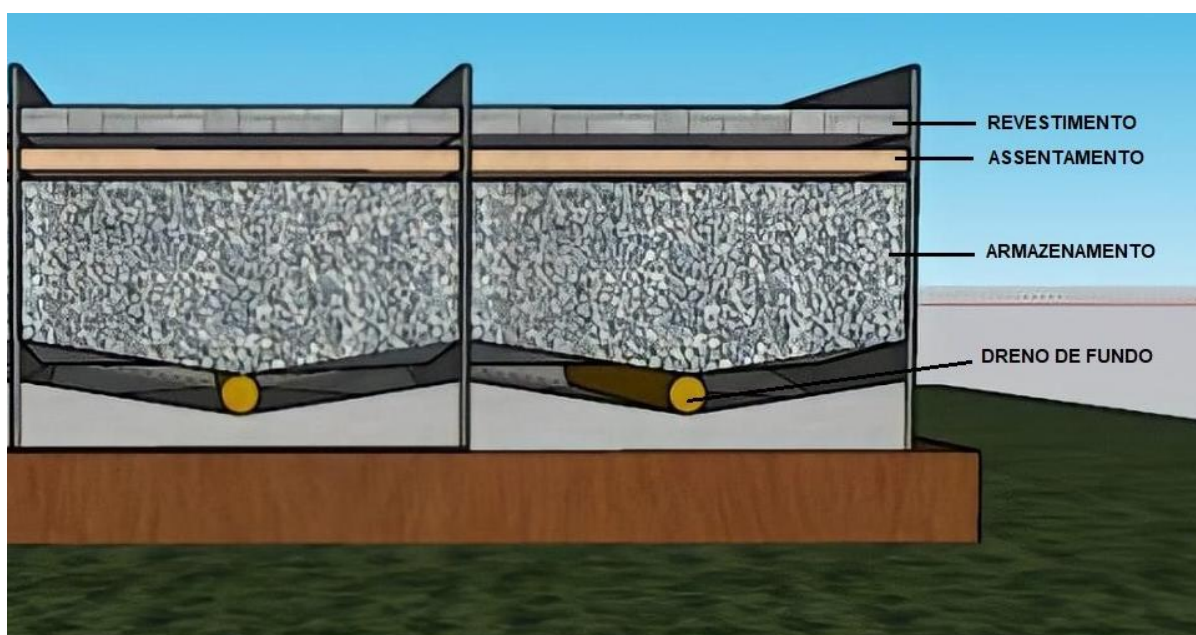


Fonte: Autoria Própria (2023).

4.3 CONSTRUÇÃO DOS MÓDULOS DE PAVIMENTO PERMEÁVEL

Os módulos de PP foram dimensionados de acordo com a NBR 16.416/2015 (ABNT, 2015), que estabelece os requisitos e procedimentos para o projeto de PP com revestimento de concreto. Assim, foram realizados os dimensionamentos hidrológico e mecânico, sendo adotado o dimensionamento que apresentou a maior espessura (ou altura) da camada de armazenamento (ABNT, 2015; BALLARD WOODS et al., 2015). Os PP foram construídos nas seguintes camadas do topo até a base: revestimento, assentamento, armazenamento e dreno de fundo (Figura 7).

Figura 7: Representação das camadas de PP sem infiltração de água no subleito.



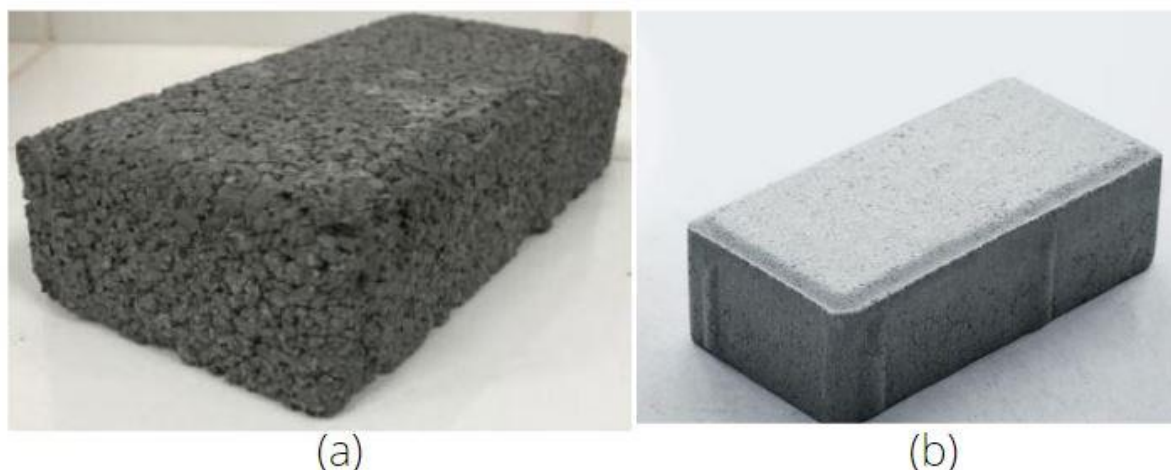
Fonte: Aatoria Própria (2022).

Foi adotado um sistema com drenos de fundo, junto à base do PP. Por esta razão, o sistema é classificado como sem infiltração de água na camada de subleito – Tipo C (ABNT, 2015).

Foram construídos dois módulos com as mesmas dimensões e mesmos materiais, exceto a camada de revestimento, sendo que um dos módulos apresenta o bloco de concreto poroso (a) e o outro é composto por bloco de concreto convencional (b), (Figura 8). Além disso, pavimento permeável foi projetado com o objetivo de permitir a infiltração e armazenamento temporário de água, com a intenção de evitar

que essa mesma água se acumule em pontos considerados críticos e com potencial de inundação.

Figura 8: Bloco de concreto poroso (a) e bloco de concreto convencional (b)



Fonte: Autoria Própria (2022).

Um teste de estanqueidade foi realizado para verificar se poderia ter algum tipo de vazamento (Figura 9a), as etapas posteriores se direcionaram para a colocação das camadas de armazenamento, composta por brita número 03 (Figura 9b), a colocação da manta geotêxtil, para impedir a eventual passagem do pedrisco (Figura 10d), a camada de assentamento, composta por pedrisco (Figura 10e), e por fim, os dois tipos de revestimentos utilizados, blocos de concreto convencional (Figura 10f) e poroso (Figura 10g).

Para coletar a água do possível escoamento superficial dos eventos de chuva no sistema de PP, foi instalada uma calha na borda superior dos módulos. Por esse motivo, ela foi fechada na parte de cima, para que não ocorresse influência direta das precipitações, somente a coleta de água que ficará acumulada no sistema de pavimentos permeáveis, nesse caso, na camada do revestimento (Figura 9c).

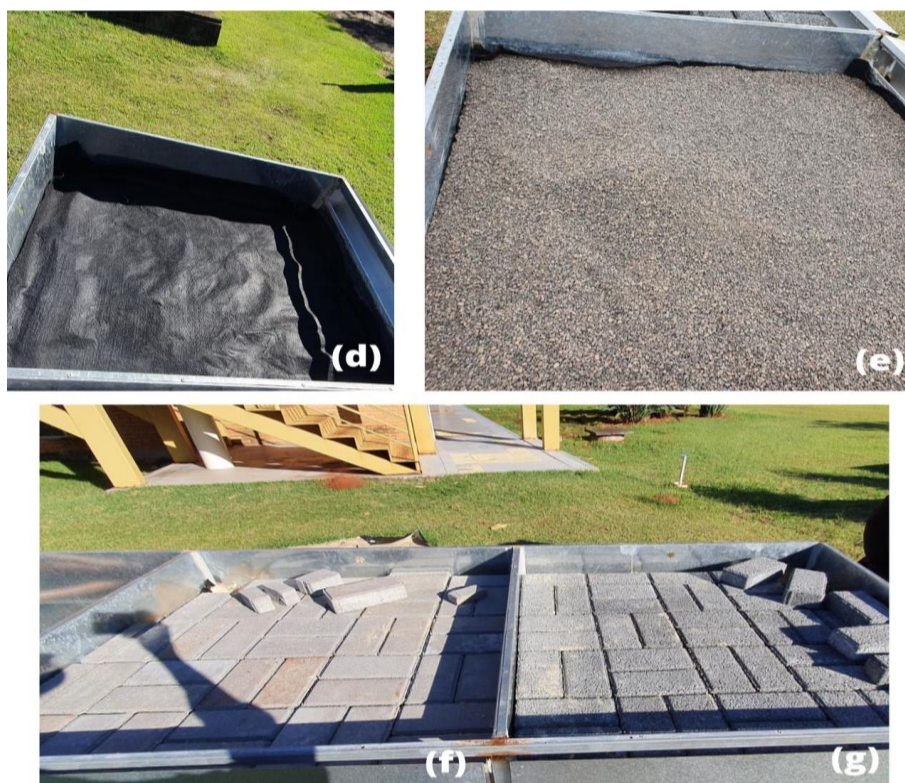
No local existem duas chapas metálicas de 0,97 m de largura por 2,91 m de comprimento, divididas em três módulos experimentais de 0,97 m de comprimento cada módulo, porém nessa pesquisa serão utilizados somente dois módulos com dois tipos de revestimentos diferentes, poroso e convencional.

Figura 9: Etapas de execução dos módulos: (a) teste de estanqueidade, (b) camada de armazenamento, (c) instalação das calhas.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 10: Etapas de execução dos módulos: (d) manta geotêxtil, (e) camada de assentamento, (f) camada de revestimento.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Para os reservatórios de armazenamento foram instalados tubos de PVC de 300 mm de diâmetro e 1,0 m de altura, com capacidade de armazenamento de 70 litros aproximadamente, para armazenar a água que infiltra no sistema de PP pelo dreno de fundo, e a água do escoamento superficial, água que não infiltra no sistema de PP (Figura 11).

O dreno de fundo está localizado na parte interior da camada de armazenamento (ou base) constituído por um tubo de PVC perfurado com 75 mm de diâmetro (Figura 11).

Figura 11: Componentes do Sistema PP.



Fonte: Autoria Própria (2022).

4.3.1 Camada de Revestimento

Os pavimentos permeáveis foram executados com as tipologias de revestimento permeáveis cuja percolação ocorre por peças de concreto permeável (b) e peças de concreto não permeável (a), onde a percolação da água ocorre entre as juntas do bloco (Figura 12).

Os blocos de concreto porosos (Figura 8a), utilizados como revestimento do PP, foram cedidos pela empresa Pavimenti Blocos e Pavers

(<http://www.pavimentiblocos.com.br/>) da cidade de Francisco Beltrão, Paraná. A condutividade hidráulica e a resistência à compressão dos blocos, foram obtidas de acordo com a NBR 16.416 (ABNT, 2015), por meio de relatório técnico emitido pelo laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e adquirido com a empresa Pavimenti Blocos e Pavers (Anexo B). A condutividade hidráulica e a resistência à compressão são iguais a $2,4 \times 10^{-2}$ m/s e 33,5 MPa, respectivamente.

Figura 12: Revestimento bloco de concreto não-poroso (a) e bloco de concreto poroso (b)



Fonte: Autoria Própria (2022).

4.3.2 Camada de Assentamento

O pedrisco foi utilizado como material de preenchimento da camada de assentamento do PP. A espessura da camada de assentamento foi definida de acordo com o manual da CIRIA (BALLARD WOODS et al., 2015), e a partir das recomendações da NBR 16.416/2015 (ABNT, 2015), sendo de 5 cm.

Tabela 3: Caracterização do material de assentamento

| Ensaio | Metodologia | Resultado |
|-----------------------------|-------------------------|---|
| Composição Granulométrica | NBR NM 248 (ABNT, 2003) | Módulo de Finura de 2,98 Dimensão máxima de 6,5 mm |
| Massa Específica | NBR NM 52 (ABNT, 2003) | 2,88 g/cm ³ |
| Massa Unitária | NBR NM 45 (ABNT, 2006) | 1557,1 kg/m ³ |
| Índice de volumes de vazios | NBR NM 45 (ABNT, 2006) | 44,29% |

Fonte: Autoria Própria (2022).

A composição granulométrica demonstrou que a areia possui módulo de finura de 2,98 e dimensão máxima de 6,5 mm. Quanto à curva granulométrica, observou-se que o material não cumpria os limítrofes indicados pela norma, com uma granulometria característica maior que a recomendada. Porém, consistiu no material que mais se aproximou do recomendado dentre os disponíveis na região do estudo.

O pedrisco apresentou uma massa específica aparente média de 2,881 g/cm³ e uma massa unitária de 1557,1 kg/m³. O índice de volume de vazios do material foi de 44,29%, que se encontra de acordo com o recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015) e Smith (2006) com valor mínimo de 32%.

4.3.3 Camada de Armazenamento

A espessura do armazenamento foi definida por meio do dimensionamento da estrutura do PP. Os materiais de preenchimento das camadas de armazenamento foram determinados a partir das recomendações da NBR 16.416/2015 (ABNT, 2015), chegando a uma altura de 36 cm.

Tabela 4: Caracterização do material de armazenamento

| Ensaio | Metodologia | Resultado |
|-----------------------------|-------------------------|--|
| Composição Granulométrica | NBR NM 248 (ABNT, 2003) | Módulo de Finura de 6,53 Dimensão máxima de 37,5 mm |
| Massa Específica | NBR NM 53 (ABNT, 2009) | 2,91 g/cm ³ |
| Massa Unitária | NBR NM 45 (ABNT, 2006) | 1665,98 kg/m ³ |
| Índice de volumes de vazios | NBR NM 45 (ABNT, 2006) | 42,38% |

Fonte: Autoria Própria (2022).

O ensaio de composição granulométrica indicou um material com módulo de finura de 6,53 e dimensão máxima de 37,5 mm. A brita analisada apresentou uma granulometria maior que os limítrofes recomendados pela norma, o que significa que o material é a favor do armazenamento de água. Aos demais ensaios, a brita 3 apresentou massa específica aparente média de 2,91 g/cm³ e uma massa unitária de 1665,98 kg/m³.

O índice de volume de vazios do material ensaiado foi de 42,38%, o qual está de acordo com o recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015), com porcentagem

mínima de 32%, indicando que o material possui boa capacidade em atuar como reservatório de água. O manual de SuDS do Reino Unido (WOODS-BALLARD *et al.*, 2015) é menos restritivo, recomendando uma porcentagem mínima de 30%.

4.3.4 Dreno de Fundo

O dreno é um conduto aberto (canal) ou fechado (tubo perfurado ou permeável), utilizado para coletar e conduzir, por gravidade, a água a ser drenada (ABNT, 2015). Para esse trabalho, foi adotado um sistema com drenos de fundo, junto à base do PP, abaixo da camada de armazenamento. Por isso, o sistema é classificado como sem infiltração de água na camada de subleito (ABNT, 2015).

O dreno de fundo foi instalado na parte interna e inferior dos módulos com tubos perfurados de PVC (Figura 13), com 75 mm de diâmetro, a qual segue para o reservatório de armazenamento da água que infiltra no PP. Por último, foi instalado uma tubulação para coletar e direcionar a água do escoamento superficial a seu respectivo reservatório.

Nesse sistema de infiltração, a água da precipitação fica armazenada temporariamente na estrutura do PP, posteriormente escoada pelo dreno até os reservatórios, Figura 13 (ABNT, 2015).

Figura 13: Dreno de fundo instalado próximo a base da estrutura que delimita os pavimentos permeáveis.



Fonte: Aatoria Própria (2022).

4.4 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

O monitoramento hidrológico foi medido para três variáveis, altura de chuva (P) (cm), o escoamento superficial do PP, Q (cm), e o escoamento drenado através do dreno de fundo (drenagem, D) (cm). A evaporação não foi monitorada devido à falta de equipamentos de medição.

O monitoramento dos eventos de chuva (P) foi realizado a partir da Estação Meteorológica do Parque Tecnológico de Pato Branco (EMPT) que realiza o monitoramento dos fenômenos climáticos e disponibiliza essas informações em tempo real. A EMPT está localizada à uma distância de 300 m em relação a área de estudo e os dados possuem resolução temporal de 10 minutos.

Os eventos de chuva foram classificados de acordo com Woods Ballard et al., (2015), ou seja, para serem considerados independentes devem ter uma altura de chuva superior a 0,25 cm e estar separados por pelo menos 6 horas sem ocorrência de chuvas.

Além disso, dois transdutores de pressão com 0,1% de precisão e resolução de 0,21 cm (modelo U20L-01 da marca Hobo) foram usados para medir a lâmina d' água nos reservatórios de escoamento superficial (Q) e dreno de fundo (D). Assim, os transdutores de pressão foram colocados dentro de reservatórios para medir essa lâmina d' água acumulada escoada superficialmente sobre o revestimento e através do dreno de fundo. Os dados de Q e D possuem resolução temporal de 10 minutos.

A instrumentação empregada para o monitoramento dos eventos de chuvas nos módulos de pavimento permeável é composta por um pluviômetro automático e transdutores de pressão utilizados para medir a lâmina de água nos reservatórios de água (drenagem (D) e escoamento superficial (Q)).

4.5 MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL

No modelo computacional, o PP será representado como um meio poroso de três camadas (revestimento, assentamento e armazenamento), retangular e unidimensional, ou seja, o escoamento da água foi considerado somente em uma direção vertical. As simulações do escoamento de água no PP foram feitas usando o software Hydrus-1D (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN; ŠEJNA, 2016). Assim, o escoamento em regime transiente, unidimensional e com saturação variada foi modelado usando a equação de Richards (RICHARDS, 1931), Equação 1:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

Onde, θ é o teor de umidade (cm^3/cm^3), $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica em função do teor de umidade ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), $\psi(\theta)$ é o potencial mátrico (ou carga de pressão) (cm) e z é a componente na direção vertical que representa profundidade da camada no plano cartesiano.

As propriedades hidráulicas dos materiais que compõem o PP são descritas matematicamente pelas equações analíticas de Van Genuchten-Mualem (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980).

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\psi(\theta)|)^n]^m}, & \text{se } \psi(\theta) < 0 \\ \theta_s, & \text{se } \psi(\theta) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

$$K(\theta) = \begin{cases} K_s \cdot S_e^l \left[\left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right) \right]^2, & \text{se } \psi(\theta) \leq 0 \\ K_s, & \text{se } \psi(\theta) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

Onde, θ_s e θ_r são o teor de umidade saturada (-) e residual (-), respectivamente, α é um parâmetro (empírico) relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar (*air-entry pressure*) (-), n é um parâmetro (empírico) relacionado à distribuição do tamanho dos poros (-), K_s é a condutividade hidráulica saturada (cm.h^{-1}), S_e é a saturação efetiva, l é o coeficiente de tortuosidade do meio poroso (-). Nesse trabalho foi adotado um coeficiente l igual a 0,50 (MUALEM, 1976).

Técnicas de elementos finitos lineares do tipo Galerkin são usadas para resolver numericamente as equações governantes de escoamento e transporte por aproximação da solução usando um conjunto finito de funções de base (BARTH, 1998). Uma abordagem de otimização de parâmetro do tipo Marquardt-Levenberg também está incluída no Hydrus-1D para estimativa inversa dos parâmetros hidráulicos do solo ou, nesse caso, do material usando dados de escoamento de estado estacionário ou transiente registrados. (ŠIMŮNEK; ŠEJNA; VAN GENUCHTEN, 2013). A ideia básica do método Galerkin é encontrar uma solução aproximada da equação diferencial parcial que minimize o erro residual em um espaço de funções de base.

