

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NAYARA CRISTINA ROSSINI SANGALLI

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL
DE PAVIMENTO PERMEÁVEL POROSO UTILIZANDO O EPA
SWMM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PATO BRANCO
2021

NAYARA CRISTINA ROSSINI SANGALLI

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE
PAVIMENTO PERMEÁVEL POROSO UTILIZANDO O EPA SWMM**

**Hydrologic modeling of a type C permeable pavement using the EPA
SWMM**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador: Cesar Augusto Medeiros Destro.

PATO BRANCO

2021



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



NAYARA CRISTINA ROSSINI SANGALLI

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE PAVIMENTO PERMEÁVEL POROSO
UTILIZANDO O EPA SWMM**

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

Data de aprovação: 31 de Agosto de 2021

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

Prof Daniel Costa Dos Santos, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Murilo Cesar Lucas, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 31/08/2021.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi desenvolvido com recursos financeiros do projeto CNPq Universal nº 429750/2018-8, chamada MCTIC/CNPq nº 28/2018.

Agradeço primeiramente à Deus por me permitir ter força, resiliência e saúde em todas as fases de minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro por toda a paciência, condução, orientação e contribuição para a realização e conclusão deste trabalho.

Aos colegas e amigos do grupo de pesquisa em recursos hídricos da UTFPR campus Pato Branco por toda a amizade, companheirismo e apoio desde a concepção até o fim do monitoramento dos módulos experimentais de pavimentos permeáveis.

À Pavimenti Blocos e Pavers pela doação dos *pavers* e à Metalúrgica CBS pela colaboração na elaboração dos moldes metálicos desta pesquisa.

À minha família por todo o apoio, suporte, amor e acolhimento em todos os momentos, sem vocês a conclusão deste mestrado não seria possível.

Enfim, a todos que de alguma forma ou outra fizeram parte disto.

RESUMO

Existe documentação limitada sobre a análise de sensibilidade utilizando os parâmetros do módulo LID do SWMM. Estudos recentes reiteram a necessidade de pesquisas que realizem a calibração, a validação e a análise de sensibilidade com o uso deste software utilizando o módulo LID do mesmo. O objetivo deste trabalho foi o de realizar a modelagem computacional de um módulo de pavimento permeável utilizando o *software* EPA SWMM. O módulo experimental de pavimento permeável foi revestido com bloco intertravado de concreto poroso, e implantado no Câmpus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) de Pato Branco. Foi efetuada a caracterização dos materiais empregados no preenchimento das camadas do pavimento e seu dimensionamento. Os dados de precipitação foram obtidos por pluviômetro instalado no local e os dados de lâmina da água foram obtidos com o auxílio de transdutores de pressão instalados nos reservatórios à jusante do dreno de fundo e no reservatório de escoamento superficial. A modelagem do pavimento poroso foi realizada utilizando o módulo LID do SWMM. A partir da Equação intensidade-duração-frequência (IDF) de Pato Branco foram criadas chuvas artificiais pelo método dos blocos alternados para a realização da análise de sensibilidade e para as etapas de calibração e validação do modelo foram utilizadas as chuvas e lâminas medidas em campo. A análise de sensibilidade indicou que as características da precipitação podem influenciar no coeficiente de sensibilidade dos parâmetros. Os parâmetros mais sensíveis foram o *offset* do dreno, a porosidade da camada de assentamento e o índice de vazios da camada de armazenamento. O desempenho do modelo computacional foi avaliado utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (EMA). Foram utilizados dois eventos de precipitação para a calibração e dois eventos de precipitação para a validação. No melhor evento calibrado foi obtido um coeficiente de NS de 0,8804, RMSE de 0,0003 e EMA de 0,0037. Em seguida foi realizada a validação com dois eventos de precipitação, no melhor deles se obteve um NS de 0,8790, RMSE de 0,02575 e EMA de 0,0315. Os resultados deste trabalho mostram que na análise de sensibilidade deve-se atentar para o tempo de retorno e intensidade das chuvas, pois as características da chuva podem influenciar no resultado da análise de sensibilidade. O modelo foi considerado validado para chuvas semelhantes aquela utilizada na própria calibração.

Palavras – Chave: Pavimentos Permeáveis, EPA SWMM, Modelagem, Análise de Sensibilidade, Calibração.

ABSTRACT

There is limited documentation on sensitivity analysis using SWMM LID module parameters. Recent studies reiterate the need for research to perform calibration, validation and sensitivity analysis using this software using its LID module. The objective of this work was to perform the computational modeling of a permeable pavement module using the EPA SWMM software. The experimental module of permeable pavement was covered with an interlocking block of porous concrete, and implemented in the Campus of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) in Pato Branco. The characterization of the materials used in filling the pavement layers and their dimensioning was carried out. The second stage comprised the construction and monitoring of the module. Precipitation data were obtained by a rain gauge installed on site and water depth data were obtained with the aid of pressure transducers installed in the reservoirs downstream of the bottom drain and in the surface runoff reservoir. Modeling of the porous pavement was performed using the SWMM LID module. From the intensity-duration-frequency (IDF) equation of Pato Branco, artificial rains were created using the alternating block method to perform the sensitivity analysis and for the steps of model calibration and validation, rains and blades measured in the field were used. The sensitivity analysis indicated that precipitation characteristics can influence the sensitivity coefficient of the parameters. The most sensitive parameters for this modeling were the drain offset, the porosity of the soil layer and the void ratio of the storage layer. The performance of the computational model was evaluated using the Nash-Sutcliffe (NS) coefficient, the Root Mean Square Error (RMSE) and the Mean Absolute Error (MAE). Two precipitation events were used for calibration. In the best calibrated event, a NS coefficient of 0.8804, RMSE of 0.0003 and EMA of 0.0037 were obtained. Then, the validation was performed with two precipitation events, the best of which was obtained a NS of 0.8790, RMSE of 0.02575 and EMA of 0.0315. Good validation results were obtained when using a similar calibration event. The results of this work show that, in the sensitivity analysis, attention should be paid to the return time and rainfall intensity, as the rainfall characteristics can influence the result of the sensitivity analysis. The model was considered validated for rainfall similar to that used in the calibration itself.