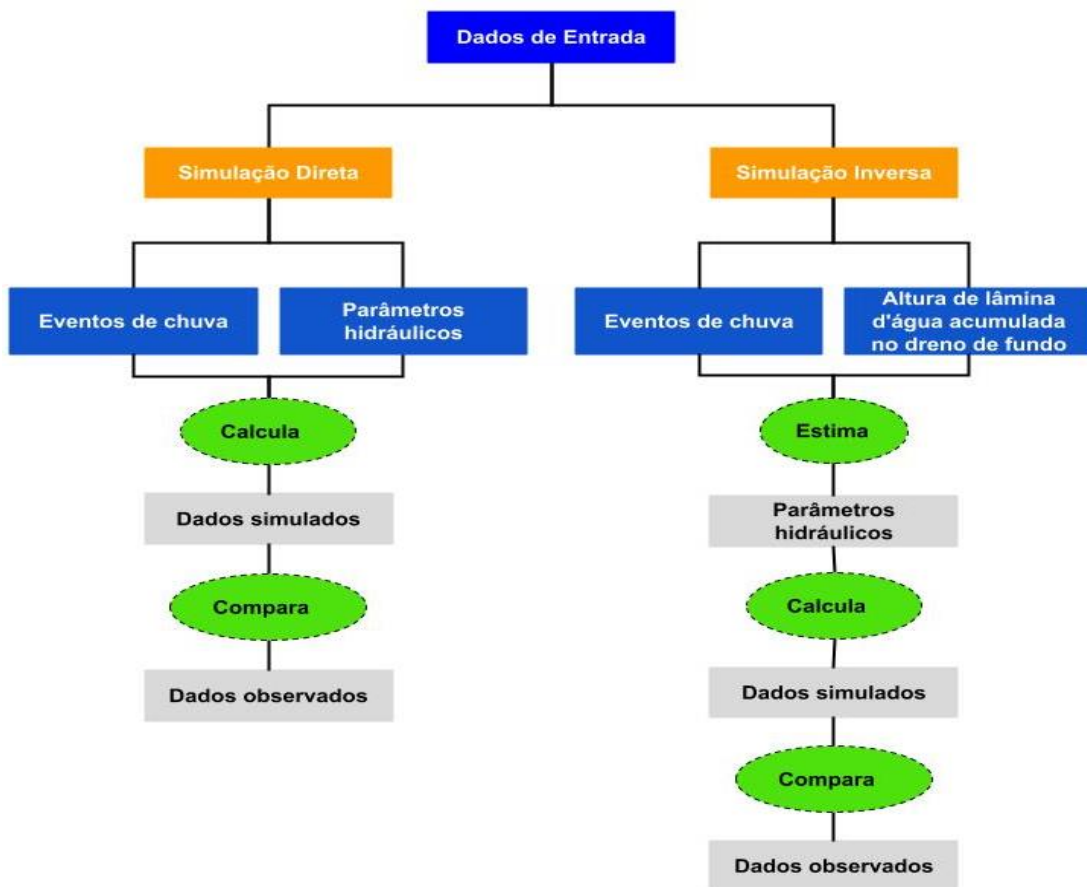
4.5.1 Estimativa de solução inversa

Brunetti; Šimůnek; Piro, (2016) utilizaram a modelagem numérica inversa e otimização utilizando o *software* Hydrus-1D para obter os parâmetros hidráulicos do material de todas as camadas dos dados de entrada e saída enquanto estudava o comportamento hidrológico de vários sistemas de pavimento permeável com dados experimentais.

A modelagem inversa é uma ferramenta que permite estimar parâmetros desconhecidos do modelo a partir de dados experimentais. Uma das principais razões

para aplicar a modelagem inversa é estimar parâmetros que não podem ser medidos diretamente por diferentes motivos. Com base nisso, é possível otimizar os parâmetros hidráulicos dos materiais das camadas do pavimento permeável (Figura 14).

Figura 14: Fluxograma com as etapas referentes a simulação direta e simulação inversa.



Fonte: Autoria Própria (2023).

O método de Marquardt-Levenberg (MARQUARDT, 1963) foi utilizado para modelagem inversa dos parâmetros desconhecidos, é um método de otimização não linear para estimar parâmetros. A função objetivo que será minimizada durante a estimativa de parâmetros e pode ser definida como (ŠIMUNEK *et al.*, 1998) (Equação 6):

$$\phi(b, g, p) = \sum_{j=1}^{m_g} V_j \sum_{i=1}^{n_{gj}} w_{i,j} [g_j^*(x, t_i) - g_j(x, t_i, b)]^2 +$$

$$\sum_{j=1}^{m_p} \bar{V}_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} W_{ij} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b)]^2 + \sum_{j=1}^{n_b} \hat{v}_j [b_j^* - b_j]^2 \quad (6)$$

O primeiro termo (lado direito) representa os desvios entre as variáveis (espaço-tempo) observadas e simuladas. No primeiro termo, m_g representa o número de diferentes conjuntos de medida, n_{gj} é o número de medições dentro de um conjunto específico de medida, $g_j^*(x, t_i)$ representa as medidas específicas no tempo t_i para a j -ésima medida na posição x (g_j é a medida de drenagem, da água que se infiltrou no pavimento e saiu através do dreno), $g_j^*(x, t_i, b)$ são as previsões do modelo correspondentes para o vetor de parâmetros otimizados, b , (nesse caso, as propriedades hidráulicas), V_j e $w_{i,j}$ são pesos associados a um determinado conjunto ou ponto de medição, respectivamente.

O segundo termo (lado direito) da equação (6) representa as diferenças entre as propriedades hidráulicas observadas e simuladas de forma independente nas diferentes camadas do PP. Nesse trabalho, $p_j * p$ representa o teor de umidade que será observado (ou medido) na camada de assentamento. O último termo representa uma função de penalidade para desvios entre o conhecimento prévio dos parâmetros hidráulicos, $b_j *$, e suas estimativas finais, b_j , sendo n_b o número de parâmetros com conhecimento prévio e \hat{v}_j os pesos pré-atribuídos.

Como os parâmetros hidráulicos dos materiais não foram medidos experimentalmente, os mesmos foram estimados em cada simulação realizado pelo Hydrus-1D, ou seja, para cada evento de chuva, intensidade e tipo de revestimento convencional e poroso existe um valor diferente para os parâmetros θ_s , θ_r , α , n e K_S .

4.5.2 Calibração

Carbone et al., (2014) usaram Hydrus-1D para modelar um pavimento permeável em escala experimental. O modelo Hydrus-1D foi calibrado com quatro diferentes eventos de chuva apresentando ótimos resultados. Entretanto, o pavimento

permeável foi modelado como uma única camada homogênea e as diferenças entre as propriedades hidráulicas de diferentes camadas foram desprezadas.

O monitoramento pluviométrico dos eventos de chuva foi realizado durante o período de 5 meses, resultando em 12 eventos de chuva totais. Os dados medidos de Q e D foram usados na função objetivo para otimizar os parâmetros. As medições subhorárias foram convertidas para a escala horária em todas as simulações.

A Equação 12 foi utilizada para corrigir um efeito de escala, na qual as alturas de lâmina d'água acumulada (Q e D) foram calculadas igualando o volume do reservatório (V_{res}) com o volume do perfil do PP (V_{pav}), com isso, a altura de lâmina d'água no pavimento varia de acordo com a altura de lâmina d'água no reservatório do dreno de fundo e do escoamento superficial.

$$\begin{aligned}
 V_{res} &= V_{pav} \\
 A_{res} * h_{res} &= A_{pav} * h_{pav} \\
 h_{pav} &= \left[\frac{\left(\frac{\pi * D_{res}^2}{4} \right) * h_{res}}{A_{pav}} \right] \\
 h_{pav} &= 0,077 * h_{res}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Onde:

h_{res} = altura de lâmina de água no reservatório;

h_{pav} = altura de lâmina de água no pavimento permeável;

A_{pav} = área do pavimento (0,9215 m²);

A_{res} = área do reservatório (0,071 m);

D_{res} = diâmetro do reservatório (300 mm).

4.6 DOMÍNIO NUMÉRICO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

O PP será representado um domínio de fluxo unidimensional vertical de altura igual a 47 cm e o comprimento horizontal de 100 cm. A manta geotêxtil que separa a camada de assentamento e de armazenamento não foi incluída no modelo, devido a

pequena espessura (= 1 mm), sua alta permeabilidade e, visto que, sua única função é evitar a migração de material fino de camada de assentamento para a camada de armazenamento.

Na superfície do PP será usada uma condição de contorno do tipo Atmosférica que permite representar a entrada de água através do revestimento do PP, por meio de um balanço hídrico entre a precipitação e a evaporação potencial. A condição de contorno Atmosférica está implementada no Hydrus-1D e usa uma abordagem desenvolvida por Neumann, (1974). A condição de contorno de segundo tipo (Neumann), fluxo nulo, foi usada as paredes laterais do domínio, que são impermeáveis. Na parte superior do domínio (junto à superfície do PP) foi estabelecida uma condição de segundo tipo, a qual pode ser alterada para uma condição de primeiro tipo, dependendo da camada de revestimento (e.g., se $\psi(\theta) \geq 0$).

Nesse estudo não será considerada a evaporação potencial devido à falta de equipamentos para se obter as variáveis climáticas. Na parte inferior do domínio (junto aos drenos na base da camada de armazenamento) foi estabelecida uma condição de contorno de terceiro tipo (Cauchy), chamada de *Seepage Face*. Esta condição de contorno é utilizada quando o fundo do perfil, nesse caso do PP, é exposto à atmosfera (drenagem por gravidade de uma coluna de solo finita). Enquanto a carga de pressão for negativa, a condição assume que o fluxo no contorno permanecerá zero. Quando o contorno inferior assumir valores de $\psi(\theta) \geq 0$ (saturação), o valor de $\psi(\theta) = 0$ é imposto e ocorre o fluxo através do contorno. (ŠIMŮNEK et al., 2013).

4.7 MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO

Critérios de desempenho de modelos são frequentemente utilizados durante a calibração e validação de modelos hidrológicos, com o objetivo de expressar em um único número a semelhança entre a variável observada e a simulada (GUPTA et al., 2009).

A avaliação do desempenho do modelo numérico foi feita por meio de um conjunto de métricas que comparam o escoamento de saída simulado com o escoamento de saída medido experimentalmente para calibração do modelo. Assim, o erro médio do modelo foi avaliado utilizando duas métricas, o Erro Médio Absoluto

(*Mean Absolute Error*, MAE) (Equação 7) e o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error*, RMSE) (Equação 8).

O Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error*, MAE) é uma métrica utilizada para avaliar o desempenho, ou seja, é a média da diferença absoluta entre os valores simulados pelo modelo e os valores medidos experimentalmente.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{SIMi} - Q_{OBSi}| \quad (7)$$

Onde N= número de dados medidos; Q_{OBSi} = escoamento medido; e Q_{SIMi} = escoamento simulado.

Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error*, RMSE) calcula em diferenças quadráticas a magnitude média do erro entre os valores observados e modelados, em que os maiores desvios contribuem mais.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_{SIMi} - D_{OBSi})^2} \quad (8)$$

Onde D_{SIMi} e D_{OBSi} são, respectivamente, a drenagem simulada pelo modelo e a drenagem medida experimentalmente.

O Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (*NSE*) foi utilizado para avaliar a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados medidos. Apresenta intervalos de $-\infty$ a 1, tendo como valor ótimo aqueles próximos a 1. Moriasi et al., (2007) classifica os resultados da seguinte forma: $NSE \geq 0,75$, desempenho do modelo muito bom; $0,75 > NSE \geq 0,65$, modelo bom; $0,65 > NSE \geq 0,50$, modelo satisfatório; e $0,50 > NSE$, modelo insatisfatório (Equação 9).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBSi} - Q_{SIMi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{OBSi} - \overline{Q_{OBSi}})^2} \quad (9)$$

Onde $\overline{Q_{OBSi}}$ é a média dos valores medidos experimentalmente.

O PBAIS (*Percent Bias*) avalia a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os observados. Quanto mais próximo de zero for o valor deste coeficiente melhor o modelo representará a realidade, valores positivos indicam

um viés do modelo para subestimação; e valores negativos indicam um viés de superestimação do modelo (Equação 10).

$$PBIAS = 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS} - Q_{SIM})}{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS})} \right] \quad (10)$$

O Coeficiente de determinação (*Correlation Coefficient*, R^2) calcula a razão a proporção da variância estatística total no conjunto de dados observados que pode ser explicada pelo modelo.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS} - \overline{Q_{OBS}})(Q_{OBS} - \overline{Q_{SIM}})}{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS} - \overline{Q_{OBS}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{SIM} - \overline{Q_{SIM}})^2} \right]^2 \quad (11)$$

Onde $\overline{Q_{SIM}}$ representa a média dos dados simulados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO

Para as simulações diretas no software Hydrus-1D foram utilizados os valores dos parâmetros, θ_s , θ_r , α , n , K_s e l retirados da literatura (Tabela 5) (Turco et al., 2017). Esses valores foram utilizados como ponto de partida para a otimização dos parâmetros e também para a modelagem direta, visto que, os materiais utilizados nesta modelagem são semelhantes aos materiais dos módulos experimentais dos PP, em relação a dimensão máxima característica e aos valores de porosidade, e também a configuração das três camadas (revestimento, assentamento e armazenamento) desta pesquisa.

Tabela 5: Valores dos parâmetros hidráulicos das diferentes camadas utilizados para a simulação direta.

| Parâmetros | Simbologia | Unidade | Camadas | | |
|--|------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|
| | | | Revestimento | Assentamento | Armazenamento |
| Teor de umidade residual | θ_r | $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ | 0,044 | 0,00 | 0,00 |
| Teor de umidade saturada | θ_s | $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ | 0,106 | 0,40 | 0,01 |
| Inverso da pressão de entrada de ar | α | cm^{-1} | 3,37 | 0,27 | 0,27 |
| Índice de distribuição do tamanho dos poros | n | - | 1,47 | 2,00 | 2,41 |
| Condutividade hidráulica saturada | K_s | cm min^{-1} | 1,56 | 69,27 | 96,70 |
| Coefficiente de tortuosidade dos meios porosos | l | - | 0,50 | 0,50 | 0,50 |

Fonte: Turco et al., (2017).

Para a camada de revestimento os autores utilizaram blocos de concreto porosos caracterizados por alta permeabilidade. Para a camada de assentamento foi utilizado a ASTM No. 8 que possui uma porosidade de cerca de 20% do volume. Para a camada de armazenamento foi utilizado brita nº 02, pois possui alta capacidade de armazenamento de água com uma porosidade de cerca de 40% (Quadro 1).

Quadro 1: Comparativo das propriedades dos materiais utilizados na literatura e utilizados na construção dos módulos de PP, referente a granulometria, porosidade e tipo de material utilizado.

| Referência | Revestimento poroso | Assentamento | Armazenamento |
|----------------------|--|---|---|
| Turco et al., (2017) | Blocos de concreto de alta permeabilidade | Mistura de areia e cascalho, ASTM N°. 8 | Brita nº 02 |
| | | Dimensão máxima característica: 9,53 mm | Dimensão máxima característica: 25 mm |
| | | Porosidade de 20% | Porosidade de 40% |
| Vartha, (2023) | Coef. Permeabilidade (k): $2,4 \times 10^{-2}$ m/s Resistência a compressão: 33,5 MPa | Pedrisco (granilha) | Brita nº 03 |
| | | Porosidade de 44% | Porosidade de 43% |
| | | Dimensão máxima característica: 6,5 mm | Dimensão máxima característica: 37,5 mm |

Fonte: Autoria Própria (2023).

5.1.1 Características dos eventos de chuva

De acordo com o *Manual of Surface Weather Observation Standards* (MANOBS) a classificação em relação a intensidade dos eventos de chuvas segue os seguintes critérios:

Leve: se a taxa de queda for de 2,5 mm/h ou menos;

Moderado: se a taxa de queda for de 2,6 a 7,5 mm/h;

Forte: se a taxa de queda for de 7,6 mm/h ou mais.

Com isso, percebe-se que os eventos de chuvas possuem diferentes intensidades, sendo a maioria deles de baixa intensidade. Dentre os eventos registrados apenas o 01/12/2023 (5) apresentou uma chuva classificada como forte, as demais apresentam uma taxa de baixa a média intensidade (Tabela 6).

A Condição de Umidade Antecedente (*Antecedent Moisture Conditions*, AMC) corresponde a quantidade de umidade no material no início de um evento de chuva, e é comumente expressa como um índice que corresponde à média das chuvas diárias para um período de tempo específico antes do evento de chuva considerado.

São classificados em 3 AMCs: AMC I (seco), AMC II (médio) e AMC III (úmido) (USDA, 2004).

Tabela 6: Característica dos Eventos de Chuva

| Identificador (ID) | Data (Dia/mês/ano/ hora:minuto) | Altura P (mm) | Duração (horas) | Intensidade média (\bar{i}) (mm.h ⁻¹) | Chuva | Condição de umidade Antecedente (AMC) |
|--------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------|--|--------------------------------|--|
| | | | | | acumulada em 5 dias (mm) | |
| 1 | 06/10/2022 01:24 | 58,5 | 14 | 4,18 | 2,40 | I |
| 2 | 19/10/2022 22:23 | 48,3 | 23 | 2,10 | 0,00 | I |
| 3 | 29/10/2022 05:21 | 66,6 | 12 | 5,55 | 0,00 | I |
| 4 | 12/11/2022 19:43 | 41,4 | 19 | 2,18 | 2,70 | I |
| 5 | 01/12/2022 15:43 | 39,3 | 5 | 7,86 | 0,90 | I |
| 6 | 19/12/2022 16:43 | 29,7 | 8 | 3,71 | 3,30 | I |
| 7 | 18/01/2023 15:41 | 25,8 | 7 | 3,69 | 36,30 | II |
| 8 | 19/01/2023 17:18 | 25,2 | 4 | 6,30 | 58,50 | III |
| 9 | 22/01/2023 07:51 | 11,7 | 5 | 2,34 | 60,60 | III |
| 10 | 02/02/2023 13:05 | 12 | 6 | 2,00 | 3,90 | I |
| 11 | 03/02/2023 15:00 | 21,9 | 9 | 2,43 | 15,90 | I |
| 12 | 14/02/2023 14:24 | 21,6 | 13 | 1,66 | 5,40 | I |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Esta condição de umidade antecedente pode influenciar os resultados da modelagem, pois, se o pavimento permeável estiver úmido devido a ocorrência de chuvas antecedentes ao evento registrado, os valores dos parâmetros também podem ser diferentes.

Com algumas limitações desta pesquisa, não foi possível medir a umidade nas camadas do PP experimentalmente. Porém, para os eventos de chuvas 8 e 9, que apresentaram AMC III, foram feitas simulações com valores de potencial mátrico próximos a zero (parcialmente saturado), a partir disso observou-se grande variação nos valores de K_s em relação a literatura de Turco et al., (2017) e também em relação as demais simulações onde PP foi considerado inicialmente seco (Tabela 7).

Tabela 7: Valores de K_s , α e n para os eventos de chuva 8 e 9 que apresentaram AMC III.

| Referência | Evento de chuva | Condutividade hidráulica saturada (K_s) (revestimento) (cm.min ⁻¹) | Inverso da pressão de entrada de ar (revestimento) (α) | Índice de distribuição do tamanho dos poros (revestimento) (n) |
|----------------------|-----------------|--|---|--|
| Turco et al., (2017) | | 1,56 | 3,37 | 1,47 |
| Vartha, (2023) | 8 e 9 | 0,3 – 0,8 | 1,65 – 21,97 | 1,13 – 2,11 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

O parâmetro hidráulico α apresentou grande variação de valores. Um valor alto para este parâmetro no modelo de van Genuchten-Mualem pode indicar maior retenção de água, pois a curva de retenção de água será mais inclinada, o que pode indicar que o material será capaz de reter mais água para potenciais matriciais baixos. Resultando em um maior armazenamento de água no solo e uma menor taxa de drenagem, especialmente em condições de umidade antecedente alta.

Valores baixos de K_s em conjunto com uma umidade antecedente alta podem indicar condições de baixa capacidade de infiltração e maior risco de ocorrência de escoamento superficial. Quando a umidade antecedente está alta, como no caso dos eventos de chuva 8 e 9, o material já está próximo ou em condições de saturação. Nesse caso, se o valor de K_s também for baixo, pode significar que o material tem uma capacidade limitada de transmitir água quando está completamente saturado.

A umidade antecedente desempenha um papel fundamental na hidrologia, pois afeta a capacidade do material em absorver ou reter água proveniente dos eventos de chuva (VAZ e MOURA, 2014). Se o solo estiver seco ou com baixa umidade antecedente, ele terá maior capacidade de absorver água da chuva, resultando em maior taxa de infiltração. Por outro lado, se o material estiver saturado ou com alta umidade antecedente, ele terá menor capacidade de absorver água.

Os valores estimados de destes parâmetros hidráulicos (K_s e α) mostraram-se altamente variáveis, sendo influenciados pelas condições iniciais do PP e função objetivo. Para as demais simulações no período de calibração, inclusive os eventos de chuva 8 e 9, todas as camadas do perfil de PP foram consideradas secas.

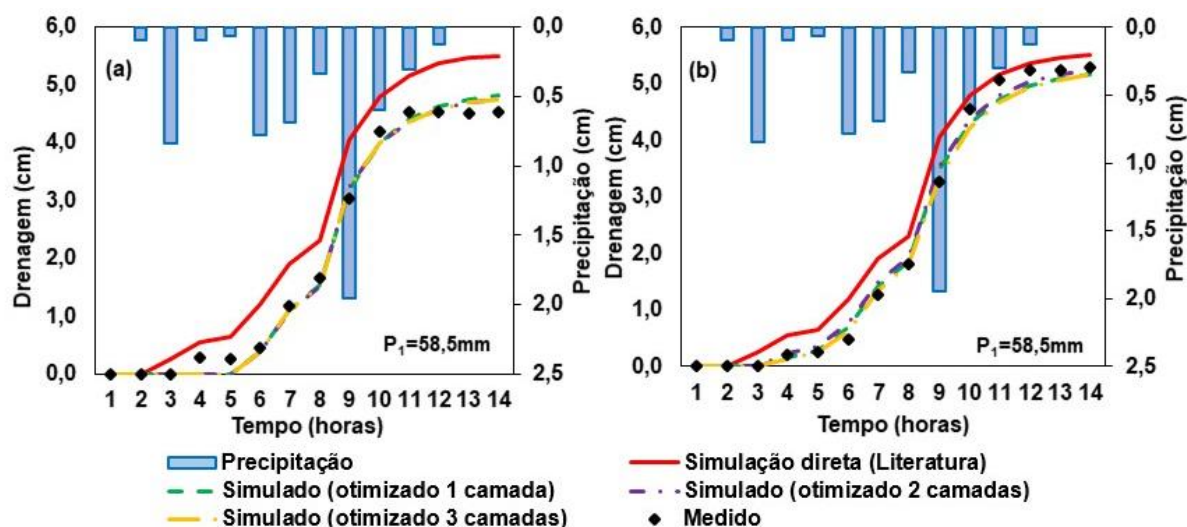
5.1.2 Calibração do modelo

A otimização dos parâmetros hidráulicos foi realizada sequencialmente, começando pela camada superior (revestimento) e progredindo em direção à base (armazenamento) do PP. Cada camada foi otimizada individualmente, levando em consideração a direção e o sentido do escoamento. Após otimizar uma camada, os parâmetros da camada seguinte foram otimizados, mantendo fixos os parâmetros já otimizados da camada anterior. Os valores iniciais dos parâmetros hidráulicos de cada camada foram estabelecidos com base nas informações encontradas na literatura (Turco et al., 2017). É importante ressaltar que nenhum evento de chuva ocasionou escoamento superficial, portanto, os resultados das simulações são, exclusivamente, valores de drenagem.

Está apresentada a drenagem simulada diretamente usando parâmetros da literatura (simulada literatura), otimizando apenas a camada de revestimento (revestimento otimizado), otimizando as camadas de revestimento e assentamento (assentamento otimizado) e otimizando as camadas de revestimento, assentamento e armazenamento (armazenamento otimizado) (Figuras 15 a 23).

Observa-se que as simulações dos eventos de chuva no PP tiveram um bom desempenho usando somente os valores da literatura (i.e., Turco et al., 2017). Também é possível notar que o ajuste melhorou significativamente após a otimização dos parâmetros hidráulicos da camada de revestimento, mantendo constantes os parâmetros hidráulicos retirados da literatura para as outras duas camadas do PP. A proximidade da entre a linha verde e os valores medidos, comparados com a linha vermelha (Figura 15) comprovam esse resultado.

Figura 15: Simulações referentes ao evento do dia 06/10/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.

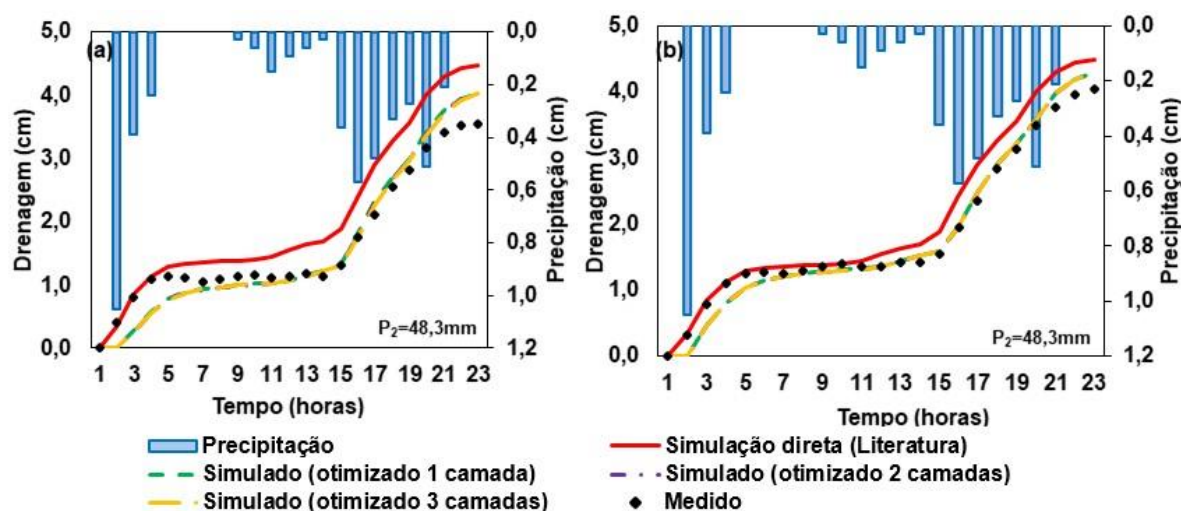


Fonte: Autoria Própria (2023).

As camadas de assentamento e armazenamento apresentaram pouca influência na melhoria do desempenho do modelo em algumas simulações. Visto que, as linhas roxa e amarela praticamente se sobrepõem à linha verde na escala gráfica utilizada (Figura 16). Assim, os resultados mostram que a camada de revestimento influencia fortemente na simulação da drenagem do PP com drenos de fundo.

O ajuste dos dados de drenagem medidos e simulados (linha verde, roxa e amarela) para o PP com os dois tipos de revestimento (Figura 16a e b) apresentam ótima eficiência. Entretanto, é possível analisar que a drenagem simulada no PP com revestimento poroso possui um melhor ajuste aos dados de drenagem medidos. Isto pode ter acontecido, pois, o material utilizado no revestimento poroso do PP se assemelha ao material utilizado da literatura, em relação a sua alta permeabilidade. De modo geral, os valores da literatura de Turco et al., (2017) que foram usados como ponto de partida para a otimização, podem ter se ajustado melhor aos parâmetros hidráulicos do material utilizado no PP com revestimento poroso, e por isso os dados de drenagem medidos e simulados também se ajustam de maneira mais eficiente.

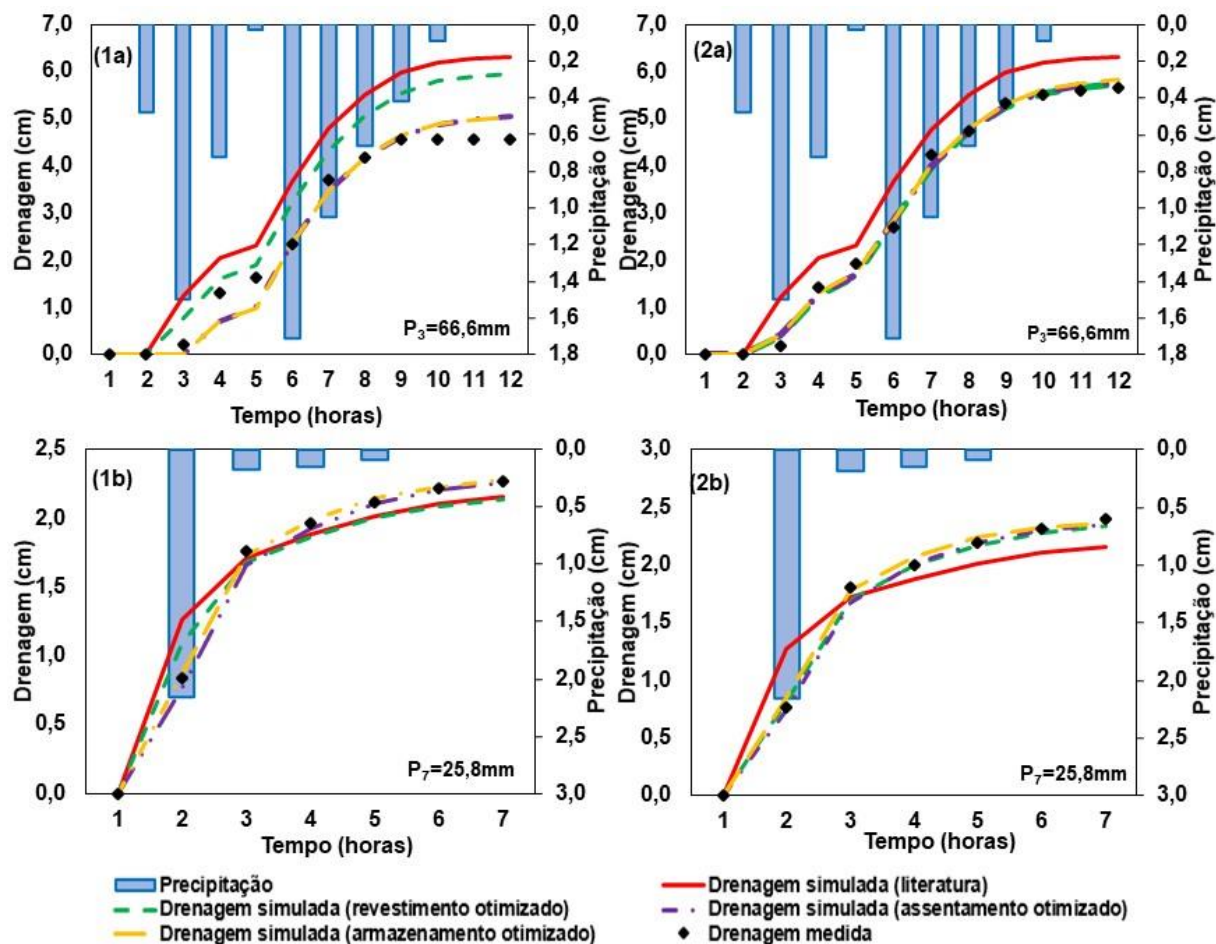
Figura 16: Simulações referentes ao evento do dia 20/10/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Apesar da grande influência da camada de revestimento na otimização dos parâmetros, é possível notar que em algumas simulações a otimização da camada de assentamento (linha roxa) se mostrou mais eficaz em relação os dados de drenagem medidos e simulados em relação camada de revestimento (linha verde). Outra particularidade é que isso aconteceu apenas para o PP com revestimento convencional (Figura 17 – 1a e 2a) (Figura 18 – 1a, 2a e 3a), pois para o PP com revestimento poroso a otimização do revestimento foi mais eficiente (Figura 17 – 1b e 2b) (Figura 18 – 1b, 2b e 3b). Isso pode indicar que, a camada de assentamento, para essas simulações, no PP com revestimento convencional, pode ter tido maior contribuição para a drenagem do PP do que o revestimento convencional.

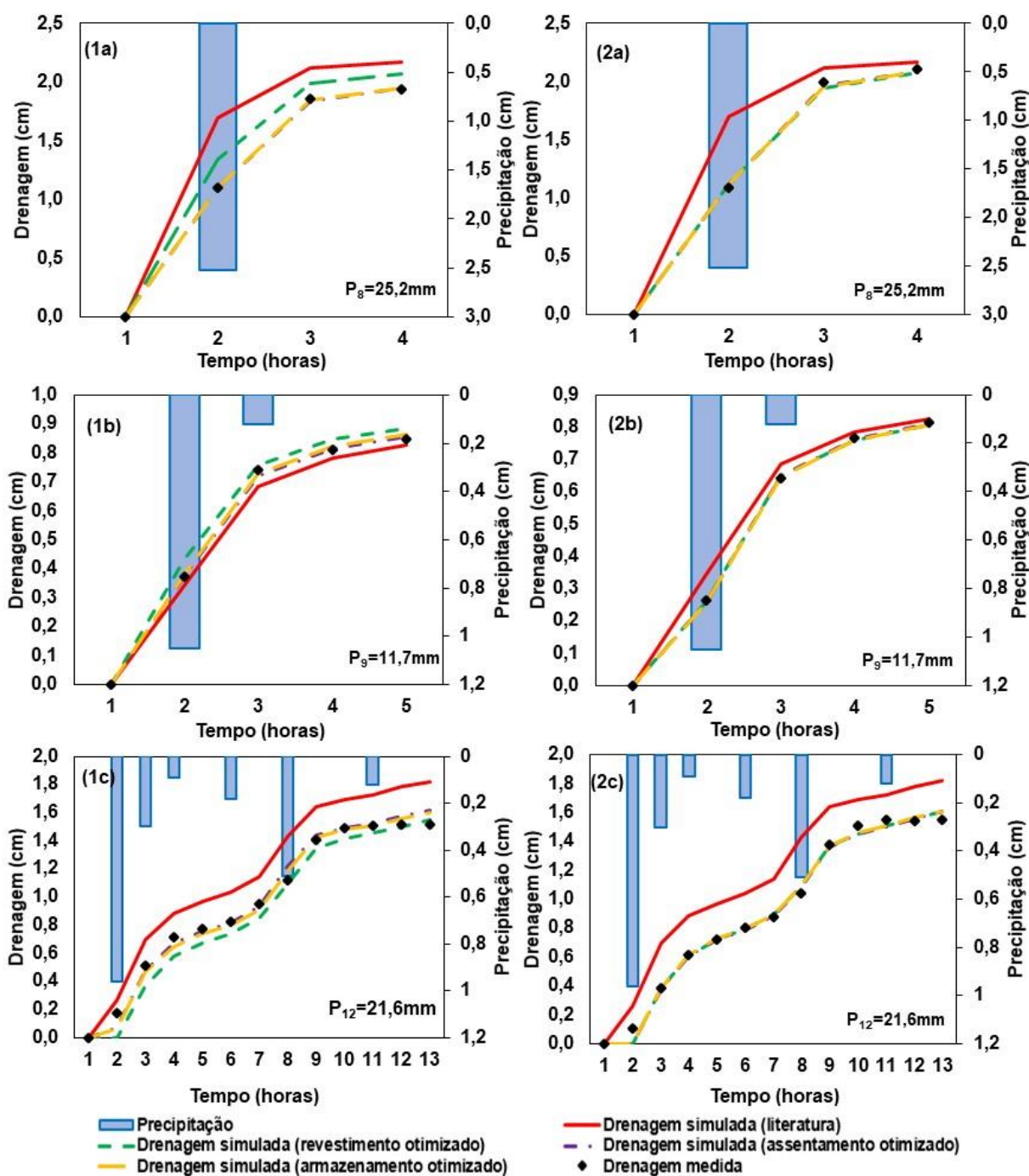
Figura 17: Simulações referentes ao evento do dia 29/10/2022 e 18/01/2023, revestimento convencional (RC) (1a e 2a) e revestimento poroso (RP) (1b e 2b), respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

O desempenho das simulações, onde a camada de assentamento mostrou mais eficiência na otimização dos parâmetros, apresentou alta qualidade no ajuste com valores de $NSE \geq 0,96$, pequeno erro médio MAE e $RMSE < 0,25$ cm e insignificante super e subestimação ($-1,21 \leq Pbias \leq 0,18$) do modelo em relação aos dados medidos de drenagem (Figura 17 e Figura 18). É possível verificar esses valores nas tabelas 8 e 9.

Figura 18: Simulações referentes ao evento do dia 19/01/2023, 14/02/2023 e 22/01/2023, revestimento convencional (RC) (1a, 1b e 1c) e revestimento poroso (RP) (2a, 2b e 2c), respectivamente.

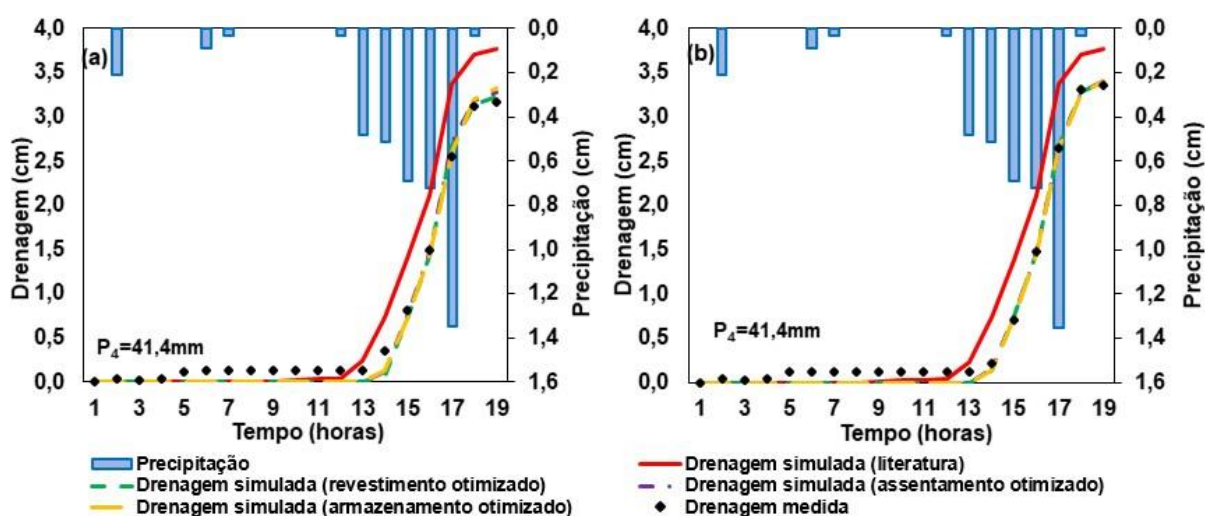


Fonte: Autoria Própria (2023).

Em relação as métricas estatísticas aplicadas ao modelo na fase de calibração, nota-se um ajuste excelente dos dados observados e simulados, uma vez que, todas as simulações apresentam valores de $NSE > 0,75$ e $R^2 > 0,90$, por exemplo. Os

valores de $P_{bias} = 10,56\%$ para o PP com revestimento convencional e $P_{bias} = 5,09\%$ para o PP com revestimento poroso, mostram que, na simulação referente ao dia 13/11/2022 (Figura 19), os dados simulados são em média menores do que os dados observados, isto é, o modelo apresenta um viés de subestimação dos valores de drenagem.

Figura 19: Simulações referentes ao evento do dia 13/11/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.

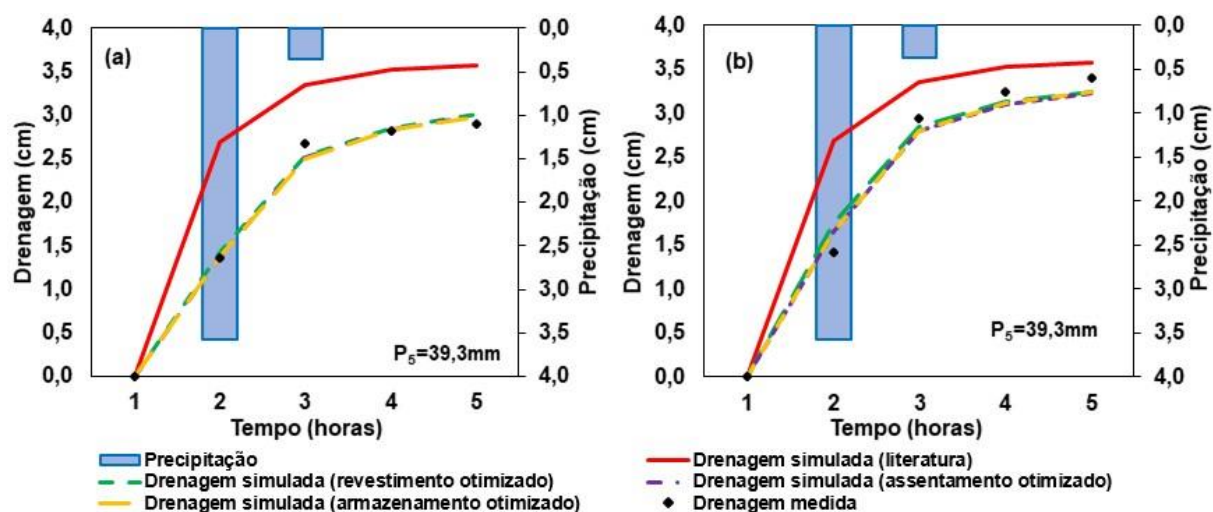


Fonte: Autoria Própria (2023).

Para os eventos de chuva referente aos dias 01/12/2022 e 19/12/2022, observa-se alta qualidade de ajustes em relação as métricas estatísticas aplicadas $NSE > 0,99$ para o revestimento convencional $NSE > 0,98$ para o revestimento poroso (Figura 20a e b) e $R^2 = 0,99$. Os valores de $P_{bias} = 0,63\%$ para o PP com revestimento convencional e $P_{bias} = 2,02\%$ para o revestimento poroso.