Key Words: Permeable Pavements, EPA SWMM, Modeling, Sensitivity Analysis, Calibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência da urbanização em um hidrograma hipotético.....	20
Figura 2 - Objetivos dos SuDS.....	21
Figura 3 - Sistemas de Drenagem Sustentáveis.....	22
Figura 4 - Representação esquemática das camadas do pavimento permeável.....	24
Figura 5 – Tipos de sistemas de pavimentos permeáveis: (a) Infiltração total; (b) Infiltração parcial e (c) Sem infiltração.....	25
Figura 6 - Interface de um pavimento permeável no módulo LID no EPA SWMM....	29
Figura 7 - Mapa de Localização de Pato Branco/PR.....	35
Figura 8 - Mapa de Localização da UTFPR campus Pato Branco/PR.....	36
Figura 9 - Precipitação média mensal de longo termo para Pato Branco/PR.....	37
Figura 10 - Ábaco de Dimensionamento de pavimentos flexíveis.....	46
Figura 11 - Etapas de execução dos módulos experimentais: (a) Limpeza e Escavação; (b) Nivelamento; (c) Compactação; (d) Regularização e Instalação de <i>pallets</i>	50
Figura 12 - Bloco de concreto intertravado poroso.....	50
Figura 13 - Representação tridimensional do módulo experimental de pavimento permeável.....	51
Figura 14 - Topologia dos módulos experimentais.....	53
Figura 15 - Distribuição granulométrica da Brita 3.....	61
Figura 16 - Distribuição granulométrica do Pedrisco.....	61
Figura 17 - Camadas dos módulos experimentais e suas respectivas dimensões ...	63
Figura 18 - Coeficiente de sensibilidade para a lâmina da água em razão do tempo de retorno da precipitação para o parâmetro offset do dreno (a) tempo de duração de precipitação de dez minutos (b) tempo de duração de precipitação de trinta minutos.....	67
Figura 19 - Coeficiente de sensibilidade para a lâmina da água em razão do tempo de retorno da precipitação para o parâmetro porosidade (a) tempo de duração de precipitação de dez minutos (b) tempo de duração de precipitação de trinta minutos.....	68

Figura 20 - Coeficiente de sensibilidade para a lâmina da água em razão do tempo de retorno da precipitação para o parâmetro índice de vazios (a) tempo de duração de precipitação de dez minutos (b) tempo de duração de precipitação de trinta minutos.....	68
Figura 21 - Hietograma e diagrama observado e calibrado de lâmina da água para o Evento 8	70
Figura 22 - Hietograma e diagrama observado e calibrado de lâmina da água para o Evento 12	71
Figura 23 - Hietograma e diagrama observado e validado (tentativa) de lâmina da água para o Evento 9	71
Figura 24 - Hietograma e diagrama observado e validado (tentativa) de lâmina da água para o Evento 6	72
Figura 25 - Hietograma e diagrama observado e validado de lâmina da água para o Evento 9	73
Figura 26 - Hietograma e diagrama observado e validado de lâmina da água para o Evento 6	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ferramentas de modelagem para o gerenciamento de recursos hídricos	25
Tabela 2 - Parâmetros dos pavimentos permeáveis utilizados na simulação LID - SWMM	29
Tabela 3 - Critérios de eficiência para avaliar a calibração.	31
Tabela 4 – Valores de entrada para o módulo de pavimento permeável no SWMM.	56
Tabela 5 – Intervalos de valores para a análise de sensibilidade	57
Tabela 6 - Resultados da caracterização dos materiais contidos nos módulos	59
Tabela 7 – Coeficiente de sensibilidade absoluto dos parâmetros analisados em função da lâmina e do tempo	63
Tabela 8 – Classificação dos parâmetros para a lâmina da água do reservatório de descarga do dreno em função de diferentes tempos de retorno de precipitações ...	64
Tabela 9 - Classificação dos parâmetros para o tempo onde ocorre a maior lâmina da água do reservatório de descarga do dreno em função de diferentes tempos de retorno de precipitações.	65
Tabela 10 – Intervalos de valores para a calibração	68
Tabela 11 – Características de precipitações dos eventos utilizados para a calibração e validação	68
Tabela 12 – Resultados da performance do modelo LID do SWMM para as etapas de calibração e de validação do modelo	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATs	<i>Alternative Techniques</i>
BMPs	<i>Best Management Practices</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CTs	<i>Compensatory Techniques</i>
DEP/IPH	Departamento de Esgotos e Aguas Pluviais de Posto Alegre
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISC	Índice de Suporte Califórnia
IUWM	<i>Integrated Urban Water Management</i>
LID	<i>Low Impact Development</i>
LIUDD	<i>Low Impact Urban Design and Development</i>
MAE	Erro Médio Absoluto
NS	<i>Nash – Sutcliffe</i>
PBIAS	Viés Percentual
RMSE	Erro Quadrático Médio
SCMs	<i>Storm Water Control Measures</i>
SQIDs	<i>Stormwater Quality Improvement Devices</i>
SuDS	Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
VE	Erro de Volume Relativo
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da sub-bacia (m^2)
A_1	Área da superfície do telhado (mm^2)
A_2	É a razão entre a área de superficial de entorno aos pavimentos permeáveis (A_c) (m^2) e a área superficial dos PP (A_p) (m^2)
A	Parâmetro da equação IDF (adimensional)
B	Parâmetro da equação IDF (adimensional)
B	Produto do coeficiente do escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área de saída (adimensional)
C	Chuva excedente (mm)
C	Parâmetro da equação IDF (adimensional)
CBR	Índice de Suporte Califórnia (adimensional)
CBRig	Índice de Suporte Califórnia corrigido (adimensional)
CN	Curva – Número (adimensional)
d_1	Armazenamento de água na camada superficial (mm)
d_3	Armazenamento de água na camada de armazenamento (mm)
D	Altura da água (cm)
$D_{(I,P)}$	Profundidade do armazenamento em depressão para I (superfícies impermeáveis) e P (superfícies permeáveis) (m)
D_1	Profundidade de armazenamento da depressão superficial (mm)
D_2	Espessura da camada do solo (mm)
D_4	Espessura da camada de pavimento (mm)
$E_0(t)$	Taxa de evapotranspiração potencial que se aplica ao intervalo de tempo t (mm/h)
e_1	Evapotranspiração na camada superficial (mm/h)
e_2	Evapotranspiração na camada de assentamento (mm/h)
e_3	Evapotranspiração na camada de armazenamento (mm/h)
e_4	Evapotranspiração na camada do pavimento (mm/h)
F	Taxa de infiltração de água no solo (m/h)
FC	Fator de Carga (quantidade)
FE	Fator de Eixos (quantidade)