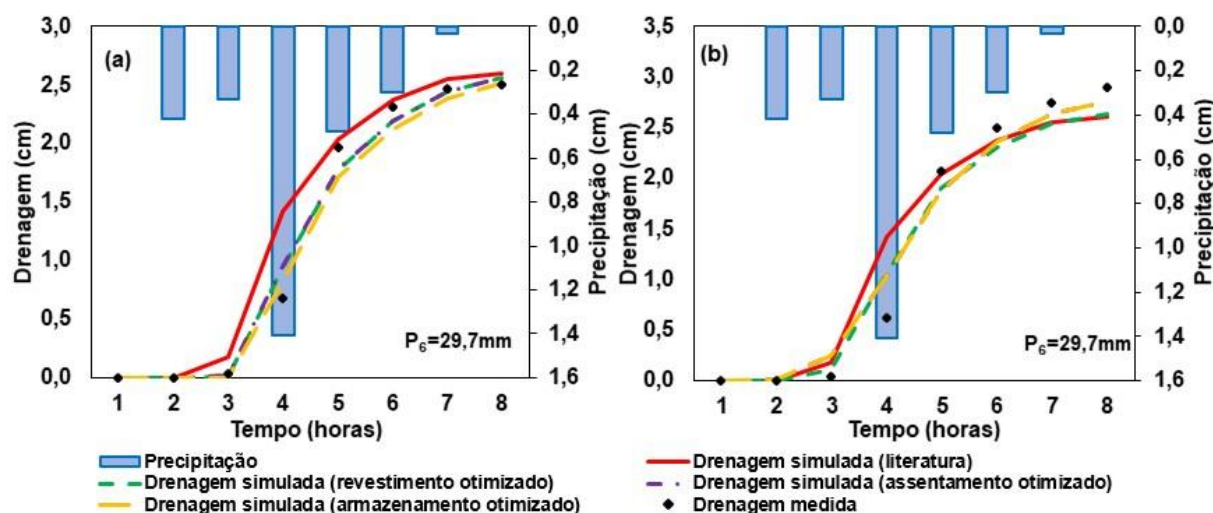
Observa-se também ótima eficiência na otimização da camada de revestimento (linha verde) em relação aos dados medidos (Figura 21a e b), tanto para o revestimento convencional quanto para o revestimento poroso. As camadas de assentamento e armazenamento (linhas roxa e amarela) não apresentaram influência significativa nestas simulações, visto que, as mesmas se sobrepõe a linha verde (revestimento).

Figura 20: Simulações referentes ao evento do dia 01/12/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

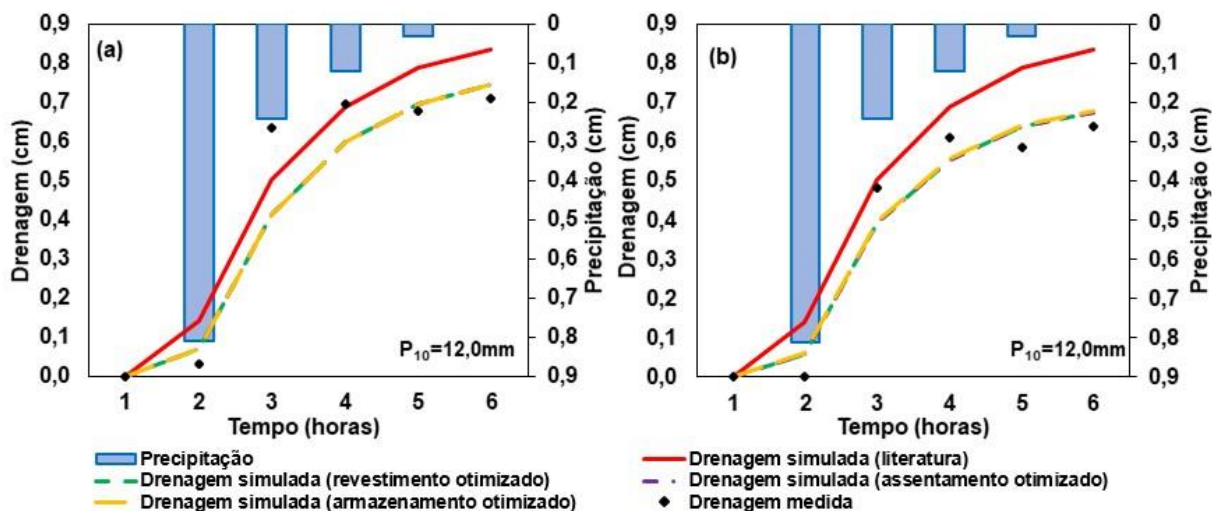
Figura 21: Simulações referentes ao evento do dia 19/12/2022, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

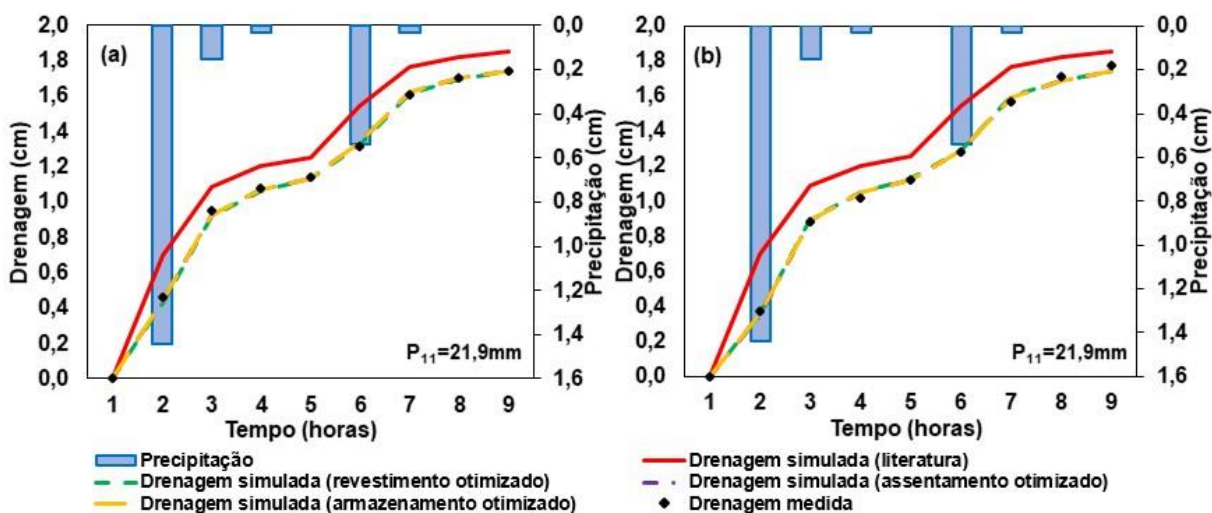
Para o evento de chuva referente ao 02/02/2023 nota-se que os valores de $P_{bias} = 8,23\%$ para o PP com revestimento convencional e $P_{bias} = -0,83\%$ para o PP com revestimento poroso, apresentam diferenças significativas nos valores, ou seja, para o PP com revestimento convencional, os dados de drenagem simulados são em média menores do que os dados de drenagem medidos, sendo assim, a simulação apresenta um viés de subestimação dos valores de drenagem (Figura 22).

Figura 22: Simulações referentes ao evento do dia 02/02/2023, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 23: Simulações referentes ao evento do dia 03/02/2023, revestimento convencional (RC) (a) e revestimento poroso (RP) (b), respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Outra particularidade dessa simulação é que, mesmo com os valores das métricas estatísticas considerados ótimos ($NSE \geq 0,89$; MAE e $RMSE \leq 0,101$ cm; $R^2 \geq 0,91$ e $-0,83 \geq P_{bias} \leq 8,23$), os dados simulados de drenagem não apresentam um bom ajuste aos dados de drenagem medidos, se comparados com as demais simulações, como por exemplo, a simulação do dia 03/02/2023 ($NSE \geq 0,99$; MAE e $RMSE \leq 0,01$ cm; $R^2 \geq 0,99$ e $-0,12 \geq P_{bias} \leq 0,18$) (Figura 23). Isso pode ter

ocorrido, devido a fatores externos que não foram considerados no monitoramento, nem considerados nas simulações, como a umidade antecedente, por exemplo. As tabelas 8 e 9 apresentam os valores das métricas MAE, RMSE, R^2 , NSE e PBIAS para cada simulação otimizada em relação aos doze eventos de chuvas analisados em relação ao PP com revestimento convencional e poroso, respectivamente.

Tabela 8: Valor das métricas usadas para avaliar o desempenho das simulações numéricas (MAE, RMSE, R^2 , NSE e Pbias), usando exclusivamente, parâmetros otimizados, para cada evento de chuva. Os eventos estão apresentados conforme a data de ocorrência para o PP com revestimento convencional.

| Data (dia/mês/ano) | MAE (cm) | RMSE (cm) | R² (adimensional) | NSE (adimensional) | PBIAS (%) |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|
| 06/10/2022 | 0,13 | 0,16 | 0,99 | 0,99 | 1,89 |
| 20/10/2022 | 0,21 | 0,27 | 0,98 | 0,93 | 2,38 |
| 29/10/2022 | 0,25 | 0,34 | 0,98 | 0,97 | 1,18 |
| 13/11/2022 | 0,10 | 0,11 | 1,00 | 0,99 | 10,52 |
| 01/12/2022 | 0,05 | 0,08 | 0,99 | 0,99 | 0,63 |
| 19/12/2022 | 0,09 | 0,13 | 0,99 | 0,99 | 4,25 |
| 18/01/2023 | 0,02 | 0,02 | 1,00 | 1,00 | -0,61 |
| 19/01/2023 | 0,01 | 0,01 | 1,00 | 1,00 | 0,04 |
| 22/01/2023 | 0,01 | 0,01 | 1,00 | 1,00 | -0,73 |
| 02/02/2023 | 0,07 | 0,10 | 0,91 | 0,89 | 8,23 |
| 03/02/2023 | 0,01 | 0,01 | 1,00 | 1,00 | 0,18 |
| 14/02/2023 | 0,04 | 0,05 | 0,99 | 0,99 | 0,77 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 9: Valor das métricas usadas para avaliar o desempenho das simulações numéricas (MAE, RMSE, R^2 , NSE e Pbias), usando exclusivamente, parâmetros otimizados, para cada evento de chuva. Os eventos estão apresentados conforme a data de ocorrência para o PP com revestimento poroso.

| Data (dia/mês/ano) | MAE (cm) | RMSE (cm) | R² (adimensional) | NSE (adimensional) | PBIAS (%) |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|
| 06/10/2022 | 0,12 | 0,17 | 1,00 | 0,99 | 3,36 |
| 20/10/2022 | 0,12 | 0,16 | 0,99 | 0,98 | 0,81 |
| 29/10/2022 | 0,12 | 0,14 | 1,00 | 1,00 | -0,72 |
| 13/11/2022 | 0,12 | 0,15 | 0,98 | 0,95 | 5,09 |
| 01/12/2022 | 0,13 | 0,15 | 0,99 | 0,99 | 2,02 |
| 19/12/2022 | 0,15 | 0,19 | 0,98 | 0,97 | -0,57 |
| 18/01/2023 | 0,04 | 0,05 | 1,00 | 1,00 | 1,21 |
| 19/01/2023 | 0,02 | 0,02 | 1,00 | 1,00 | 0,68 |
| 22/01/2023 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,71 |
| 02/02/2023 | 0,05 | 0,06 | 0,96 | 0,96 | -0,83 |
| 03/02/2023 | 0,02 | 0,02 | 1,00 | 1,00 | -0,12 |
| 14/02/2023 | 0,03 | 0,04 | 1,00 | 0,99 | 0,40 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

De acordo com a análise de sensibilidade global realizada no trabalho de Brunetti; Šimůnek; Piro, (2016), a camada que mais possui influência na modelagem numérica do comportamento hidráulico de um pavimento permeável é a camada de revestimento. A camada de armazenamento tem um impacto menor e atua como um tanque de armazenamento, enquanto a camada de assentamento tem influência nas interações com outros parâmetros.

A camada de revestimento pode ter tido maior influência em algumas simulações por apresentar um valor de condutividade hidráulica menor em comparação com a camada de armazenamento tanto para o revestimento convencional (RC) (Figura 24e) quanto para o revestimento poroso (RP) (Figura 25e). Isso significa que a água se move mais lentamente através da camada de revestimento poroso, ou no caso do revestimento convencional pelas juntas, o que pode afetar o comportamento hidráulico geral do sistema de pavimento permeável. Além disso, a camada de assentamento possui maiores valores de K_s e pouca (ou mínima) influência no desempenho do modelo (Figura 24e e Figura 25e).

Coutinho et al., (2016) argumentaram que a infiltração acumulada é fortemente influenciada pelas camadas do PP que possuem menor K_s . Apesar de Coutinho et al. (2016) terem estudado uma configuração e materiais diferentes para o PP, os resultados corroboram esse argumento.

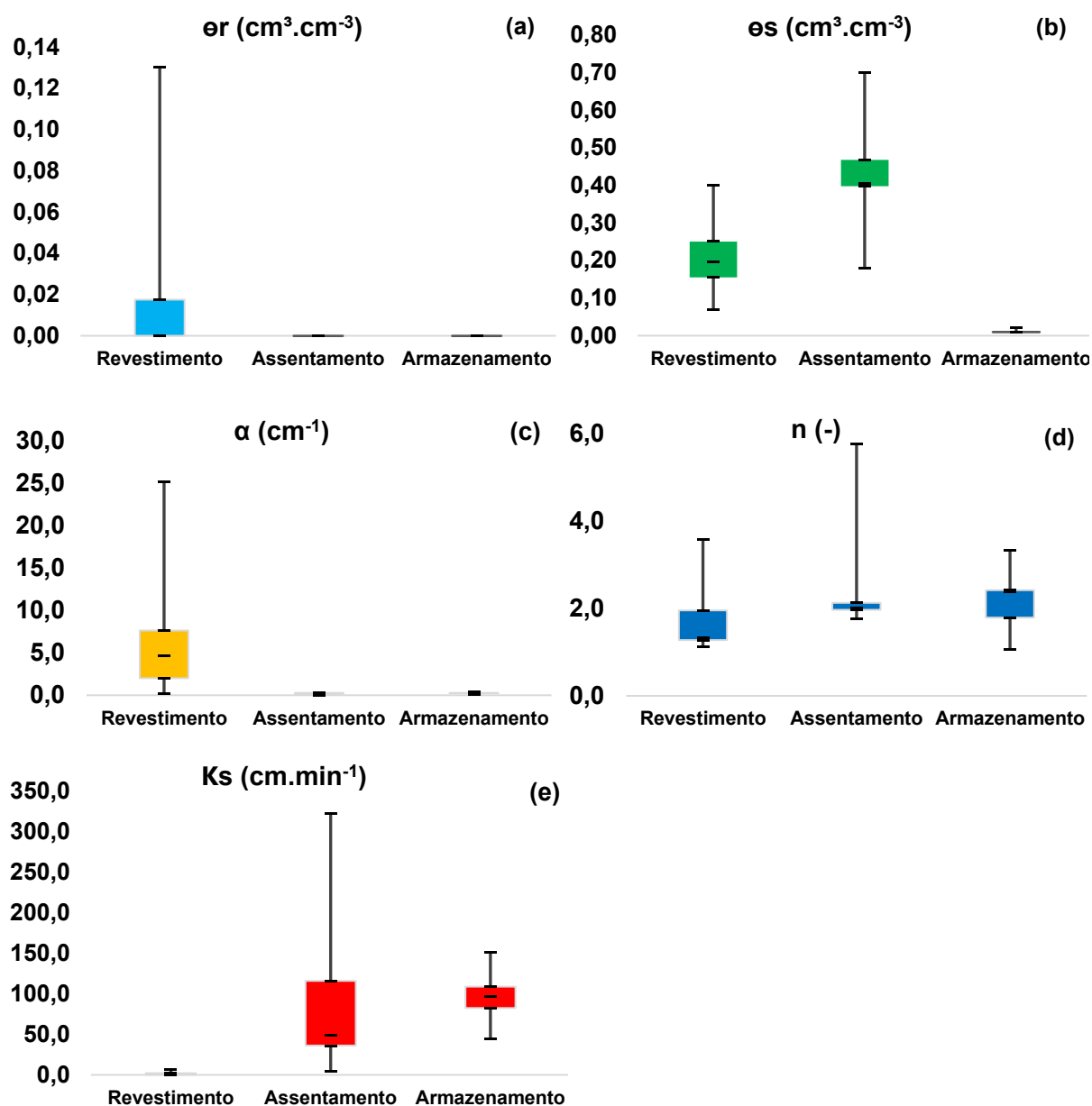
Após otimizar os parâmetros das camadas do PP para os 12 eventos de chuva, foi possível observar pouca variação de valor dos parâmetros, θ_r e θ_s , considerando as camadas individuais do PP (Figura 24a e b) (Figura 25a e b). Por outro lado, os parâmetros α conferiram variações significativas para a camada de revestimento (Figura 24c) (Figura 25c), n para a camada de assentamento (Figura 24d) (Figura 25d) e K_s para as camadas de assentamento e armazenamento, dependendo da característica do evento de chuva (Figura 24e) (Figura 25d). Esse resultado indica como cada parâmetro depende (ou não) significativamente das características dos eventos de chuva.

Também segundo Brunetti; Šimůnek; Piro, (2016) em relação aos parâmetros hidráulicos mais influentes na modelagem numérica do comportamento hidráulico de um pavimento permeável são os parâmetros hidráulicos α , n e K_s . Esses parâmetros têm os maiores índices de primeira ordem e índices de efeito total, indicando que eles têm um impacto significativo na variância de saída do modelo.

A camada de armazenamento tem uma influência significativa no comportamento hidráulico do sistema de pavimento permeável. A condutividade hidráulica da camada de armazenamento é particularmente importante porque é a camada que fornece a capacidade de drenagem primária para o sistema. Além disso, os parâmetros empíricos da camada de armazenamento (α e n) são importantes, pois afetam a forma da curva de retenção de água, que por sua vez afeta a condutividade hidráulica da camada.

O parâmetro α influencia a capacidade do solo de reter água em diferentes faixas de potenciais matriciais. Sendo assim, um valor alto de alfa indica que o solo tem uma capacidade de retenção de água maior em condições de maior umidade. Isso significa que o material com um valor alto de α pode reter mais água sob condições de saturação ou saturação parcial.

Figura 24: Distribuição estatística dos parâmetros otimizados para o PP com revestimento convencional: (a) umidade residual, (b) umidade saturada, (c) relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar (d) relacionado à distribuição do tamanho dos poros e (e) condutividade hidráulica saturada.



Fonte: Autoria Própria (2023).

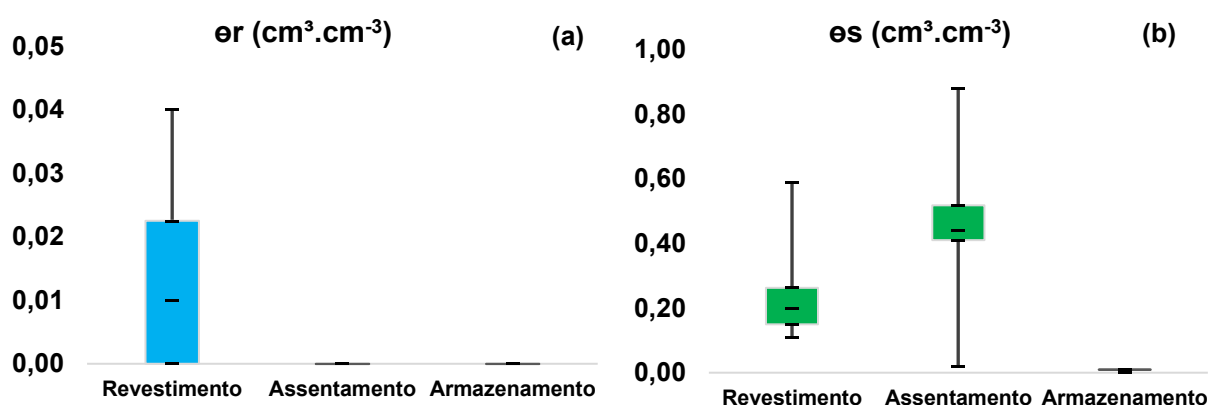
A condutividade hidráulica $K(\theta)$, parâmetro presente na equação de Richards (Equação 1), do material diminui à medida que o teor de umidade diminui. Isso ocorre porque os poros cheios de ar no material tornam-se menores e mais tortuosos à

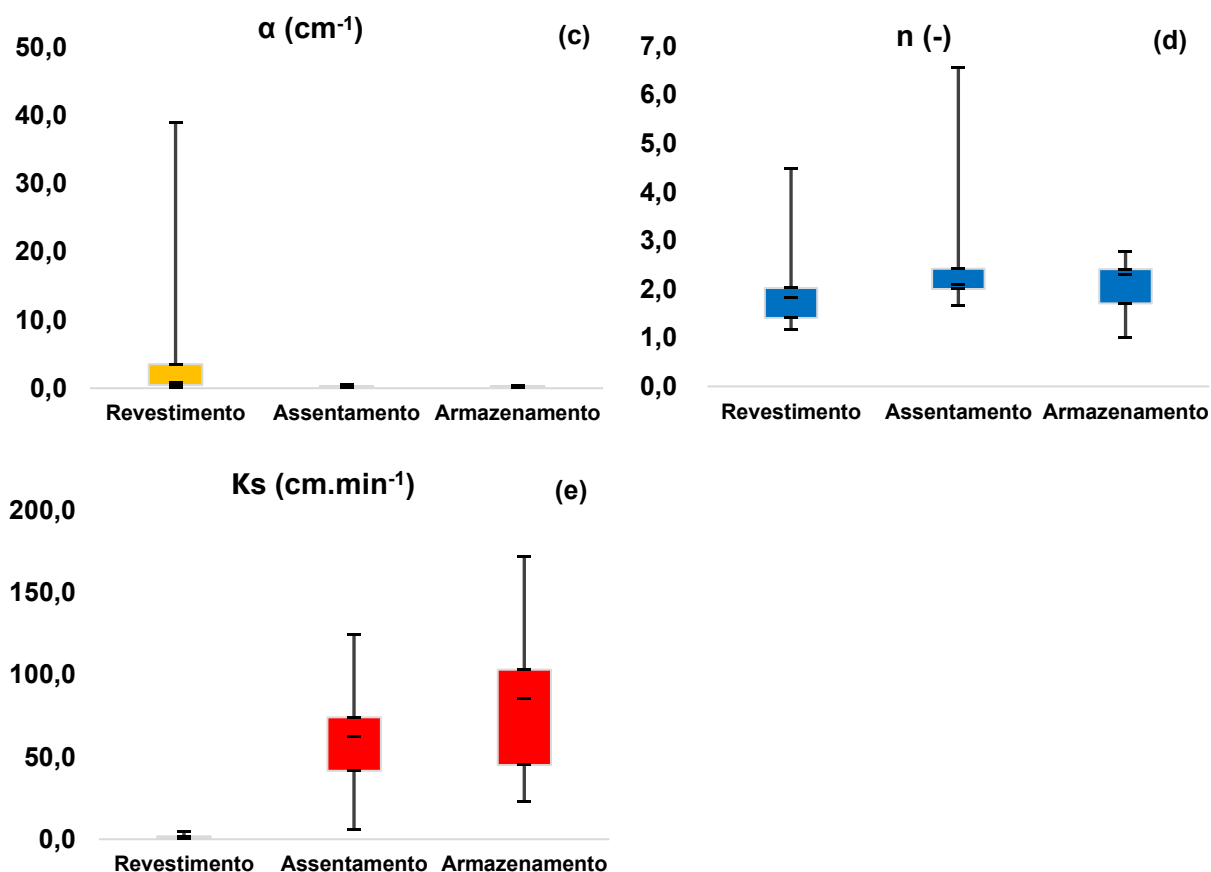
medida que o teor de umidade diminui, o que aumenta a resistência ao escoamento de água. Em condições saturadas, a condutividade hidráulica do material não é afetada pelo teor de umidade porque todos os poros estão preenchidos com água.