f_1	Escoamento superficial (mm/h)
f_2	Taxa de percolação do solo (mm/h)
f_3	Taxa de exfiltração da camada de armazenamento (mm/h)
f_4	Taxa de fluxo nominal do pavimento (mm/h)
F_4	Fração da área da superfície ocupada por blocos impermeáveis (mm)
H	Profundidade média do volume de acumulação do dispositivo (mm)
Hmáx	Altura máxima do reservatório (cm)
I	Infiltração acumulada (mm)
I	Intensidade de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
i^*	Chuva efetiva (m/s)
la	Abstração inicial (mm)
I.S	Índice de Suporte (adimensional)
ISC	Índice de Suporte Califórnia (adimensional)
K_0	Condutividade hidráulica do solo saturado ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
n_1	Coefficiente de rugosidade da superfície
N	Número equivalente de operações do eixo simples (adimensional)
$N_{(I,P)}$	Coefficiente de rugosidade de Manning para I (superfícies impermeáveis) e P (superfícies permeáveis) (m)
N	Número de observações
η	Porosidade do material de enchimento da camada de armazenamento (adimensional)
O_i	Escoamento observado no tempo i
\bar{O}	Média do escoamento observado
P	Valor original do parâmetro de interesse
P_r	Precipitação (mm)
PC	Pressão calculada ou pressão corrigida (MPa)
PP	Pressão padrão (MPa)
P_e	precipitação efetiva sobre a área de contribuição (m)
P_i	Período (anos)
δP	Valor da diferença do parâmetro original com o parâmetro ajustado
Q	Vazão (m^3/s)
q_0	Vazão de contribuição de áreas impermeáveis adjacentes (mm/h)

q_1	Vazão que vai para a camada inferior (mm/h)
q_3	Vazão de sub-dreno da camada de armazenamento (mm/h)
Q_s	Vazão de saída constante do dispositivo ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
R	É a saída do modelo original
R_v	Espessura de Revestimento (cm)
δR	É a diferença entre o original com a nova saída do modelo
S	Declividade da sub-bacia (m/m)
S_i	Escoamento simulado no tempo i
S_1	Inclinação da superfície (mm/mm)
S_R	Coefficiente de sensibilidade local
T	Tempo (s)
t_{enc}	Tempo de enchimento de água da camada de armazenamento (h)
TR	Tempo de Retorno (anos)
T	Taxa de crescimento anual (%)
T_c	Duração da chuva (min)
T_i	Taxa de infiltração de água no solo ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Δ_t	Intervalo de tempo usado numericamente para avaliar as equações de balanço de fluxo (h)
V	Volume de água sobre a subárea (m^3)
V_m	Volume médio diário de tráfego (veículos)
V_t	Volume total de tráfego (veículos)
V_1	Volume médio diário de tráfego no primeiro ano (veículos)
W	Largura da sub-bacia (m)
W_1	Comprimento total ao longo da borda do telhado, onde o escoamento é coletado (mm)
θ_2	Limite de umidade da camada do solo
\emptyset_3	Fração nula da camada de armazenamento (Volume nulo/Volume Total)
\emptyset_4	Teor de umidade da camada permeável do pavimento
θ_{FC}	Teor de umidade da capacidade do campo de solo
γ	Razão entre área de percolação e volume do dispositivo (mm^{-1})

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NAS INUNDAÇÕES	16
3.2 SUDS (<i>SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE SYSTEMS</i>)	18
3.3 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	21
3.4 MODELAGEM DO PAVIMENTO PERMEÁVEL	24
3.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	30
3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS NOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS	35
4.2.1 BRITA 3 (CAMADA DE ARMAZENAMENTO).....	35
4.2.1.1 GRANULOMETRIA.....	35
4.2.1.2 MASSA UNITÁRIA.....	36
4.2.1.3 MASSA ESPECÍFICA	37
4.2.2 PEDRISCO (CAMADA DE ASSENTAMENTO).....	38
4.2.2.1 GRANULOMETRIA.....	38
4.2.2.2 MASSA UNITÁRIA.....	38
4.2.2.3 MASSA ESPECÍFICA	39
4.2.3 PAVERS (CAMADA DE REVESTIMENTO).....	39
4.2.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	39

4.2.3.2	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	41
4.3	DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS	40
4.3.1	DIMENSIONAMENTO MECÂNICO	40
4.3.1.1	DETERMINAÇÃO DO CBR	40
4.3.2	DIMENSIONAMENTO HIDROLÓGICO	44
4.3.2.1	MÉTODO DA CURVA ENVELOPE.....	44
4.3.2.2	MÉTODO DA NBR 16416:2015.....	46
4.4	EXECUÇÃO DO MÓDULO EXPERIMENTAL.....	47
4.5	MONITORAMENTO DO MÓDULO EXPERIMENTAL.....	49
4.6	MODELAGEM USANDO O EPA SWMM	50
4.7	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	55
4.8	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRESENTES NOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS	59
5.2	MÓDULOS EXPERIMENTAIS	61
5.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	62
5.4	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	67
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE A – CBR – LEITURA EXTÊNSOMETRO 4	86
	APÊNDICE B – BRITA 3 - AMOSTRAS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA	87
	APÊNDICE C – BRITA 3 - AMOSTRAS DO ENSAIO DE POROSIDADE.....	88
	APÊNDICE D – BRITA 3 - AMOSTRAS DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA ...	89
	APÊNDICE E – PEDRISCO - AMOSTRAS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA ..	90

APÊNDICE F – PEDRISCO - AMOSTRAS DO ENSAIO DE MASSA UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA.....	91
APÊNDICE G – <i>PAVERS</i> – AVALIAÇÃO DIMENSIONAL	92
APÊNDICE H – <i>PAVERS</i> – ABSORÇÃO DE ÁGUA DO BLOCO INTERTRAVADO DE CONCRETO POROSO	93
APÊNDICE I – EVENTOS FICTÍCIOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	97

1 INTRODUÇÃO

A urbanização e, conseqüente, impermeabilização do solo acarretaram complicações para a população e para o ciclo hidrológico. Neste último, como principais conseqüências houve a diminuição da infiltração de água no solo (TODESCHINI, 2016; KUMAR e DHORDE, 2020) e o aumento do escoamento superficial (YIN et al., 2018; ALAOUI, 2018). Estes fatores contribuem para o risco de inundações durante a ocorrência de precipitações de alta intensidade (YU et al., 2018).