Outro fator que pode influenciar os valores dos parâmetros é a umidade antecedente, pois a condutividade hidráulica na equação de Richards está diretamente relacionada à umidade antecedente do material. A umidade antecedente refere-se ao teor de água no material antes do início do evento de chuva considerado e, mesmo que a umidade antecedente não tenha sido considerada na modelagem numérica, ela pode ter influenciado nos dados de drenagem medidos experimentalmente. Além disso, a condutividade hidráulica é uma propriedade do material que descreve sua capacidade de transmitir água, e é influenciada por fatores como porosidade, distribuição de tamanho de partícula e compactação do material, que por sua vez, influenciam diretamente na taxa de infiltração e a redistribuição de água no PP.

Em resumo, a condutividade hidráulica e a umidade antecedente estão interligadas no contexto da equação de Richards. A umidade antecedente influencia a condutividade hidráulica do material, afetando a taxa de infiltração e a distribuição da água. Por sua vez, a condutividade hidráulica afeta a umidade antecedente, influenciando a retenção e a drenagem da água no material.

Figura 25: Distribuição estatística dos parâmetros otimizados para o PP com revestimento poroso: (a) umidade residual, (b) umidade saturada, (c) relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar (d) relacionado à distribuição do tamanho dos poros e (e) condutividade hidráulica saturada





Fonte: Autoria Própria (2023).

Portanto, as simulações apresentadas tiveram um excelente desempenho em relação as métricas estatísticas aplicadas para o PP com revestimento poroso e convencional. Os valores dos parâmetros hidráulicos otimizados para todas as camadas (revestimento, assentamento e armazenamento) mostraram coerência se comparados com os valores retirados da literatura de Turco et al., (2017).

5.1.3 Influência do tipo de revestimento na drenagem no PP

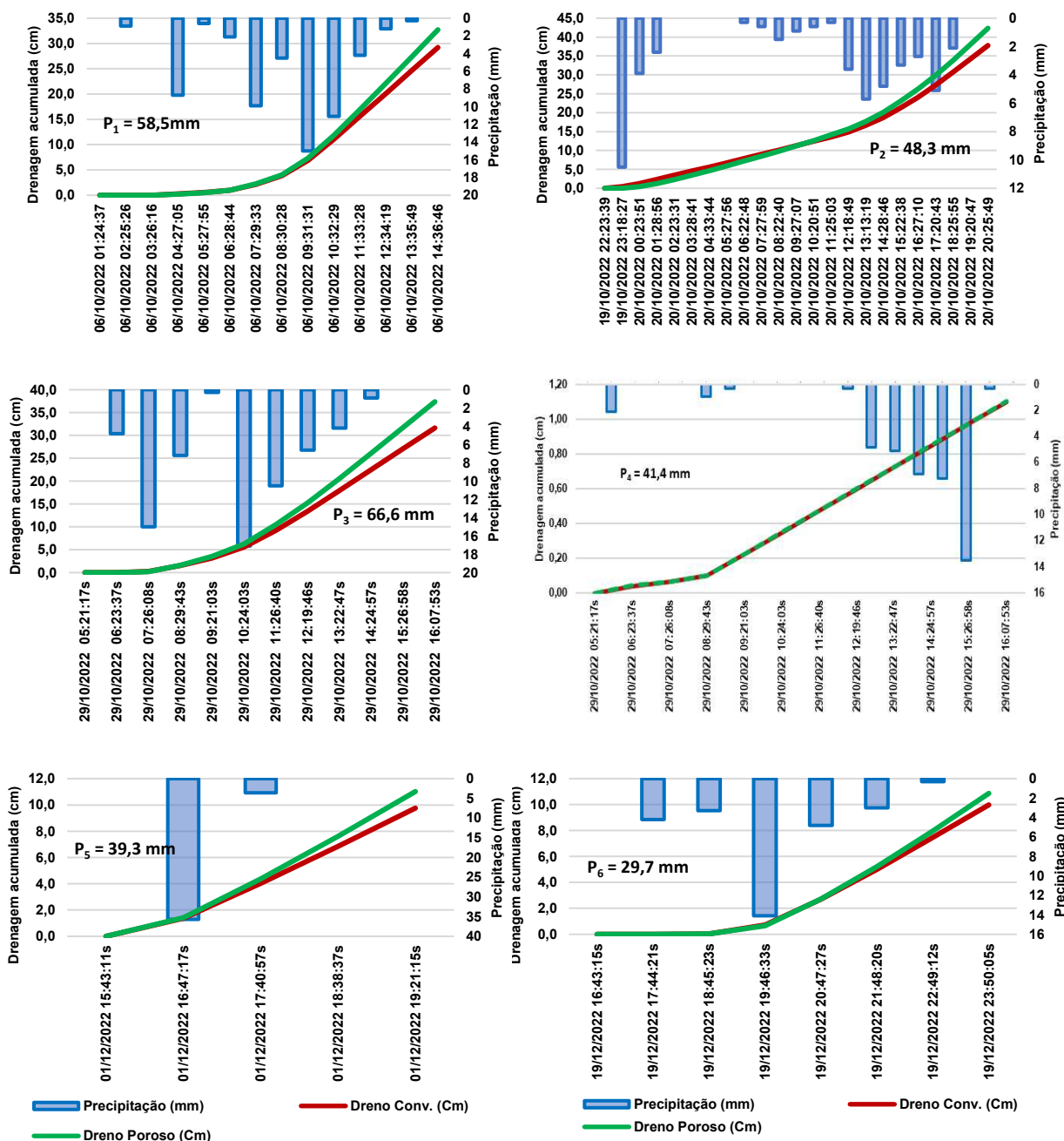
Os gráficos de todos os doze eventos de chuvas, com a altura total de chuva, tempo de duração do evento e altura de drenagem acumulada em relação à altura de chuva por hora (Figuras 26 e 27). Pode-se analisar que, em uma chuva com altura total de precipitação de 21,6 mm o sistema de pavimento permeável drenou cerca de 12,5 cm de água. Isto significa que, uma altura total de precipitação de 21,6 mm captada por uma área correspondente a $0,9215\text{m}^2$ gera uma altura de drenagem de aproximadamente 12,5 cm.

Conforme a Equação 12, nota-se que a altura de água no sistema de pavimentos permeáveis varia conforme a altura de água coletado pelo dreno de fundo. Este ajuste foi feito para que a área de contribuição do pavimento permeável fosse analisada no cálculo, pois se considerarmos apenas a altura de precipitação, a mesma pode variar conforme o recipiente no qual estaria sendo medida.

Observa-se também que, para as chuvas com maiores alturas de precipitação, o pavimento permeável com revestimento poroso apresenta maior lâmina de água acumulado referente a drenagem do sistema. As chuvas com intensidade média baixa apresentam alturas de lâmina de água referentes a drenagem acumulada do revestimento convencional um pouco acima do pavimento com revestimento poroso.

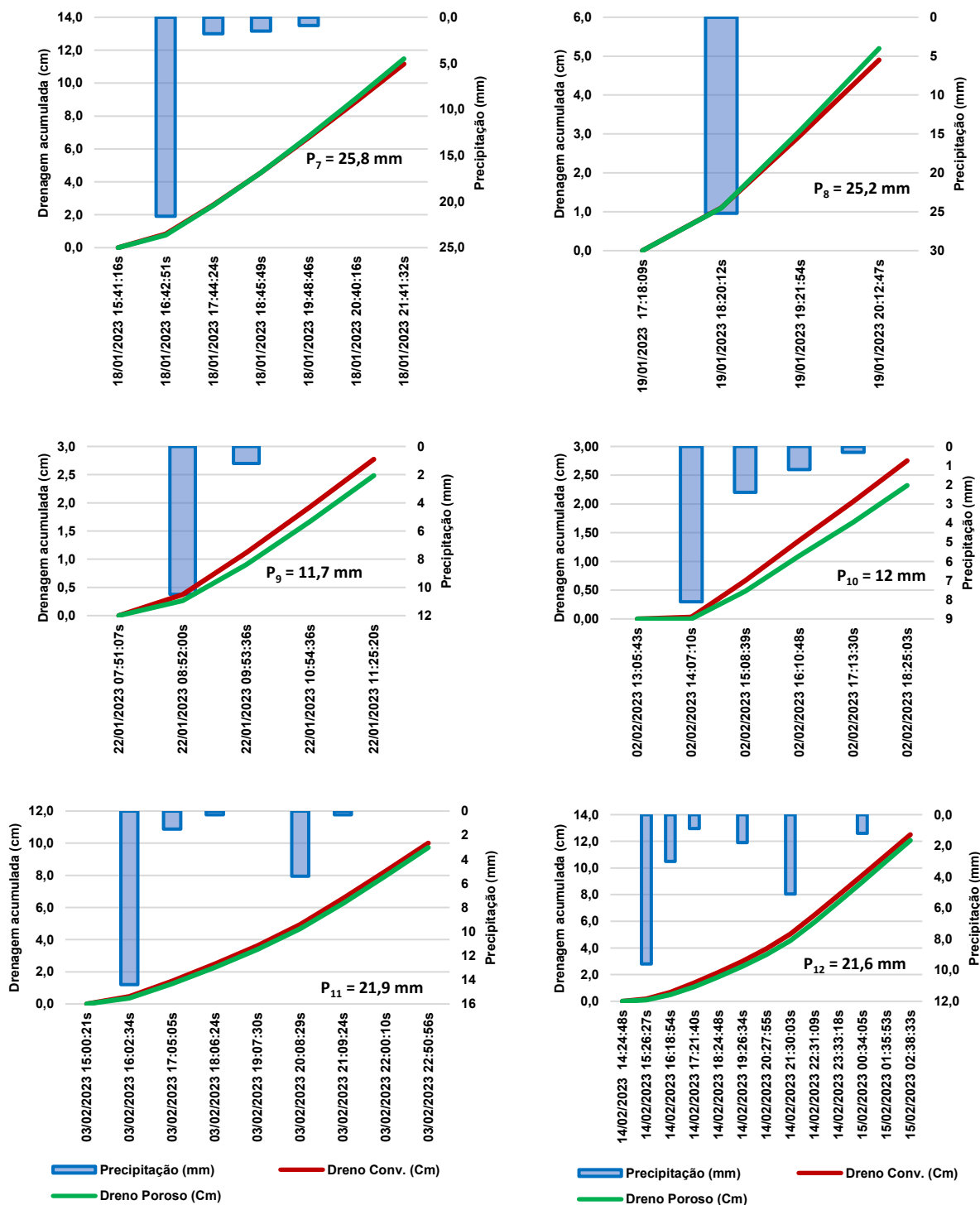
De modo geral, os dois tipos de revestimento (convencional e poroso) do PP apresentaram resultados satisfatórios na drenagem. Importante destacar que, a interação adequada das camadas do PP é essencial para manter a funcionalidade do sistema e promover a infiltração de água da chuva. Considerar as características hidrológicas e estruturais de cada camada, bem como os requisitos específicos do local de implementação do PP, é indispensável para garantir a eficiência e a durabilidade do PP.

Figura 26: Relação do eventos de chuvas com a drenagem acumulada nos sistemas de pavimentos permeáveis, referente ao tipo de revestimento poroso e convencional, respectivamente (Eventos de chuva 1-6).



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 27: Relação do eventos de chuvas com a drenagem acumulada nos sistemas de pavimentos permeáveis, referente ao tipo de revestimento poroso e convencional, respectivamente (Eventos de chuva 7-12).



Fonte: Autoria Própria (2023).

6 CONCLUSÃO

As mudanças climáticas afetam os ciclos meteorológicos dos eventos de chuva. Com isso, é possível notar que, cada vez mais, esses eventos apresentam características de chuvas extremas, de alta intensidade e curta duração. Além disso, aumento da frequência de eventos de inundação em áreas urbanas está associado ao aumento de superfícies impermeáveis, que por sua vez, ocorrem devido a falta de planejamento e a urbanização descontrolada.

Essa pesquisa investigou a adequação do *software* Hydrus-1D para descrever o escoamento de água não saturado em regime transiente em pavimentos permeáveis (PP) com presença de dreno de fundo. As simulações foram realizadas utilizando dados medidos de eventos de chuva (P) reais. A modelagem numérica desses sistemas sustentáveis de drenagem, PP, é importante para entender os processos físicos envolvidos no seu funcionamento.

Foi possível notar que a camada de revestimento possui maior influência na drenagem de água do PP. Além disso, os parâmetros hidráulicos K_s , α e n também apresentaram grande variação e influência nas simulações do comportamento hidráulico do PP, pois estes têm os maiores índices de primeira ordem e índices de efeito total, indicando, assim, um impacto significativo na variância de saída do modelo.

A camada de armazenamento também mostrou certa influência no comportamento hidráulico do sistema de pavimento permeável, pois a condutividade hidráulica dessa camada fornece a capacidade de drenagem primária para o sistema, devido ao fato de ser um parâmetro que descreve a capacidade de um meio poroso de transmitir água.

Além disso, a camada de assentamento apresentou melhores ajustes nas otimizações dos parâmetros hidráulicos para alguns eventos de chuva no PP com revestimento convencional, o que pode indicar que a camada de assentamento teve maior influência na drenagem do PP do que a camada de revestimento.

Como aplicação é sugerido que a camada de revestimento seja construída com materiais de elevada condutividade hidráulica para aumentar o desempenho do PP em relação a infiltração de água. Portanto, apesar da ênfase no dimensionamento da camada de armazenamento, tomadores de decisão devem adotar critérios mais

específicos para a escolha de materiais da camada de revestimento de PP, visto que, a mesma possui grande influência na drenagem do PP. É importante ressaltar algumas limitações em relação a pesquisa, como por exemplo, i) a evaporação foi negligenciada; e ii) as condições iniciais de umidade das camadas do PP não foram medidas.

REFERÊNCIAS

- ALAM, T. et al. A comparison of three types of permeable pavements for urban runoff mitigation in the semi-arid South Texas, U.S.A. **Water (Switzerland)**. v. 11, n. 10, p. 1–23, 2019.
- ALSUBIH, M. et al. Experimental study on the hydrological performance of a permeable pavement. **Urban Water Journal**. v. 14, n. 4, p. 427–434, 2017.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 16 outubro. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. **Climatic Change**. v. 134, n. 3, p. 387–401, 2016.
- ASTARAIE-IMANI, M. et al. Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK. **Journal of Environmental Management**. v. 112, p. 1–9, 2012.
- BAEK, S. S. et al. Assessment of a green roof practice using the coupled SWMM and HYDRUS models. **Journal of Environmental Management**. v. 261, n. November 2019, p. 109920, 2020.
- BALENA, R.; BORTOLINI, E.; TOMAZONI, J. C. Caracterização Dos Tipos De Solos Do Município De Pato Branco Através Técnicas De Geoprocessamento. **Synergismus scyentifica**. v. 04, n. 1, p. 0–2, 2009.
- BALLARD WOODS, B. et al. The SUDS manual. *In*: , 2015. **Anais [...]**. CIRIA, 2015. p. 968.

BARTH, T.J. Numerical Aspects of Computing High Reynolds Number Flows on Unstructured Meshes. **AIAA Journal**, 36(7), 69-96. 1998. doi: 10.2514/2.498

BONNEAU, J. et al. Stormwater infiltration and the 'urban karst' – A review. **Journal of Hydrology**. v. 552, p. 141–150, 2017.

BORGES DE SOUZA, V. C. GESTÃO DA DRENAGEM URBANA NO BRASIL: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**. v. 1, p. 57–072, 2013.

BROWN, C. et al. Characteristics of sediment removal in two types of permeable pavement. **Water Quality Research Journal of Canada**. v. 44, n. 1, p. 59–70, 2009.

BRUNETTI, G. et al. On the use of global sensitivity analysis for the numerical analysis of permeable pavements. **Urban Water Journal**. v. 15, n. 3, p. 269–275, 2018.

BRUNETTI, G.; ŠIMŮNEK, J.; PIRO, P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. **Journal of Hydrology**. v. 540, n. July, p. 1146–1161, 2016.

CANADA. ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE CANADA, ISSUING BODY. **MANOBS - Manual of Surface Weather Observation Standards**. Eighth edition, amendment 2. Canada: Gatineau, QC : Environment and Climate Change Canada = Environnement et changement climatique Canada, 2023. 2021. 202 p. ISBN 9780660457840.

CARBONE, M.; BRUNETTI, G.; PIRO, P. Hydrological performance of a permeable pavement in mediterranean climate. **International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM**. v. 1, n. 3, p. 381–388, 2014.

CMAA. Permeable Interlocking Concrete Pavements - Design and Construction Guide. **Interlocking Concrete Pavement Institute**. p. 44, 2010.

COUTINHO, A. P. et al. Caracterização hidráulica das camadas de um pavimento permeável. **Águas Subterrâneas**. v. 34, n. 2, p. 191–203, 2020.

COUTINHO, A. P. et al. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. **Hydrological Processes**. v. 30, n. 23, p. 4242–4254, 2016.

DOTTORI, F. et al. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. **Nature Climate Change**. v. 8, n. 9, p. 781–786, 2018.

FINKENBINE, J. K.; ATWATER, J. W.; MAVINIC, D. S. Stream health after urbanization. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 36, n. 5, p. 1149–1160, 2000.

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.

GELATI, E. et al. Hydrological assessment of atmospheric forcing uncertainty in the Euro-Mediterranean area using a land surface model. **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 22, n. 4, p. 2091–2115, 2018.

GONÇALVES, A. B. et al. Seminários PAVIMENTOS PERMEÁVEIS e sua influência sobre a Drenagem. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental**. 2014.

GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**. v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009.

HAGHIGHATAFSHAR, S.; YAMANEE-NOLIN, M.; LARSON, M. A physically based model for mesoscale SuDS – an alternative to large-scale urban drainage simulations. **Journal of Environmental Management**. v. 240, n. November 2018, p. 527–536, 2019.

HODSON, T. O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. **Geoscientific Model Development**, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/GMD-15-5481>, 2022.

HOLANDA, M. A. C. R. De; SOARES, W. de A. Analysis of the impermeability of urban soils on the infiltration of rainwater in the city of Recife, PE. **Revista Ambiente e Água**. v. 9, n. 3, p. 445–458, 2019.

HUANG, J. et al. The Influence of Design Parameters on Stormwater Pollutant Removal in Permeable Pavements. **Water, Air, and Soil Pollution**. v. 227, n. 9, 2016.