Com a finalidade de enfrentar aos desafios do gerenciamento das águas pluviais, os Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SuDS), vêm se mostrando como uma estratégia promissora (GIMENEZ-MARANGES et al., 2020). Dentre as diversas medidas SuDS, os pavimentos permeáveis proporcionam a redução do volume do escoamento superficial (JATO-ESPINO et al., 2016) e a vazão de pico (RODRÍGUEZ-ROJAS et al., 2018; BOOGARD et al., 2014). Isso ocorre por causa, principalmente, da alta taxa de infiltração dos pavimentos permeáveis (WINSTON et al., 2020; SAADEH et al., 2019).

A implantação otimizada de pavimentos permeáveis requer a análise e a modelagem de parâmetros devido à complexidade dos processos hidrológicos envolvidos. Além disso, fatores como a escassez de dados e a falta de informações de pavimentos permeáveis já implantados limitam a adoção dos mesmos no planejamento urbano (CORTIER; BOUTOUIL; MAQUAIRE, 2019).

Na década de 70 começaram a surgir ferramentas de modelagem capazes de simular a quantidade e a qualidade do escoamento das águas pluviais (ZOPPOU, 2001). O uso de ferramentas computacionais de simulação auxilia na compreensão e previsão do comportamento de fenômenos naturais como as inundações urbanas, na criação de estratégias de operação, bem como na condução de experimentos (JAYASOORIYA e NG, 2014; RANDALL et al., 2020).

Uma das ferramentas que vem ganhando destaque é o *Storm Water Management Model* (SWMM), disponibilizada pela *United States Environmental*

Protection Agency (USEPA). É uma ferramenta eficaz para a análise de inundações urbanas (OPHIYANDRI, 2020; ROSSMAN, 2010), por meio da simulação com comportamento de sistemas de drenagem. Jayasooriya e Ng (2014) citam como as principais vantagens do SWMM a utilização em projetos de grande escala, além de possuir livre acesso.

A modelagem de pavimentos permeáveis no módulo *Low Impact Development* (LID) do SWMM necessita, previamente, do dimensionamento das camadas de superfície, pavimento, assentamento, armazenamento e do dreno de fundo; esse último quando for o caso. São exemplos de parâmetros do SWMM a taxa de evaporação a partir do pavimento, a porosidade (PO) da camada de armazenamento e de revestimento, o coeficiente e a altura (offset) do dreno (ROSSMAN, 2010; BATENI et al, 2020; Randall et al., 2020).

Vaillancourt et al., (2019), Palla e Gnecco (2015), Alam et al., (2019), aplicaram o módulo LID de pavimentos permeáveis do *software* à modelagem e simulações hidrológicas, obtendo resultados satisfatórios. Entretanto, a avaliação de sensibilidade dos parâmetros, com validação experimental do modelo, usando a ferramenta é um campo aberto para pesquisas (RANDALL et al., 2020; ZHANG e GUO, 2015).

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo modelar o comportamento hidrológico de pavimentos permeáveis utilizando o módulo LID do SWMM, sendo o pavimento permeável revestido por bloco de concreto poroso.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é modelar hidrológicamente um módulo experimental de pavimento permeável revestido com bloco de concreto intertravado poroso utilizando o *software* EPA SWMM.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os materiais, dimensionar e implementar o módulo experimental de pavimento permeável poroso;
- Monitorar os dados de vazão de entrada e de saída do módulo experimental e os dados de precipitação local;
- Realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros;
- Calibrar e validar o modelo do *software* EPA SWMM;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NAS INUNDAÇÕES

Ao longo das últimas décadas, o Brasil e o mundo passaram por transformações relacionadas à rápida urbanização, às mudanças climáticas (YIN et al., 2018) e ao planejamento urbano inadequado, resultando em uma série de desafios para o ambiente local, regional e global. De acordo com a ONU (2018), a previsão é de que em 2050 aproximadamente 68% da população mundial habitará estas áreas.

Entre as principais consequências da urbanização se encontram a impermeabilização do solo (HOU, 2019; TODESCHINI, 2016), as inundações (CHEN et al., 2015; SU et al., 2017) a escassez da água (CHEN et al.; 2020; SANCHEZ et al., 2020), a alteração do uso do solo (SURIYA, MUDGAL, 2012; HUNG et al., 2020), o aumento da poluição (LIU et al., 2020; MOUTINHO et al., 2020), a alteração da qualidade da água devido ao escoamento superficial (WANG et al., 2020; LIANG et al., 2020) e a contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos (JAYASWAL et al., 2017; ESSER et al., 2020) que acarretam em graves prejuízos para as cidades, para o meio ambiente e para a população.

Na última década, em nível global, as inundações repentinas, causaram mortes e prejuízos estimados em mais de 30 bilhões de dólares anualmente (YIN et al., 2018). Elas são causadas devido ao mau planejamento da infraestrutura urbana e através dos eventos de chuvas intensas, que se acentuaram com as mudanças climáticas (YAN et al., 2020).