Huang, J., He, J., Valeo, C., & Chu, A. Temporal evolution modeling of hydraulic and water quality performance of permeable pavements. **Journal of Hydrology**, 533, p. 15–27, 2016.

INTERPAVE. Permeable paving projects. **Architects' journal**. v. 234, n. June, p. 42–43, 2018.

Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Li, Y., & Huang, Y. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, 100, p. 102–110, 2015.

KIPKIE, C. W.; JAMES, W. Feasibility of a Permeable Pavement Option in SWMM for Long-term Continuous Modeling. **Journal of Water Management Modeling**. v. 6062, p. 303–324, 2000.

KOTZEE, I.; REYERS, B. Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach. **Ecological Indicators**. v. 60, p. 45–53, 2016.

KUMAR, K. et al. In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four-year study. **Journal of Environmental Management**. v. 167, p. 8–14, 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.

LI, Y. et al. An approximation method for evaluating flash flooding mitigation of sponge city strategies – A case study of Central Geelong. **Journal of Cleaner Production**. v. 257, p. 120525, 2020.

LI, X. et al. Case Studies of the Sponge City Program in China. **World Environmental and Water Resources Congress 2016: Watershed Management, Irrigation and Drainage, and Water Resources Planning and Management - Papers from Sessions of the Proceedings of the 2016 World Environmental and Water Resources Congress**. p. 295–308, 2016.

LI, J.; BORTOLOTTI, Z. J. Quantifying the impacts of land cover change on catchment-scale urban flooding by classifying aerial images. **Journal of Cleaner Production**. v. 344, n. January, p. 130992, 2022.

LU, Y. et al. Control of runoff peak flow for urban flooding mitigation. **Water (Switzerland)**. v. 13, n. 1796, 2021.

MARINHO, M. N. **Experimentação e Simulação da Água Pluvial em um Pavimento Permeável**. 2018. 1–129 f. - Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

MARINHO, M. N. et al. Mathematical modeling of the infiltration in a permeable pavement on the field scale. **Rbrh**. v. 25, p. 1–15, 2020.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimations of nonlinear parameters. **Science**. v. 151, n. 3712, p. 859–860, 1963.

MILLER, J. D. et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. **Journal of Hydrology**. v. 515, p. 59–70, 2014.

MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity. **Water Resources Research**. v. 12, n. 3, p. 513–522, 1976.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, 10(3), 282–290. 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

NEUMAN, S. P. Effect of Partial Penetration on Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. **Water Resources Research**. v. 10, n. 2, p. 303–312, 1974.

NUERNBERG, Jéssica Klemm. **Proposta de modelagem de pavimentos permeáveis do Tipo C como sub-bacias regulares equivalentes**. 2021. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

ONU. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.

PAZETTI, C. F. **QUANTIFICAÇÃO DE FLUXOS HÍDRICOS EM PAVIMENTOS ALTAMENTE PERMEÁVEIS NA MITIGAÇÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS**. 2021. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. 2011. 1–256 f. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

QI, Y. et al. Sponge city program (Scp) and urban flood management (ufm)—the case of guiyang, sw china. **Water (Switzerland)**. v. 13, n. 19, p. 1–20, 2021.

RIBAS, L. V. da S. et al. Effect of the choice of different methods on the permeable pavement hydraulic characterization and hydrological classification. **Journal of Hydrology and Hydromechanics** v. 69, n. 3, p. 332–346, 2021.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Journal of Applied Physics**. v. 1, n. 5, p. 318–333, 1931.

RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. et al. Laboratory Study on the Stormwater Retention and Runoff Attenuation Capacity of Four Permeable Pavements. **Journal of Environmental Engineering**. v. 142, n. 2, p. 04015068, 2016.

RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I. et al. A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: A case study in the south of Spain. **Journal of Environmental Management**. v. 205, p. 151–162, 2018.

SALERNO, F.; VIVIANO, G.; TARTARI, G. Urbanization and climate change impacts on surface water quality: Enhancing the resilience by reducing impervious surfaces. **Water Research**. v. 144, p. 491–502, 2018.

SANGALLI, N. C. R. **MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE PAVIMENTO PERMEÁVEL POROSO UTILIZANDO O EPA SWMM**. 2021. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

SCHMITT, T. G.; THOMAS, M.; ETTRICH, N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. **Journal of Hydrology**. v. 299, n. 3–4, p. 300–311, 2004.

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

SEO, M. et al. Evaluating the impact of Low Impact Development (LID) practices on water quantity and quality under different development designs using SWAT. **Water (Switzerland)**. v. 9, n. 3, 2017.

SILVEIRA, A.; GOLDENFUM, J. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 12, n. 2, p. 157–168, 2007.

ŠIMŮNEK, J. et al. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. **Soil and Tillage Research**. v. 47, n. 1–2, p. 27–36, 1998.

Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, *HYDRUS Software Series 3*, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 343, 2013.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; ŠEJNA, M. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. **Vadose Zone Journal**. v. 15, n. 7, p. 1–25, 2016.

SMITH, D. R. Permeable Interlocking Concrete Pavements. 3. ICPI, 2006.
SOUZA, M. L. De. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR.DITC, 1981.

SOUZA, V. C. B. de; MORAES, L. R. S.; BORJA, P. C. Déficit Na Drenagem Urbana: Buscando O Entendimento E Contribuindo Para a Definição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**. v. 1, n. 2, p. 162, 2013.

SURIPIN, S. et al. Reducing Stormwater Runoff from Parking Lot with Permeable Pavement. **E3S Web of Conferences**. v. 73, p. 10–14, 2018.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Estudo Do Clima Do Município De Pato Branco, Paraná. **Synergismus scyentifica UTFPR**. v. 3, n. 4, p. 3–5, 2008.

TANG, S. et al. Robustness analysis of storm water quality modelling with LID infrastructures from natural event-based field monitoring. **Science of the Total Environment**. v. 753, p. 142007, 2021.

TEIXEIRA, G. da S. et al. Metodologias para Caracterização e Avaliação de Sistemas de Drenagem urbana: uma revisão. **Research, Society and Development**. v. 9, n. 4, 2020.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. In: ESTUDOS AVANÇADOS. 2008. v. 22, p. 97–112.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações e drenagem urbana. Inundações Urbanas na América do Sul**. 1ª ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TURCO, M. *et al.* Unsaturated hydraulic behaviour of a permeable pavement: Laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model. **Journal of Hydrology**. v. 554, p. 780–791, 2017.

USDA – NRCS. Chapter 10: estimation of direct runoff from storm rainfall. In **National Engineering Handbook**: Part 630 Hydrology. 2004. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Washington DC.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VAZ, C. M. P., & MOURA, R. A. Effect of antecedent soil moisture conditions on storm runoff. **Water Resources Management**, 28(12), 4271-4283, 2014.

YU, H. *et al.* Spatiotemporal variance assessment of urban rainstorm waterlogging affected by impervious surface expansion: A case study of Guangzhou, China. **Sustainability (Switzerland)**. v. 10, n. 10, 2018.

ZHANG, S.; GUO, Y. SWMM Simulation of the Storm Water Volume Control Performance of Permeable Pavement Systems. **JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING**. v. 20, p. 946–954, 2015.

ZHOU, Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. **Water (Switzerland)** v. 6, n. 4, p. 976–992, 2014.

ZOPE, P. E.; ELDHO, T. I.; JOTHIPRAKASH, V. Impacts of land use-land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. **Catena**. v. 145, p. 142–154, 2016.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA CAMADA DE ASSENTAMENTO

A.1 Composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica do material de assentamento foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os dados obtidos mostraram que o material analisado (pedrisco) possui um módulo de finura de 2,98 e dimensão máxima de 6,5 mm (Tabela 10).

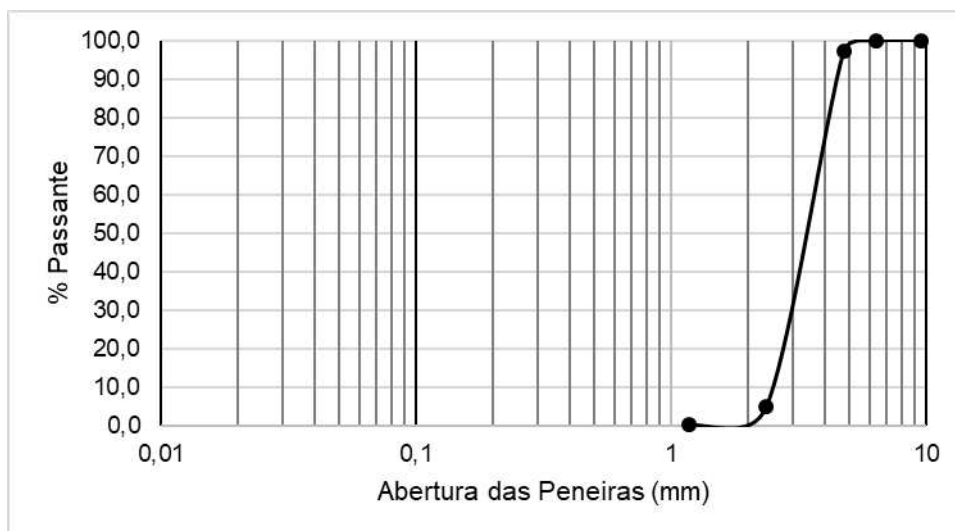
Tabela 10: Composição granulométrica do material de assentamento.

| Abertura da peneira (mm) | M1 | M2 | M3 | Média | | | Fração passante acumulada (%) |
|------------------------------------|---------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|--|
| | Massa | Massa | Massa | Massa | Fração | Fração retida | |
| | retida (g) | retida (g) | retida (g) | retida (g) | retida (%) | acumulada (%) | |
| 9,5 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00% | 0,00% | 100,00 |
| 6,35 | 8,7 | 1,5 | 5,7 | 5,30 | 0,27% | 0,27% | 99,73 |
| 4,75 | 45 | 37,6 | 76,8 | 53,13 | 2,66% | 2,92% | 97,08 |
| 2,36 | 1841,4 | 1878,2 | 1800,2 | 1839,93 | 92,06% | 94,98% | 5,02 |
| 1,18 | 101,3 | 79,3 | 112,5 | 97,70 | 4,89% | 99,87% | 0,13 |
| 0 | 2 | 3,3 | 2,5 | 2,60 | 0,13% | 100,00% | 0,00 |
| Somatório | 1998,4 | 1999,9 | 1997,7 | 1998,7 | 1,0 | | |
| Massa inicial | 2000,0 | 2000,0 | 2000,0 | 2000,0 | | | |
| Módulo de Finura: | 2,98 | | | | | | |
| Dimensão máxima característica: | 6,5 mm | | | | | | |

Fonte: Autoria Própria (2022).

O gráfico da distribuição granulométrica, apresentado na Figura 28, ilustra os valores ensaiados para o pedrisco utilizada como material de assentamento. Na Figura 29 estão os limites recomendados para a distribuição granulométrica do material de assentamento dos pavimentos permeáveis especificados pela Tabela 11 da NBR 16416 (ABNT, 2015).

Figura 28: Curva Granulométrica da camada de assentamento (Pedrisco).



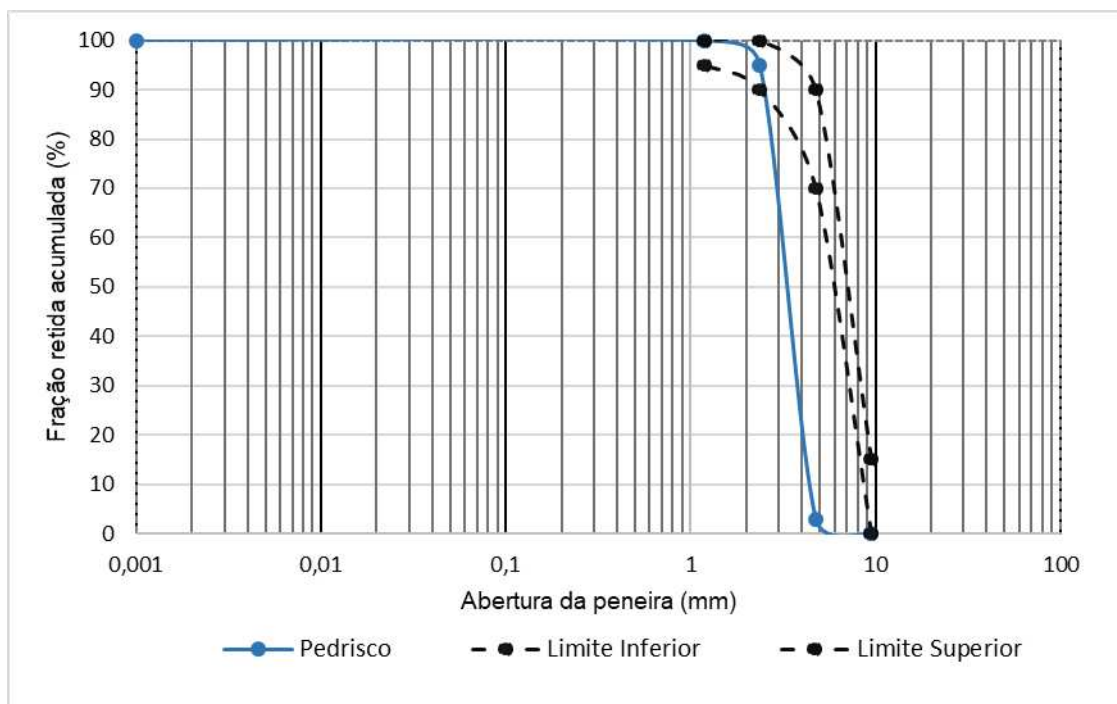
Fonte: Autoria Própria (2022).

Tabela 11: Distribuição recomendada para o material de assentamento

| Peneira com abertura de malha | Porcentagem retida, em massa % |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 12,5 mm | 0 |
| 9,5 mm | 0 a 15 |
| 4,75 mm | 70 a 90 |
| 2,36 mm | 90 a 100 |
| 1,16 mm | 95 a 100 |

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

Figura 29: Comparação entre a Curva granulométrica do material de assentamento e limites aceitáveis da ABNT NBR 16416/2015.



A.2 Massa Específica Aparente

A determinação da massa específica aparente para as amostras do pedrisco, utilizada na camada de assentamento, foi determinada pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). A Tabela 12 apresenta os resultados do ensaio, onde se observa que a massa específica aparente média do pedrisco é de $2,881 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 12: Massa específica aparente do material de assentamento (Pedrisco).

| Amostra | Saturada (g) | Massa em água (g) | Massa seca (g) | Massa específica do agregado seco (g) | Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca (g) | Massa específica aparente (g) |
|----------|--------------|-------------------|----------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|
| Pedrisco | 881,05 | 321,11 | 500 | 2,795 | 2,825 | 2,881 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

A.3 Massa Unitária

O ensaio da massa unitária foi realizado conforme orientado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). O material de assentamento, ensaiado em um recipiente de massa de 500,00 g, possui uma massa unitária de 1557,10 kg/m³ (Tabela 13).

Tabela 13: Massa unitária do material de assentamento (Pedrisco).

| Símbolo | Descrição | Unidade | Valor |
|---------|--------------------------------|-------------------|----------|
| m | Massa do recipiente + agregado | Kg | 0,5598 |
| m_r | Massa do recipiente vazio | Kg | 0,0598 |
| V | Volume do recipiente | m ³ | 0,000321 |
| ρ | Massa unitária | Kg/m ³ | 1557,10 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

A.4 Índice de volume de vazios

Os resultados do ensaio de índice de volume de vazios para o pedrisco são ilustrados na Tabela 14.

Tabela 14: Índice de volume de vazios do material de assentamento (Pedrisco).

| Amostra | Massa Específica do Agregado seco (g/cm ³) | Índice de Vazios (%) |
|----------|--|----------------------|
| Pedrisco | 2,825 | 44,29 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA CAMADA DE ARMAZENAMENTO

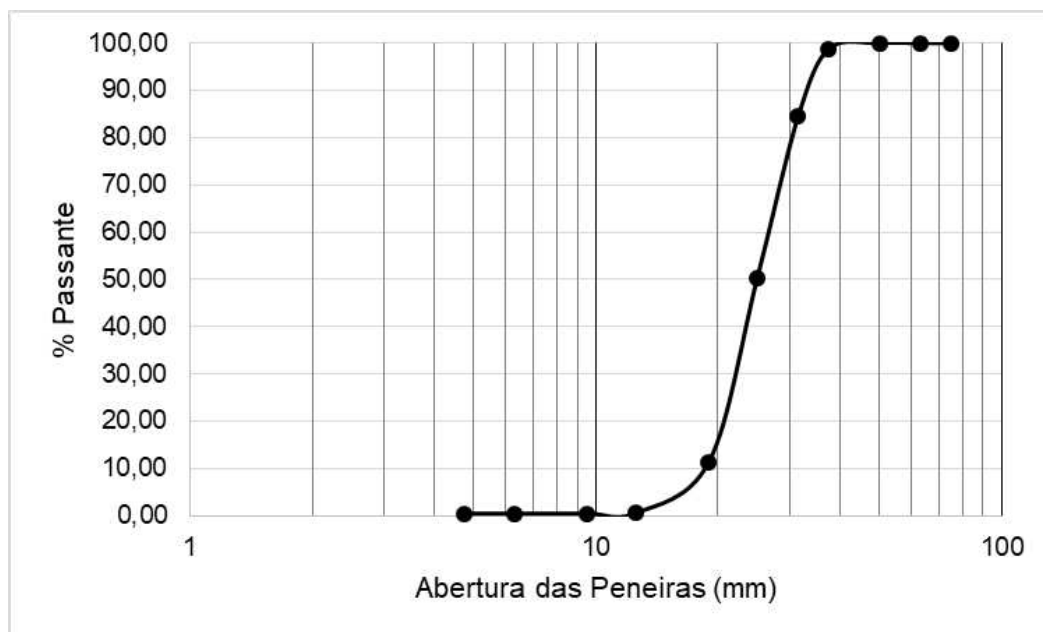
O ensaio de composição granulométrica do material de assentamento foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os dados obtidos mostraram que o material analisado (brita) possui um módulo de finura de 6,53 e dimensão máxima de 37,5 mm (Tabela 15).

Tabela 15: Composição granulométrica do material de armazenamento.

| Abertura da peneira (mm) | M1 | M2 | M3 | Média | | | |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Massa retida (g) | Massa retida (g) | Massa retida (g) | Massa retida (g) | Fração retida (%) | Fração retida acumulada (%) | Fração passante acumulada (%) |
| 75 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 63 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 37,5 | 71,00 | 0 | 0 | 23,67 | 1,18 | 1,18 | 98,82 |
| 31,5 | 154,50 | 377,50 | 329,80 | 287,27 | 14,39 | 15,57 | 84,43 |
| 25 | 732,50 | 675,50 | 631,90 | 679,97 | 34,06 | 49,63 | 50,37 |
| 19 | 844,50 | 715,50 | 772,80 | 777,60 | 38,96 | 88,59 | 11,41 |
| 12,5 | 190,00 | 221,50 | 238,90 | 216,80 | 10,86 | 99,45 | 0,55 |
| 9,5 | 3,00 | 0 | 0 | 1,00 | 0,05 | 99,50 | 0,50 |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 99,50 | 0,50 |
| 4,75 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 99,50 | 0,50 |
| 0,0 | 3,00 | 9,00 | 17,20 | 9,73 | 0,49 | 100,00 | 0,00 |
| Somatório | 1998,5 | 1990,0 | 1973,4 | 1986,3 | 100,0 | | |
| Massa inicial | 2000,0 | 2000,0 | 2000,0 | | | | |
| Módulo de Finura: | | 6,53 | | | | | |
| Dimensão máxima característica: | | 37,5 | | | | | |

Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 30: Curva Granulométrica da camada de armazenamento (Brita).



Fonte: Autoria Própria (2022).