As principais mudanças hidrológicas associadas ao processo de urbanização são ocasionadas devido à substituição de superfícies vegetadas por superfícies impermeáveis (SHUSTER et al., 2005). Estas superfícies, tais como estradas, calçadas e telhados agravam o fenômeno das inundações (GIMENEZ-MARANGES et al., 2020). Elas também colaboram com o aumento da velocidade e da quantidade de escoamento superficial e alteram a qualidade

da água. Fucks et al., (2005) realizaram um estudo na Alemanha e relataram que as águas do escoamento superficial são a principal fonte de metais pesados tais como o Cádmiio (Cd), o cromo (Cr), o níquel (Ni), o chumbo (Pb), o cobre (Cu) e o zinco (Zn), enquanto que o esgoto sanitário contém apenas pequenas quantidades destas substâncias.

Suriya et al., (2012) realizaram um estudo na bacia hidrográfica de Thirusoolam, em Chennai e constataram que as mudanças no uso do solo de 1976 a 2005, relacionadas à urbanização na bacia hidrográfica alteraram o ciclo de água e dificultaram o escoamento natural, levando a riscos de inundação para os habitantes.

Miller et al., (2014) constataram que em uma área do Reino Unido a cobertura impermeável aumentou de 11% na década de 1960 para 44% em 2010. Paiva et al., (2020) realizaram um estudo na Bacia do Rio Paraíba do Sul, em São Paulo – Brasil alterando, por meio de simulações, o uso e a ocupação do solo para avaliar a expansão urbana e o crescimento da população e obtiveram uma previsão de que até 2050, a ocupação urbana daquela região aumentará em 170%.

Em meio aos grandes impactos da urbanização e aos cenários de inundação, medidas de drenagem urbana têm sido utilizadas na tentativa de mitigar esta realidade. Esse tipo de drenagem tem por objetivo que o hidrograma de uma área urbanizada se assemelhe ao hidrograma de uma área natural ou não urbanizada, por meio de medidas corretivas (Figura 1).

Segundo Tucci (2008), em uma área urbanizada é perceptível que a vazão de pico é mais elevada, e ocorre em um tempo de pico muito menor, do que em uma área natural, ou não urbanizada. Quanto mais impermeável for o solo, mais acelerado é o escoamento superficial e a quantidade em excesso de água que chega ao sistema de drenagem que pode provocar inundações. Na área não urbanizada, o tempo para se obter algum escoamento superficial, é muito mais elevado, pois a área permeável permite com que a água infiltre no solo até a sua saturação e assim, é mais difícil que ocorra alguma inundação (MARQUES et al., 2013, TUCCI, 2008; WOODS-BALLARD et al., 2015).

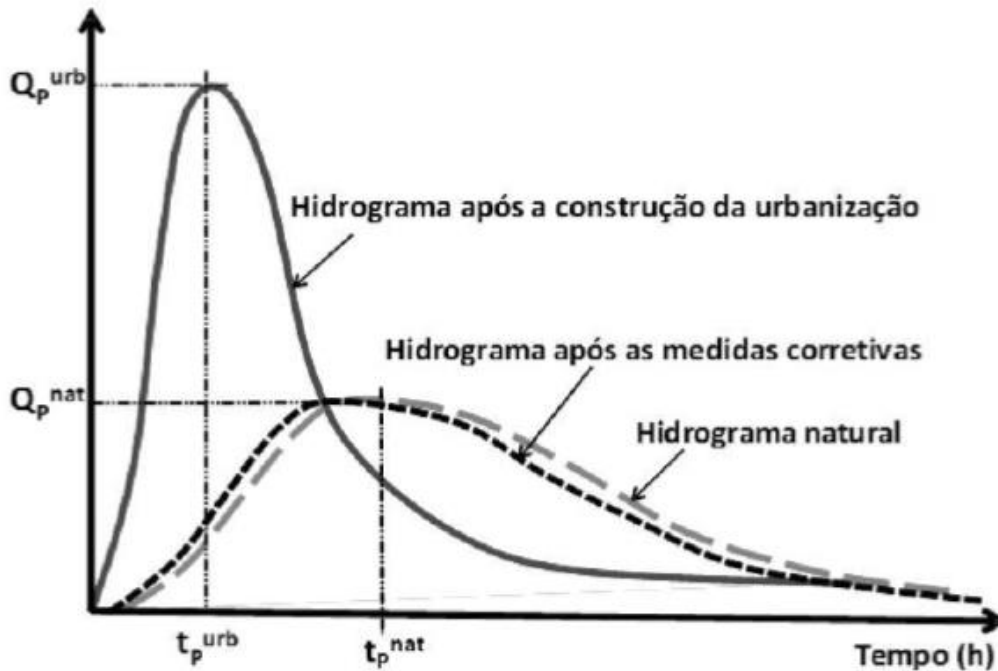


Figura 1 - Influência da urbanização em um hidrograma hipotético.
 Fonte: Marques *et al.*, (2013).

3.2 SUDS (SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE SYSTEMS)

Butler; Parkinson (1997) propõem três estratégias para o progresso em direção a drenagem urbana sustentável: a redução do uso inadequado de água potável como meio de transporte de esgotos, o manuseio de resíduos industriais de forma separada para permitir a reutilização de lodo de esgoto e o manejo separado das águas pluviais para restaurar os padrões naturais de drenagem.

Ao longo das últimas décadas a abordagem da drenagem urbana passou a ter uma preocupação maior com as questões ambientais, econômicas e sociais. As principais tipologias utilizadas para esses novos conceitos foram: *Alternative Techniques* (ATs) ou *Compensatory Techniques* (CTs), *Best Management Practices* (BMPs), *Green Infrastructure*, *Integrated Urban Water Management* (IUWM), *Low Impact Development* (LID) e *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD), *Source Control*, *Storm Water Control*

Measures (SCMs), Stormwater Quality Improvement Devices (SQIDs), Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) e Water Sensitive Urban Design (WSUD) (FLETCHER et al., 2014).

O termo empregado neste trabalho é o de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SuDS). Esta terminologia foi originada no Reino Unido e na Escócia, é amplamente difundida em países desenvolvidos e se popularizou nos anos 90 (GULBAS et al., 2017).

De acordo com Fletcher (2014) os SuDS são um conjunto de abordagens sustentáveis descentralizado e utilizados para lidar na fonte com as águas pluviais, desacelerar o escoamento superficial e maximizar a infiltração.