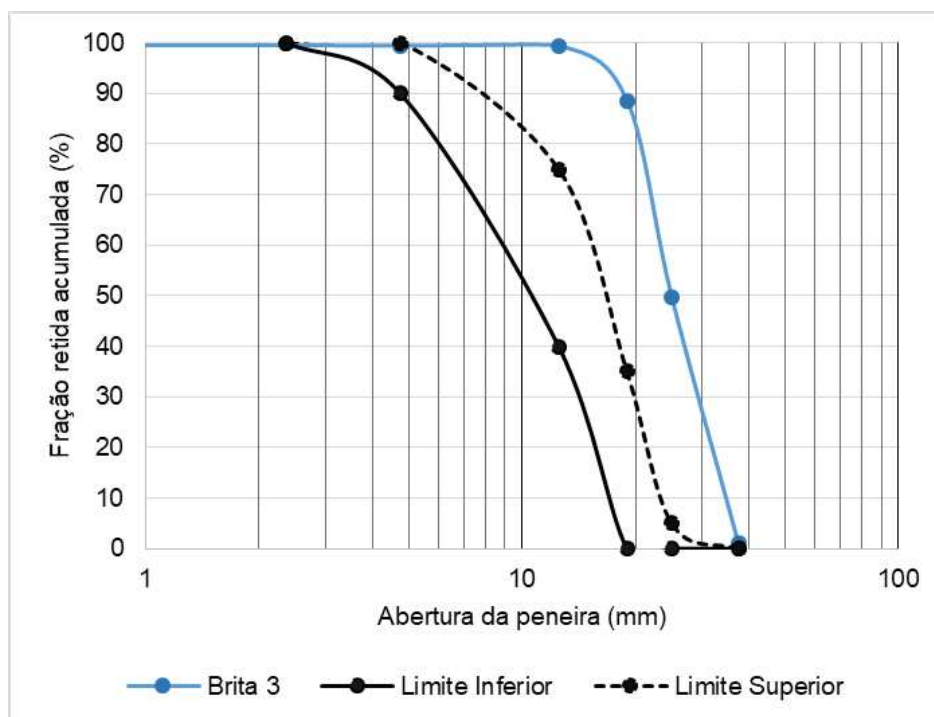
Tabela 16: Distribuição granulométrica recomendada para o material de armazenamento.

| Peneira com abertura de malha | Porcentagem retida em, em massa | |
|-------------------------------|---------------------------------|----------|
| | Sub-base | Base |
| 75 mm | 0 | |
| 63 mm | 0 a 10 | |
| 50 mm | 30 a 65 | |
| 37,5 mm | 85 a 100 | 0 |
| 25 mm | 90 a 100 | 0 a 5 |
| 19 mm | 95 a 100 | 0 a 35 |
| 12,5 mm | | 40 a 75 |
| 4,75 mm | | 90 a 100 |
| 2,36 mm | | 95 a 100 |

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

Para o gráfico da Figura 31, foi utilizado os limites referentes a base (Tabela 16) devido à dimensão máxima do agregado ser de 37,5 mm.

Figura 31: Comparação entre a Curva granulométrica do material de armazenamento e limites aceitáveis da ABNT NBR 16416/2015.



Fonte: Autoria Própria (2022).

B.2 Massa Específica Aparente

A determinação da massa específica aparente para as amostras de brita, utilizada na camada de armazenamento, foi determinada pela NBR NM 52 (ABNT, 2003). A Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio, onde se observa que a massa específica aparente média da areia é de $2,91 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 17: Massa específica aparente do material de armazenamento

| Amostra | Saturada (g) | Massa em água (g) | Massa seca (g) | Massa específica do agregado seco (g/cm^3) | Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3) | Massa específica aparente (g/cm^3) |
|---------|--------------|-------------------|----------------|---|---|---|
| Brita | 2005 | 1313,3 | 2000 | 2,89 | 2,90 | 2,9125 |

Fonte: Autoria Própria (2022).

B.3 Massa Unitária

O ensaio da massa unitária foi realizado conforme orientado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). O material de armazenamento, ensaiado em um recipiente de massa de 482,5 g, possui uma massa unitária de 1665,98 kg/m³ (Tabela 18); e a Tabela 19 apresenta o Índice de volume de vazios.

Tabela 18: Massa Unitária do material da camada de armazenamento (Brita).

| Símbolo | Descrição | Un. | Valor |
|----------------------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| <i>m</i> | Massa do recipiente + agregado | Kg | 7,15 |
| <i>m_r</i> | Massa do recipiente vazio | Kg | 0,48 |
| <i>V</i> | Volume do recipiente | m ³ | 0,00 |
| <i>ρ</i> | Massa unitária | Kg/m ³ | 1665,98 |

Fonte: Autoria Própria (2022).

B.4 Índice de volume de vazios

Os resultados do ensaio de índice de volume de vazios para a brita são ilustrados na Tabela 19.

Tabela 19: Índice de volume de vazios do material da camada de armazenamento (Brita).

| Amostra | Massa específica do agregado seco (g/cm³) | Índice de vazios (%) |
|----------------|---|-----------------------------|
| Brita | 2,89 | 42,38 |

Fonte: Autoria Própria (2022).

Tabela 20: Resultados dos ensaios dos materiais das camadas de assentamento (pedrisco) e armazenamento (brita).

| Ensaio | Camadas | |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | Pedrisco | Brita nº 3 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,88 | 2,91 |
| Massa unitária (kg/m ³) | 1557,10 | 1665,98 |
| Índice de vazios (%) | 44,29 | 42,38 |
| D _{máx} (mm) | 6,53 | 37,50 |

Fonte: Autoria Própria, (2023).

APÊNDICE C – ALTURAS DE DRENAGEM OBSERVADAS EXPERIMENTALMENTE E SIMULADAS PELO HYDRUS-1D

E.1 Eventos de chuva referentes ao conjunto de dados da fase de calibração. Os dados dos drenos convencional e poroso são os valores observados experimentalmente, os dados da simulação direta foram modelados com os parâmetros hidráulicos da literatura e a simulação inversa corresponde a cada camada do sistema de pavimentos permeáveis, revestimento, assentamento e armazenamento.

Tabela 21: Evento de chuva do dia 06 de outubro de 2022.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,28 | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | 0,55 | 0,16 | 0,24 | 0,13 |
| 0,26 | 0,65 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,26 | 0,65 | 0,28 | 0,36 | 0,26 |
| 0,44 | 1,19 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,48 | 1,19 | 0,69 | 0,76 | 0,62 |
| 1,17 | 1,90 | 1,10 | 1,09 | 1,09 | 1,27 | 1,90 | 1,41 | 1,48 | 1,34 |
| 1,67 | 2,31 | 1,54 | 1,51 | 1,51 | 1,81 | 2,31 | 1,86 | 1,94 | 1,81 |
| 3,03 | 4,05 | 3,19 | 3,23 | 3,23 | 3,27 | 4,05 | 3,50 | 3,55 | 3,35 |
| 4,19 | 4,80 | 4,00 | 3,99 | 3,99 | 4,54 | 4,80 | 4,32 | 4,39 | 4,24 |
| 4,54 | 5,17 | 4,41 | 4,37 | 4,37 | 5,07 | 5,17 | 4,73 | 4,80 | 4,68 |
| 4,54 | 5,37 | 4,64 | 4,58 | 4,59 | 5,24 | 5,37 | 4,97 | 5,05 | 4,94 |
| 4,52 | 5,46 | 4,75 | 4,69 | 4,69 | 5,25 | 5,46 | 5,10 | 5,17 | 5,08 |
| 4,53 | 5,51 | 4,82 | 4,75 | 4,76 | 5,30 | 5,51 | 5,16 | 5,25 | 5,16 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 22: Evento de chuva do dia 20 de outubro de 2022.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1ª | 2ª | 3ª | | | 1ª | 2ª | 3ª |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,41 | 0,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,31 | 0,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,81 | 0,86 | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,78 | 0,86 | 0,46 | 0,46 | 0,46 |
| 1,10 | 1,13 | 0,59 | 0,57 | 0,56 | 1,09 | 1,13 | 0,81 | 0,81 | 0,81 |
| 1,14 | 1,28 | 0,79 | 0,78 | 0,77 | 1,24 | 1,28 | 1,04 | 1,03 | 1,03 |
| 1,12 | 1,33 | 0,88 | 0,88 | 0,87 | 1,28 | 1,33 | 1,15 | 1,15 | 1,14 |
| 1,05 | 1,36 | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 1,25 | 1,36 | 1,21 | 1,21 | 1,21 |
| 1,09 | 1,37 | 0,97 | 0,96 | 0,97 | 1,30 | 1,37 | 1,25 | 1,25 | 1,25 |
| 1,13 | 1,38 | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 1,37 | 1,39 | 1,28 | 1,28 | 1,28 |
| 1,17 | 1,40 | 1,02 | 1,01 | 1,02 | 1,40 | 1,40 | 1,31 | 1,30 | 1,30 |
| 1,11 | 1,45 | 1,03 | 1,03 | 1,04 | 1,36 | 1,45 | 1,33 | 1,32 | 1,32 |
| 1,13 | 1,56 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,35 | 1,56 | 1,36 | 1,36 | 1,36 |
| 1,18 | 1,64 | 1,16 | 1,15 | 1,15 | 1,42 | 1,64 | 1,45 | 1,44 | 1,44 |
| 1,14 | 1,70 | 1,23 | 1,22 | 1,22 | 1,41 | 1,70 | 1,52 | 1,52 | 1,52 |
| 1,32 | 1,88 | 1,33 | 1,32 | 1,31 | 1,54 | 1,89 | 1,60 | 1,59 | 1,59 |
| 1,75 | 2,41 | 1,82 | 1,79 | 1,75 | 1,94 | 2,41 | 1,96 | 1,95 | 1,95 |
| 2,11 | 2,91 | 2,32 | 2,30 | 2,27 | 2,36 | 2,91 | 2,49 | 2,48 | 2,48 |
| 2,56 | 3,27 | 2,71 | 2,69 | 2,67 | 2,85 | 3,27 | 2,91 | 2,90 | 2,91 |
| 2,81 | 3,56 | 3,00 | 2,99 | 2,98 | 3,14 | 3,56 | 3,22 | 3,22 | 3,22 |
| 3,18 | 4,01 | 3,42 | 3,40 | 3,37 | 3,49 | 4,01 | 3,58 | 3,58 | 3,58 |
| 3,41 | 4,30 | 3,76 | 3,74 | 3,73 | 3,77 | 4,30 | 3,98 | 3,98 | 3,98 |
| 3,51 | 4,44 | 3,95 | 3,93 | 3,92 | 3,96 | 4,44 | 4,19 | 4,19 | 4,19 |
| 3,54 | 4,48 | 4,04 | 4,03 | 4,02 | 4,06 | 4,48 | 4,30 | 4,30 | 4,30 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 23: Evento de chuva do dia 29 de outubro de 2022.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1ª | 2ª | 3ª | | | 1ª | 2ª | 3ª |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,23 | 1,24 | 0,78 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 1,24 | 0,41 | 0,41 | 0,42 |
| 1,32 | 2,04 | 1,59 | 0,69 | 0,72 | 1,42 | 2,04 | 1,27 | 1,29 | 1,32 |
| 1,65 | 2,31 | 1,91 | 1,00 | 1,00 | 1,95 | 2,31 | 1,67 | 1,70 | 1,75 |
| 2,35 | 3,68 | 3,22 | 2,35 | 2,37 | 2,71 | 3,68 | 2,84 | 2,84 | 2,84 |
| 3,70 | 4,79 | 4,33 | 3,44 | 3,47 | 4,25 | 4,79 | 3,98 | 4,00 | 4,02 |
| 4,17 | 5,51 | 5,06 | 4,15 | 4,18 | 4,74 | 5,51 | 4,74 | 4,75 | 4,79 |
| 4,55 | 5,98 | 5,54 | 4,63 | 4,64 | 5,34 | 5,98 | 5,24 | 5,26 | 5,31 |
| 4,57 | 6,20 | 5,79 | 4,88 | 4,87 | 5,52 | 6,20 | 5,54 | 5,57 | 5,62 |
| 4,56 | 6,28 | 5,89 | 4,99 | 4,98 | 5,60 | 6,28 | 5,67 | 5,70 | 5,75 |
| 4,55 | 6,32 | 5,95 | 5,05 | 5,03 | 5,67 | 6,32 | 5,74 | 5,78 | 5,83 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 24: Evento de chuva do dia 13 de novembro de 2022.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 1ª camada otimizada | 2ª camada otimizada | 3ª camada otimizada | | | 1ª camada otimizada | 2ª camada otimizada | 3ª camada otimizada |
| Convencional (cm) | direta (cm) | | | | Poroso (cm) | direta (cm) | | | |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,13 | 0,24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,36 | 0,74 | 0,08 | 0,11 | 0,13 | 0,21 | 0,74 | 0,14 | 0,15 | 0,13 |
| 0,81 | 1,39 | 0,71 | 0,75 | 0,72 | 0,71 | 1,39 | 0,75 | 0,76 | 0,74 |
| 1,48 | 2,10 | 1,42 | 1,46 | 1,43 | 1,47 | 2,10 | 1,46 | 1,47 | 1,45 |
| 2,55 | 3,38 | 2,68 | 2,71 | 2,60 | 2,66 | 3,38 | 2,66 | 2,67 | 2,65 |
| 3,13 | 3,71 | 3,14 | 3,18 | 3,20 | 3,32 | 3,71 | 3,27 | 3,28 | 3,27 |
| 3,18 | 3,77 | 3,24 | 3,28 | 3,33 | 3,36 | 3,77 | 3,41 | 3,41 | 3,40 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 25: Evento de chuva do dia 01 de dezembro de 2022.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | 1ª camada otimizada | 2ª camada otimizada | 3ª camada otimizada | | | 1ª camada otimizada | 2ª camada otimizada | 3ª camada otimizada |
| Convencional (cm) | direta (cm) | | | | Poroso (cm) | direta (cm) | | | |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,36 | 2,69 | 1,42 | 1,38 | 1,38 | 1,42 | 2,69 | 1,75 | 1,65 | 1,65 |
| 2,67 | 3,35 | 2,53 | 2,51 | 2,50 | 2,95 | 3,35 | 2,84 | 2,80 | 2,80 |
| 2,82 | 3,53 | 2,85 | 2,83 | 2,83 | 3,24 | 3,53 | 3,13 | 3,11 | 3,11 |
| 2,90 | 3,58 | 3,01 | 2,99 | 2,99 | 3,41 | 3,58 | 3,25 | 3,24 | 3,24 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 26: Evento de chuva do dia 19 de dezembro de 2022.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1ª | 2ª | 3ª | | | 1ª | 2ª | 3ª |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| 0,03 | 0,18 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,18 | 0,11 | 0,25 | 0,25 |
| 0,68 | 1,42 | 0,94 | 0,95 | 0,82 | 0,62 | 1,42 | 1,06 | 1,03 | 1,03 |
| 1,97 | 2,04 | 1,78 | 1,79 | 1,71 | 2,07 | 2,04 | 1,90 | 1,87 | 1,88 |
| 2,32 | 2,38 | 2,19 | 2,20 | 2,12 | 2,50 | 2,38 | 2,30 | 2,36 | 2,36 |
| 2,47 | 2,55 | 2,44 | 2,45 | 2,39 | 2,75 | 2,55 | 2,54 | 2,64 | 2,64 |
| 2,51 | 2,60 | 2,56 | 2,57 | 2,51 | 2,90 | 2,60 | 2,64 | 2,76 | 2,76 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 27: Evento de chuva do dia 18 de janeiro de 2023.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1ª | 2ª | 3ª | | | 1ª | 2ª | 3ª |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,83 | 1,27 | 1,10 | 0,76 | 0,87 | 0,77 | 1,27 | 0,81 | 0,75 | 0,84 |
| 1,76 | 1,72 | 1,68 | 1,66 | 1,73 | 1,81 | 1,72 | 1,70 | 1,68 | 1,78 |
| 1,96 | 1,88 | 1,87 | 1,93 | 1,98 | 1,99 | 1,88 | 2,00 | 2,01 | 2,07 |
| 2,12 | 2,02 | 2,01 | 2,10 | 2,14 | 2,20 | 2,02 | 2,16 | 2,19 | 2,24 |
| 2,22 | 2,10 | 2,09 | 2,20 | 2,23 | 2,32 | 2,10 | 2,28 | 2,30 | 2,32 |
| 2,27 | 2,16 | 2,14 | 2,26 | 2,28 | 2,40 | 2,16 | 2,34 | 2,35 | 2,37 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 28: Evento de chuva do dia 19 de janeiro de 2023.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1ª | 2ª | 3ª | | | 1ª | 2ª | 3ª |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,10 | 1,70 | 1,34 | 1,10 | 1,10 | 1,09 | 1,70 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |
| 1,86 | 2,12 | 1,99 | 1,84 | 1,84 | 1,99 | 2,12 | 1,94 | 1,96 | 1,96 |
| 1,94 | 2,17 | 2,07 | 1,95 | 1,95 | 2,11 | 2,17 | 2,08 | 2,09 | 2,09 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 29: Evento de chuva do dia 22 de janeiro de 2023.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,37 | 0,35 | 0,44 | 0,38 | 0,38 | 0,26 | 0,35 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| 0,74 | 0,68 | 0,76 | 0,72 | 0,73 | 0,64 | 0,68 | 0,65 | 0,65 | 0,65 |
| 0,81 | 0,78 | 0,85 | 0,82 | 0,82 | 0,77 | 0,78 | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| 0,85 | 0,83 | 0,89 | 0,86 | 0,86 | 0,81 | 0,83 | 0,81 | 0,81 | 0,81 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 30: Evento de chuva do dia 02 de fevereiro de 2023.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,03 | 0,14 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,14 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| 0,63 | 0,50 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,48 | 0,50 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| 0,70 | 0,69 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,61 | 0,69 | 0,56 | 0,56 | 0,56 |
| 0,68 | 0,79 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,59 | 0,79 | 0,64 | 0,64 | 0,64 |
| 0,71 | 0,84 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,64 | 0,84 | 0,67 | 0,67 | 0,68 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 31: Evento de chuva do dia 03 de fevereiro de 2023.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,46 | 0,70 | 0,43 | 0,45 | 0,45 | 0,37 | 0,70 | 0,36 | 0,35 | 0,35 |
| 0,95 | 1,09 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 0,88 | 1,09 | 0,90 | 0,89 | 0,89 |
| 1,08 | 1,20 | 1,06 | 1,07 | 1,07 | 1,02 | 1,20 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| 1,14 | 1,26 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,26 | 1,13 | 1,13 | 1,13 |
| 1,32 | 1,54 | 1,33 | 1,34 | 1,34 | 1,28 | 1,54 | 1,29 | 1,29 | 1,29 |
| 1,61 | 1,77 | 1,62 | 1,63 | 1,63 | 1,57 | 1,77 | 1,60 | 1,60 | 1,60 |
| 1,71 | 1,82 | 1,70 | 1,70 | 1,70 | 1,71 | 1,82 | 1,69 | 1,69 | 1,69 |
| 1,74 | 1,86 | 1,74 | 1,74 | 1,75 | 1,78 | 1,86 | 1,75 | 1,74 | 1,74 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 32: Evento de chuva do dia 14 de fevereiro de 2023.

| Dreno | Simulação | Simulação inversa | | | Dreno | Simulação | Simulação inversa | | |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | | | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a |
| Convencional (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada | Poroso (cm) | direta (cm) | camada otimizada | camada otimizada | camada otimizada |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,17 | 0,26 | 0,00 | 0,08 | 0,07 | 0,10 | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,51 | 0,70 | 0,37 | 0,48 | 0,47 | 0,38 | 0,70 | 0,38 | 0,38 | 0,38 |
| 0,71 | 0,89 | 0,58 | 0,67 | 0,65 | 0,61 | 0,89 | 0,61 | 0,61 | 0,61 |
| 0,77 | 0,97 | 0,67 | 0,76 | 0,74 | 0,72 | 0,97 | 0,72 | 0,72 | 0,73 |
| 0,82 | 1,04 | 0,74 | 0,82 | 0,80 | 0,80 | 1,04 | 0,79 | 0,79 | 0,80 |
| 0,95 | 1,14 | 0,85 | 0,93 | 0,91 | 0,88 | 1,14 | 0,89 | 0,89 | 0,89 |
| 1,12 | 1,43 | 1,09 | 1,22 | 1,19 | 1,04 | 1,43 | 1,09 | 1,08 | 1,09 |
| 1,41 | 1,64 | 1,34 | 1,44 | 1,42 | 1,37 | 1,64 | 1,37 | 1,36 | 1,37 |
| 1,49 | 1,69 | 1,41 | 1,49 | 1,48 | 1,51 | 1,69 | 1,46 | 1,45 | 1,46 |
| 1,51 | 1,72 | 1,46 | 1,53 | 1,51 | 1,55 | 1,72 | 1,51 | 1,50 | 1,51 |
| 1,52 | 1,78 | 1,50 | 1,57 | 1,56 | 1,54 | 1,78 | 1,56 | 1,56 | 1,56 |
| 1,52 | 1,82 | 1,55 | 1,62 | 1,60 | 1,55 | 1,82 | 1,61 | 1,60 | 1,61 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

APÊNDICE D – PARÂMETROS HIDRÁULICOS OTIMIZADOS PARA O PP COM REVESTIMENTO CONVENCIONAL E POROSO

Tabela 33: Valores otimizados dos parâmetros hidráulicos dos materiais para as camadas de revestimento, assentamento e armazenamento do PP com revestimento convencional (RC).

| Eventos de Chuva | Camadas | Valores dos Parâmetros | | | | |
|------------------|---------------|---|---|------------------------------|-------|-------------------------------|
| | | θ_r (cm ³ .cm ⁻³) | θ_s (cm ³ .cm ⁻³) | α (cm ⁻¹) | n (-) | K_s (cm.min ⁻¹) |
| 1 | Revestimento | 0,04 | 0,34 | 25,24 | 1,31 | 5,11 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,41 | 0,14 | 2,09 | 243,17 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,02 | 0,09 | 1,54 | 116,55 |
| 2 | Revestimento | 0,00 | 0,23 | 9,49 | 1,24 | 0,05 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,40 | 0,27 | 2,00 | 34,63 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,44 | 1,88 | 114,05 |
| 2 | Revestimento | 0,00 | 0,17 | 10,13 | 1,14 | 1,33 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,68 | 0,02 | 1,77 | 274,67 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,18 | 3,34 | 150,47 |
| 4 | Revestimento | 0,00 | 0,20 | 7,03 | 1,33 | 0,14 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,39 | 0,25 | 2,25 | 36,42 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,02 | 0,26 | 1,05 | 83,85 |
| 5 | Revestimento | 0,00 | 0,31 | 0,64 | 2,06 | 0,13 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,40 | 0,26 | 2,01 | 43,05 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,26 | 2,42 | 77,17 |
| 6 | Revestimento | 0,13 | 0,40 | 0,24 | 3,59 | 1,11 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,70 | 0,23 | 3,58 | 4,10 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,23 | 1,10 | 44,83 |
| 7 | Revestimento | 0,00 | 0,19 | 0,39 | 1,34 | 2,56 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,55 | 0,08 | 5,78 | 73,30 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,26 | 2,42 | 106,97 |
| 8 | Revestimento | 0,00 | 0,21 | 3,90 | 2,14 | 1,71 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,44 | 0,22 | 1,93 | 14,29 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,41 | 97,22 |
| 9 | Revestimento | 0,01 | 0,07 | 2,48 | 1,92 | 6,32 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,42 | 0,26 | 1,98 | 39,42 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,25 | 2,36 | 72,12 |
| 10 | Revestimento | 0,04 | 0,11 | 5,37 | 1,13 | 0,55 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,40 | 0,27 | 2,00 | 69,27 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,41 | 96,70 |
| 11 | Revestimento | 0,00 | 0,16 | 6,31 | 1,75 | 1,66 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,35 | 0,26 | 1,93 | 55,62 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,38 | 92,42 |
| 12 | Revestimento | 0,01 | 0,14 | 2,95 | 1,29 | 0,11 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,18 | 0,16 | 2,09 | 322,67 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,60 | 95,60 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 34: Valores otimizados dos parâmetros hidráulicos dos materiais para as camadas de revestimento, assentamento e armazenamento do PP com revestimento poroso (RP).

| Eventos de Chuva | Camadas | Valores dos Parâmetros | | | | |
|------------------|---------------|---|---|------------------------------|-------|-------------------------------|
| | | θ_r (cm ³ .cm ⁻³) | θ_s (cm ³ .cm ⁻³) | α (cm ⁻¹) | n (-) | K_s (cm.min ⁻¹) |
| 1 | Revestimento | 0,00 | 0,21 | 2,22 | 1,32 | 1,03 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,63 | 0,25 | 3,01 | 63,90 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,32 | 2,77 | 22,85 |
| 2 | Revestimento | 0,00 | 0,30 | 0,31 | 2,96 | 0,57 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,77 | 0,64 | 2,24 | 150,80 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,41 | 101,55 |
| 3 | Revestimento | 0,00 | 0,26 | 9,08 | 1,30 | 0,79 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,45 | 0,35 | 2,14 | 51,80 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,37 | 1,14 | 78,68 |
| 4 | Revestimento | 0,00 | 0,21 | 7,45 | 2,03 | 0,10 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,40 | 0,27 | 2,01 | 81,13 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,28 | 2,44 | 92,98 |
| 5 | Revestimento | 0,00 | 0,37 | 0,25 | 2,06 | 1,05 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,44 | 0,32 | 2,10 | 33,02 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,34 | 101,07 |
| 6 | Revestimento | 0,04 | 0,59 | 0,16 | 4,48 | 4,57 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,02 | 0,49 | 1,67 | 5,87 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,00 | 0,42 | 1,00 | 43,50 |
| 7 | Revestimento | 0,00 | 0,11 | 0,49 | 2,02 | 1,47 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,68 | 0,08 | 6,57 | 62,57 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,25 | 2,27 | 45,63 |
| 8 | Revestimento | 0,01 | 0,27 | 0,53 | 1,70 | 4,79 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,48 | 0,24 | 2,41 | 37,07 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,22 | 1,10 | 29,83 |
| 9 | Revestimento | 0,02 | 0,15 | 0,91 | 2,00 | 2,25 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,42 | 0,29 | 2,01 | 63,02 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 2,49 | 109,70 |
| 10 | Revestimento | 0,04 | 0,14 | 38,93 | 1,16 | 1,32 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,41 | 0,25 | 1,95 | 73,23 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,16 | 1,90 | 70,10 |
| 11 | Revestimento | 0,01 | 0,19 | 1,60 | 1,95 | 1,54 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,44 | 0,29 | 2,09 | 43,08 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,41 | 2,27 | 166,83 |
| 12 | Revestimento | 0,01 | 0,15 | 0,40 | 1,57 | 0,09 |
| | Assentamento | 0,00 | 0,41 | 0,27 | 2,00 | 76,88 |
| | Armazenamento | 0,00 | 0,01 | 0,30 | 2,41 | 171,83 |

Fonte: Autoria Própria (2023).

ANEXO A – LAUDO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO BLOCO POROSO

| | | |
|---|---|-----|
|  Associação Brasileira de Cimento Portland | ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 123230 | 1/4 |
| | Interessado: Pisos Pavimenti EIRELI - EPP Endereço: Rod. PR 483 KM 01 S/N - Francisco Beltrão / PR Referência: Orçamento 84025 | |

| | |
|--|------------------------------------|
| Amostra nº: 221614 | Data de entrada: 07/06/2019 |
| Material declarado: Peças de concreto permeável para pavimentação | |
| Objetivo: Determinação do coeficiente de permeabilidade | |

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade referentes a uma amostra de peças de concreto permeável para pavimentação. Os ensaios foram realizados por constituir parte dos ensaios do Selo de Qualidade ABCP. A amostra recebeu as seguintes identificações:

| ABCP | Interessado | |
|--------|--------------------------|------------|
| 221614 | Data da coleta: | 29/05/2019 |
| | Data de fabricação: | 26/04/2019 |
| | Classe de resistência: | 20 MPa |
| | Modelo: | Retangular |
| | Dimensões nominais (cm): | 20x10x6 |
| | Identificação do lote: | 26/04/2019 |

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br



2. MÉTODOS DE ENSAIO E DOCUMENTOS REFERENCIADOS

ABNT NBR 16416:2015 – Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos

3. METODOLOGIA

O coeficiente de permeabilidade mede a velocidade de percolação de água e tem relação com a tendência da água infiltrar ou escoar superficialmente. Para medir o coeficiente de permeabilidade de um pavimento intertravado permeável constituído de peças de concreto, utilizou-se o método descrito pela Norma ABNT/NBR 16416/2015.

Para a aplicação do método em laboratório, as condições de execução de um pavimento permeável em campo foram reproduzidas por meio da montagem de uma seção do pavimento com área de 0,6 m² de superfície. As peças foram instaladas sobre uma estrutura confinada de pavimento contendo base granular e camada de assentamento, ambas com granulometria aberta sem finos.

4. METODO DE ENSAIO

O procedimento consistiu em posicionar um cilindro com diâmetro de (300 mm) ± 10 mm sobre o pavimento. Atentou-se para que não ocorressem vazamentos de água para fora da área interna do cilindro. Antes da realização do ensaio, efetuou-se a pré-molhagem para determinação do volume de água a ser utilizado no ensaio, com saturação da área de ensaio. Na pré-molhagem utilizou-se 3,6kg de água e mediu-se o tempo de infiltração. A metodologia especifica que caso a infiltração da pré-molhagem ocorra em um tempo inferior a 30s, deve se utilizar (18±0,05)kg de água; caso o tempo seja igual ou superior a 30s utilizam-se (3,6 ± 0,05)kg de água para determinar o coeficiente de permeabilidade.

O ensaio deve ser iniciado em até dois minutos após a pré-molhagem. O volume de água determinado pelo tempo da pré-molhagem deve ser vertido no interior do cilindro mantendo-se uma coluna d'água com altura variando entre 10 mm a 15 mm em relação à superfície do pavimento (verificados no lado interno do cilindro).

Deve-se anotar o tempo decorrido entre o início de aplicação da água e a infiltração total, considerada quando não há mais a presença de água na superfície das peças de concreto, ou seja, até que 100% da água seja infiltrada.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br



Relatório de ensaio nº 123230

O coeficiente de permeabilidade é calculado através da equação 1:

$$k = \frac{CV}{(D^2t)} \quad \text{Equação 1}$$

- k: Coeficiente de permeabilidade, mm/h
- V: Volume de água infiltrada, L
- D: Diâmetro interno do anel de infiltração, mm
- t: tempo requerido para a infiltração do volume de água, s
- C: 4.583.666.000 – fator de conversão de unidades

5. RESULTADOS

O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade utilizando-se o cilindro de infiltração, executado conforme metodologia descrita anteriormente, tendo-se obtido os resultados apresentados na *Tabela 1*.

Tabela 1 - Resultados

| Ponto de Ensaio* | Diâmetro do anel (D) (mm) | Tempo da pré-molhagem com 3,6 kg (s) | Massa de água utilizada no ensaio (kg) | Intervalo de tempo - (t) (s) | Coeficiente de permeabilidade (k) | | | |
|------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------|--------|
| | | | | | (m/s) | | (mm/h) | |
| | | | | | Individual | Média | Individual | Média |
| 1 | 295 | 3,2 | 18,0 | 11,50 | 2,3x10 ⁻² | 2,4x10 ⁻² | 82.441 | 87.154 |
| | | | | 10,78 | 2,4x10 ⁻² | | 87.947 | |
| | | | | 10,41 | 2,5x10 ⁻² | | 91.073 | |

*Após a execução da pré-molhagem, foram realizadas três medidas em um mesmo ponto representativo da superfície do segmento de pavimento.
Durante a execução dos ensaios, 100% da água do ensaio infiltraram através da superfície do pavimento.

- Data de realização do ensaio: 10/06/2019
- Data de fabricação: 26/04/2019
- Idade no ensaio: 45 dias

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br



4 / 4

Relatório de ensaio nº 123230

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pavimento permeável deve apresentar grau de permeabilidade alta, que corresponde a um coeficiente de permeabilidade acima de 10^{-3} m/s, conforme classificação apresentada na *Tabela 7 - ABNT NBR 16416:2015*.

A amostra ensaiada apresentou coeficiente de permeabilidade de $2,4 \times 10^{-2}$ m/s sendo classificada com grau de permeabilidade alta, podendo-se considerar 100% permeável.


Eng.º Rubens Curti
Supervisor Técnico

São Paulo, 01 de julho de 2019.


Geol. Arnaldo Forti Battagin
Chefe do Laboratório
CREA nº 0600586647

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

ANEXO B – LAUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DO BLOCO POROSO

| | | | |
|---|---|-----|---|
|  Associação Brasileira de Cimento Portland | ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO | 1/3 |   CLF 0024 |
| | RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 123229 | | |
| Interessado: Pisos Pavimental EIRELI - EPP | | | |
| Endereço: Rod. PR 483 KM 01 S/N - Francisco Beltrão / PR | | | |
| Referência: Orçamento 84025 | | | |

| | |
|--|------------------------------------|
| Amostra nº: 221614 | Data de entrada: 07/06/2019 |
| Material declarado: Peças de concreto permeável para pavimentação | |
| Objetivo: Determinação da resistência à compressão | |

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão referente a uma amostra contendo oito peças de concreto permeável para pavimentação. Os ensaios foram realizados por constituir parte dos ensaios do Selo de Qualidade ABCP. A amostra recebeu as seguintes identificações:

| ABCP | Interessado | |
|--------|--------------------------|------------|
| 221614 | Data da coleta: | 29/05/2019 |
| | Data de fabricação: | 26/04/2019 |
| | Classe de resistência: | 20 MPa |
| | Modelo: | Retangular |
| | Dimensões nominais (cm): | 20x10x6 |
| | Identificação do lote: | 26/04/2019 |

2. MÉTODOS DE ENSAIO E DOCUMENTOS REFERENCIADOS

ABNT NBR 9781:2013 – Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação e Método de Ensaio.

ABNT NBR 16416:2015 – Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimento.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob nº CLF 0024



3. RESULTADOS

A determinação dimensional, a inspeção visual e os resultados da determinação de resistência à compressão da amostra de oito peças de concreto permeável para pavimentação estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Resultados

| Corpo-de-prova nº | Massa quando recebido (g) | Dimensões médias das peças (mm) | | | Fator "p" | Área (mm ²) | Carga de ruptura (N) | Resistência à compressão (MPa) |
|--|--|---------------------------------|---------|--------|-----------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|
| | | Comprimento | Largura | Altura | | | | |
| 1 | 2386 | 200 | 98 | 58 | 0,95 | 5674 | 267000 | 44,7 |
| 2 | 2388 | 200 | 99 | 58 | | | 215000 | 36,0 |
| 3 | 2421 | 200 | 99 | 58 | | | 203000 | 34,0 |
| 4 | 2394 | 200 | 99 | 59 | | | 204000 | 34,2 |
| 5 | 2425 | 200 | 99 | 58 | | | 286000 | 47,9 |
| 6 | 2413 | 200 | 98 | 58 | | | 225000 | 37,7 |
| 7 | 2401 | 200 | 99 | 58 | | | 216000 | 36,2 |
| 8 | 2446 | 200 | 98 | 59 | | | 209000 | 35,0 |
| Resistência média à compressão - f_p - (MPa) | | | | | | | | 38,2 |
| Desvio padrão - s - (MPa) | | | | | | | | 5,2 |
| Resistência característica à compressão - f_{pk} - (MPa) | | | | | | | | 33,5 |
| Inspeção Visual | As peças de concreto não apresentam defeitos que possam prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento. | | | | | | | |

- Data de realização dos ensaios: 14/06/2019
- Data de fabricação: 26/04/2019
- Idade na data do ensaio: 49 dias

f_{pk} = resistência característica à compressão, em MPa e é obtido pela expressão: $f_{pk} = f_p - t \cdot s$ onde:

f_p = resistência média dos valores de f_{pi} , em MPa

t = coeficiente de Student, estipulado de acordo com o tamanho da amostra; para oito peças de concreto o valor é 0,896.

s = desvio padrão da amostra em MPa, dado pela expressão: $s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}}$

n = números de peças da amostra

f_{pi} = resistência individual das peças, em MPa obtida pela expressão: $f_{pi} = (\text{carga/área}) \cdot "p"$

"p" = fator multiplicativo relativo à altura nominal da peça

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob nº CLF 0024



3 / 3

Relatório de ensaio nº 123229

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estabelece na *tabela 8* - ABNT NBR 16416:2015 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável, para peças de concreto permeável valores de $\geq 20,0$ MPa, espessura de 60mm para tráfego de pedestres *item 3.2* e 80,0 mm para tráfego leve *item 3.3*. A amostra apresentou f_{pk} igual a 33,5 MPa, determinado de acordo com a ABNT NBR 9781:2013.

A amostra atende às especificações de resistência à compressão para peças de concreto para pavimentação da classe 20 MPa, conforme declarado pelo interessado.

Quanto à análise dimensional, a ABNT NBR 9781:2013 especifica que as peças devem ter formato geométrico regular, com comprimento nominal de no máximo 250mm, largura real mínima de 97mm e espessura nominal mínima de 60mm. A norma permite variações máximas de 3mm nas dimensões do comprimento, espessura e largura, sem comprometimento do desempenho mecânico e de durabilidade das peças de concreto.


Os ensaios realizados permitiram verificar que a amostra analisada está em conformidade com as especificações dimensionais.

Quanto à inspeção visual, a ABNT NBR 9781:2013 especifica, que as peças de concreto não devem apresentar defeitos que possam prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

A inspeção visual permitiu verificar que a amostra analisada está em conformidade com as especificações.

São Paulo, 01 de julho de 2019.


Eng. Rubens Curti
Supervisor Técnico


Geol. Arnaldo Forti Battaglin
Chefe do Laboratório
CREA nº 0600586647

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br
Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgcre de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 sob nº CLF 0024

ANEXO C – LAUDO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO DO BLOCO POROSO

| | | |
|---|---|-----|
|  Associação Brasileira de Cimento Portland | ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 123231 | 1/3 |
| | Interessado: Pisos Pavimenti EIRELI - EPP Endereço: Rod. PR 483 KM 01 S/N - Francisco Beltrão / PR Referência: Orçamento 84025 | |

| | |
|---|------------------------------------|
| Amostra nº: 221615 | Data de entrada: 07/06/2019 |
| Material declarado: Placas de concreto permeável para pavimentação | |
| Objetivo: Determinação da resistência à flexão | |

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados do ensaio de resistência à flexão referente a uma amostra contendo seis placas de concreto permeável para pavimentação. Os ensaios foram realizados por constituir parte dos ensaios do Selo de Qualidade ABCP. A amostra recebeu as seguintes identificações:

| ABCP | Interessado | |
|--------|--------------------------|--------------------|
| 221615 | Data da coleta: | 29/05/2019 |
| | Data de fabricação: | 06/05/2019 |
| | Classe de resistência: | 2 MPa |
| | Modelo: | Placa |
| | Dimensões nominais (cm): | 40x40x6 |
| | Identificação do lote: | 06/05/2019 |
| | Equipamento: | Tprex - VP300 - 03 |

2. MÉTODOS DE ENSAIO E DOCUMENTOS REFERENCIADOS

ABNT NBR 16416:2015 - Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos

ABNT NBR 15805:2015 - Pisos elevados de placas de concreto – Requisitos e procedimento.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br



3. RESULTADOS

3.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO

As peças de concreto com dimensões nominais de (400 x 400 x 60) mm foram submetidas ao ensaio de resistência a flexão apoiada nas extremidades e aplicada carga centrada. O resultado obtido no ensaio está apresentado na *Tabela a seguir*.

| Nº da placa | Entre cutelos (mm) | Dimensões médias da placa (mm) | | | Carga de ruptura (N) | Resistência à flexão (MPa) | | |
|-------------|--------------------|--------------------------------|-------|------|----------------------|----------------------------|--------------|----------------------|
| | | Comp. | Larg. | Alt. | | f_{ft} | $f_{ft,est}$ | $f_{ft,est}$ Adotado |
| 1 | 333 | 400,0 | 400,0 | 60,0 | 6980 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| 2 | | 400,0 | 400,0 | 60,0 | 8320 | 2,9 | | |
| 3 | | 400,0 | 400,0 | 60,0 | 7570 | 2,6 | | |
| 4 | | 400,0 | 400,0 | 60,0 | 7490 | 2,6 | | |
| 5 | | 400,0 | 400,0 | 60,0 | 7880 | 2,7 | | |
| 6 | | 400,0 | 400,0 | 60,0 | 7790 | 2,7 | | |

- Data de ensaio: 14/06/2019
- Data de fabricação: 06/05/2019
- Idade no ensaio: 39 dias

$$f_t = \frac{1,5xPxL}{bxt^2}$$

f_t = É a resistência à compressão expressa em megapascals (MPa);
 P = É carga aplicada ao centro da placa, expressa em Newtons (N);
 L = É a distância entre os apoios, expressa em milímetros (mm);
 b = É a largura da placa ao longo da linha da fratura, expressa em milímetros (mm);
 t = É a espessura da placa, expressa em milímetros (mm).

$$\hat{f}_{ft,est} = 2 \left(\frac{\hat{f}_{ft(1)} + \hat{f}_{ft(2)} + \dots + \hat{f}_{ft(i-1)}}{i - 1} \right) \hat{f}_{fti}$$

n = quantidade de placas da amostra;
 i = n/2 ou i = (n-1)/2, se n for ímpar;
 $\hat{f}_{ft(1)}, \hat{f}_{ft(2)}, \hat{f}_{ft(3)}$, valores de resistência à flexão individuais, ordenados crescentemente;
 $\hat{f}_{ft,est}$ - resistência à flexão característica estimada da amostra expressa em MPa;
 $\hat{f}_{ft,est}$ Adotado - Não se deve tomar como $\hat{f}_{ft,est}$ valor menor que $\Psi \cdot \hat{f}_{ft(1)}$, adotando-se para Ψ os valores da tabela 3 ANBT NBR 15805:2015, em função da quantidade de placas da amostra.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.



3 / 3


Relatório de ensaio nº 123231

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados permitiu verificar que a amostra analisada apresentou uma resistência à flexão de 2,4 MPa.

São Paulo, 01 de julho de 2019.


Eng.º Rubens Curti
Supervisor Técnico


Geol. Arnaldo Forti Battagin
Chefe do Laboratório
CREA nº 0600586647

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br