A Figura 2 apresenta os principais objetivos dos SuDS, que são basicamente os de maximizar a oferta de amenidades e de biodiversidade e de minimizar os efeitos da urbanização sobre a quantidade e a qualidade do escoamento superficial. Para Woods-Ballard et al., (2007) estes sistemas consideram os fatores econômicos, sociais e ambientais no processo de tomada de decisões, e se fundamentam em um arranjo holístico de sustentabilidade.

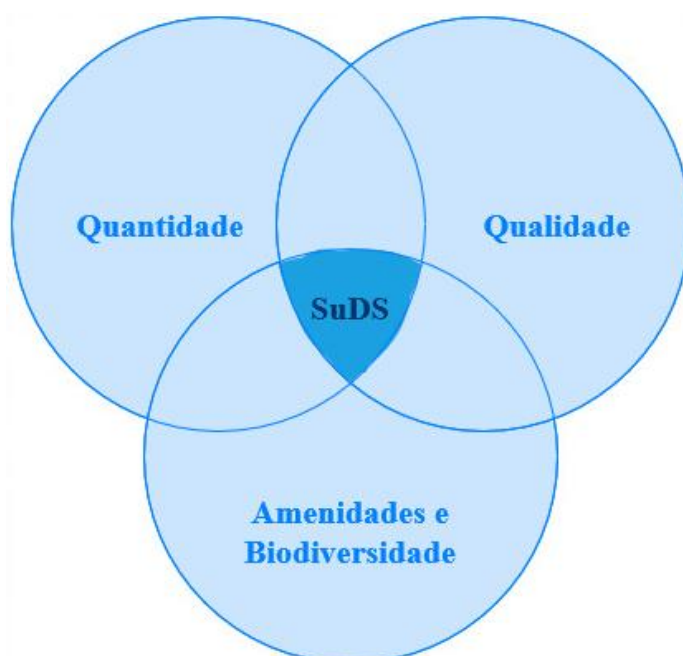


Figura 2 - Objetivos dos SuDS
Fonte: Adaptado de Woods-Ballard et al., (2007).

Existem diversas técnicas e em diferentes escalas para a implementação dos SuDS, as quais englobam desde a instalação em um novo loteamento ou estacionamento já existente até a uma escala municipal em cidades com conceito de infraestrutura verde (WOODS-BALLARD et al., 2007).

Os SuDS, representados na Figura 3, mais comumente utilizados e conhecidos são os pavimentos permeáveis, os telhados verdes, as trincheiras de infiltração, os reservatórios de detenção e de retenção, as bacias de biorretenção, dentre outros, que possuem o mesmo princípio e tentam imitar os processos naturais (CHUI, 2016).

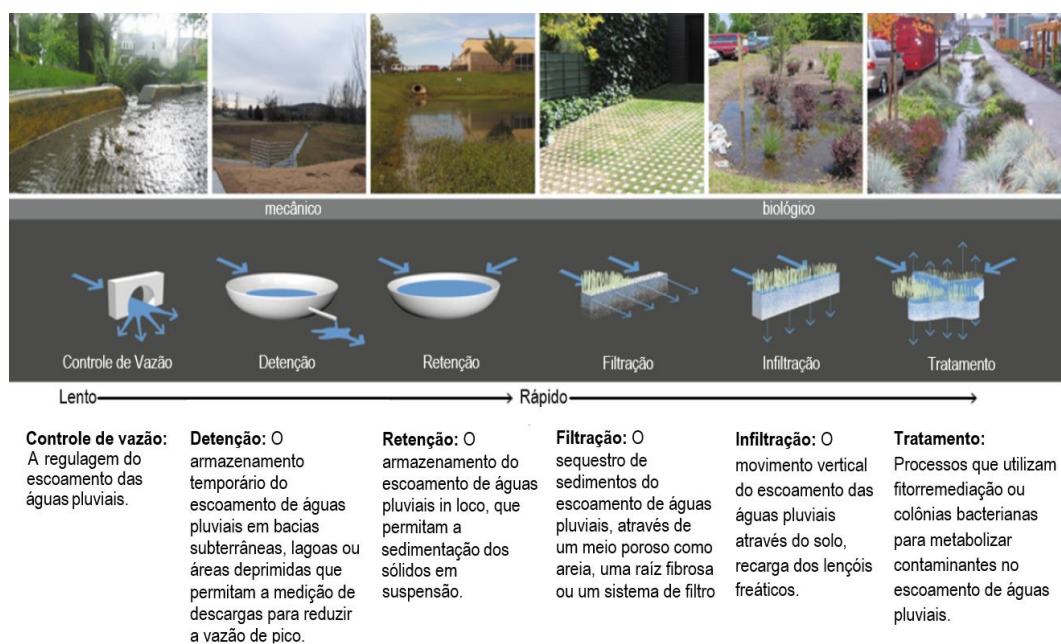


Figura 3 - Sistemas de Drenagem Sustentáveis
Fonte: Adaptado de UACDC (2010).

Gimenez-Maranges et al. (2020) realizaram a revisão de literatura analisando as tipologias de SuDS mais difundidos no mundo, escritos em língua inglesa, entre os anos 2000 e 2019. Os referidos autores constataram que os mais populares são os telhados verdes (26%), seguidos pelos pavimentos permeáveis (22%), lagoas de retenção (13,5%), valas (12%), bacias de detenção (11%), e o restante, aproximadamente 15,5% concentra os

estudos sobre trincheiras de infiltração, pavimentos porosos¹, cisternas e *wetlands* construídos.

Da percepção da população quanto a implantação dos SuDS algumas pesquisas vêm sendo realizadas. Odonnell et al., (2020) realizaram uma pesquisa em Newcastle-upon-Tyne, no Reino Unido, e constataram que a maioria dos entrevistados (cerca de 61%) preferiam o espaço verde sem SuDS. Outrossim, na Escócia, ainda há resistência à adoção dos SuDS (Ashley et al., 2015).

Por outro lado, nas cidades de Roterdã (Holanda) (VAN DER BRUGGE; DE GRAFF, 2010) e Copenhague (Dinamarca) (MGUNI et al., 2015), os moradores aprovam em sua maioria a adoção dos SuDS, devido ao incentivo de partes interessadas no desenvolvimento de segmentos SuDS para toda a cidade.

3.3 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Os pavimentos permeáveis são uma medida estrutural dos SuDS, eles são projetados para reduzir o volume de escoamento superficial, diminuir a vazão de pico e controlar a qualidade da água. Entre as principais vantagens destes sistemas se podem destacar a alta capacidade de infiltração e evaporação das águas das chuvas, o auxílio na recarga subterrânea e ainda a possibilidade de dupla utilização do espaço onde são instalados (TZIAMPOU, 2020; SAADEH et al., 2019; WINSTON et al., 2020, ALSUBIH et al., 2017). De acordo com Brown (2015), os pavimentos permeáveis podem ser utilizados principalmente em estacionamentos, armazéns, ginásios de esporte, ruas de tráfego leve (condomínios residenciais).

Por outro lado, as principais desvantagens de acordo com Scholz, Grabowiecki (2007), são as seguintes: facilitam a contaminação das águas subterrâneas, necessitam de inspeções regulares e são inadequados para

¹ Referem-se apenas a camada de superfície, sem a estrutura de assentamento e armazenamento inclusas (DREELIN et al., 2006).

áreas com grande carga de sedimentos e podem sofrer colmatção (KIA et al., 2019).

A superfície do pavimento permeável possui uma camada que atua como filtro, de agregado fino ou médio e uma camada de agregado graúdo, que vai atuar como um reservatório temporário, onde a água pode ser direcionada para um sistema de drenos ou ficar temporariamente armazenada (RODRIGUEZ-ROJAS et al., 2018) (Figura 4).

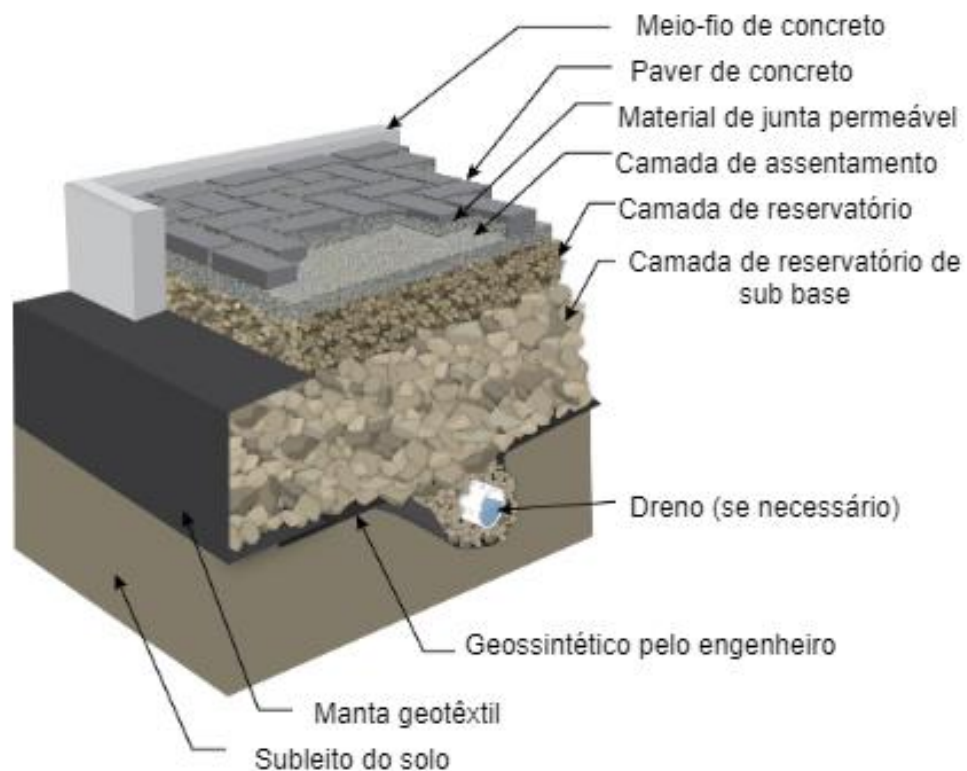


Figura 4 - Representação esquemática das camadas do pavimento permeável
Fonte: Adaptado de SMITH, D. R. (2006).

De acordo com Woods-Ballard et al., (2015); Drake et al., (2013) e Imran et al., (2013) existem três categorias de pavimentos permeáveis. O tipo 1 é o pavimento intertravado permeável com infiltração total no solo, neste toda a água é conduzida ao subleito (Figura 5a). O tipo 2 é o pavimento intertravado permeável com infiltração parcial no solo, onde parte da água percola no solo (Figura 5b) e o restante é removido através da tubulação de drenagem e o tipo 3 é o pavimento intertravado sem infiltração no solo (Figura 5c), a água não é

absorvida pelo solo, sendo somente armazenada temporariamente e posteriormente escoada através da tubulação de drenagem.

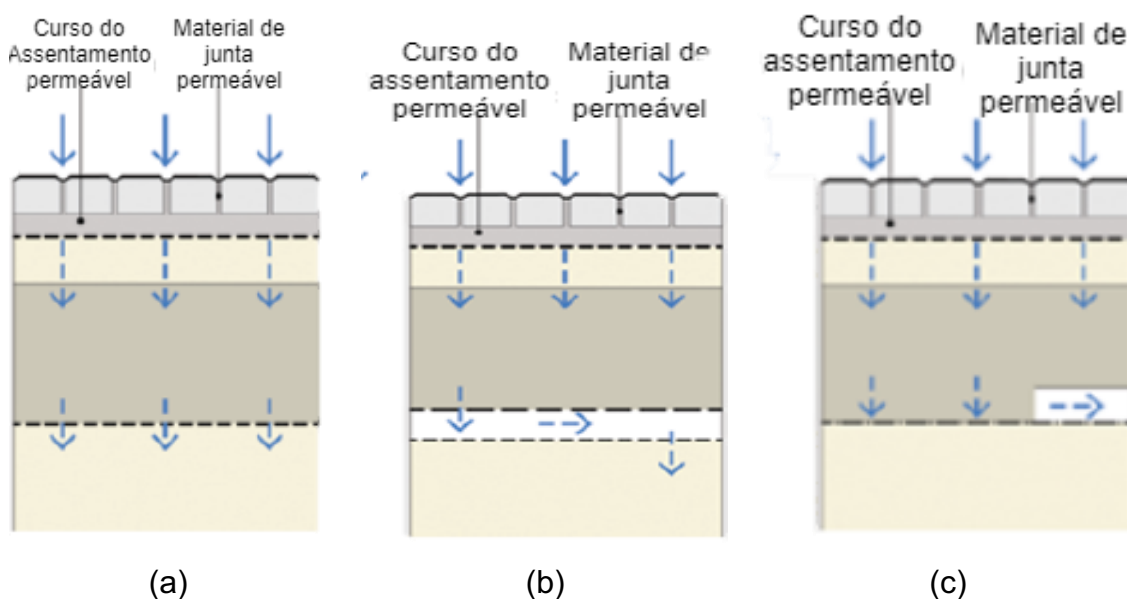


Figura 5 – Tipos de sistemas de pavimentos permeáveis: (a) Infiltração total; (b) Infiltração parcial e (c) Sem infiltração

Fonte: Adaptado de Woods-Ballard et al., (2015).

De acordo com a NBR 16416:2015, as 3 modalidades de absorção dos pavimentos permeáveis estão relacionadas diretamente com o tipo de solo em que serão implementadas. O tipo 1 deve ser utilizado em solos com alta capacidade de infiltração e arenosos. O tipo 2 deve ser utilizado em solos com baixa capacidade de infiltração, e o tipo 3 geralmente é utilizado para a filtragem de poluentes.

No projeto dos pavimentos permeáveis devem ser considerados os valores de precipitação da região, características do solo, período de retorno, tráfego solicitado e o nível freático, para que seu uso seja eficaz (RAHMAN et al. 2015). Contudo, Rahman et al. (2015) afirmam que a implementação em larga escala dos pavimentos permeáveis ainda não ocorreu devido aos altos custos com infraestrutura.

Aryal et al. (2014) destacaram que a vida útil dos pavimentos permeáveis é em média 10 anos. Lucke e Beecham (2011) implantaram um sistema de pavimentos permeáveis no estacionamento da Universidade da

Austrália do Sul e o monitoraram por 8 anos, a fim de avaliar a colmatação. Constataram que a permeabilidade foi reduzida com o tempo e o sistema estava totalmente bloqueado visualmente e que 90% das partículas sólidas ficaram retidas na camada de assentamento, mesmo assim, o sistema ainda funcionava.

Outrossim, Yong et al. (2010) realizaram um estudo em laboratório para avaliar a colmatação em três diferentes sistemas de pavimentos permeáveis, seus resultados iniciais sugeriram que os períodos sem chuva influenciam diretamente na vida útil dos sistemas. Fassman e Blackbourne (2010) implantaram um sistema de pavimentos permeáveis na Nova Zelândia e investigaram as taxas de infiltração e de colmatação, e também constataram que os períodos sem chuva potencializaram a colmatação.

3.4 MODELAGEM DO PAVIMENTO PERMEÁVEL

Algumas ferramentas de *softwares* capazes de simular a quantidade e a qualidade das águas pluviais surgiram na década de 70 (ZOPPOU, 2001). As mais populares e acessíveis, que se encontram comercialmente disponíveis estão na Tabela 1.

O SWMM tem sido amplamente utilizado na literatura para a descrição de processos hidrológicos de pavimentos permeáveis (ILLGEN et al., 2007; CAMPORESE et al., 2013; BRUNETTI et al., 2016).

O SWMM é um modelo dinâmico chuva-vazão que foi desenvolvido em 1971 (ROSSMAN, 2010). Desde o seu lançamento, o SWMM vem sendo amplamente utilizado ao redor do mundo para simulações hidrológicas e sua utilização é considerada alta (OPHIYANDRI, 2020).

O modelo simula em áreas urbanas a quantidade e a qualidade do escoamento superficial para eventos isolados ou séries longas de precipitações, durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo (ROSSMAN, 2010).

Tabela 1 – Ferramentas de modelagem para o gerenciamento de recursos hídricos

Ferramentas de Modelagem	Sítio eletrônico	Objetivo	Referências
EPA Stormwater Management Model (SWMM)	http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/	<p>Analisar, planejar e simular o desempenho de vários métodos de drenagem urbana sustentável, na redução da quantidade e na melhoria da qualidade do escoamento.</p> <p>Analisar o fluxo de água e transporte de solutos em meios porosos saturados e simular o movimento e o calor da água, além de uma variedade de parâmetros.</p>	<p>BAI et al., (2019); GULBAZ et al., (2018); SIMPSON e ROESNER (2018), RANDALL et al., (2020); BATENI et al., (2020)</p>
HYDRUS-2D	http://www.pc-progress.com/	<p>Analisar o fluxo de água e transporte de solutos em meios porosos saturados e simular o movimento e o calor da água, além de uma variedade de parâmetros.</p>	<p>TURCO et al., (2017); BRUNETTI et al., (2016)</p>
RECARGA	http://dnr.wi.gov/topic/stormwater/standards/recarga.html	<p>Analisar e realizar o desempenho de bacias de infiltração, de biorretenção e de jardins de chuva</p>	<p>WANG et al., (2013)</p>
The Green Infrastructure Valuation Toolkit	http://www.greeninfrastructurenw.co.uk/html/index.php?page=projects%Greeninfrastructure	<p>Avaliar monetariamente o benefício dos métodos sustentáveis de drenagem urbana</p>	<p>GIVAN (2010)</p>
Source Loading and Management Model for Windows (WinSLAMM)	http://winslamm.com/winslamm_updates.html	<p>Estudar os métodos sustentáveis de drenagem urbana quanto à qualidade da água</p>	<p>ALAM et al., (2019); MAHMOUD et al., (2020)</p>

Continuação da Tabela 1 – Ferramentas de modelagem para o gerenciamento de recursos hídricos

Ferramentas de Modelagem	Disponibilidade	Uso pretendido na modelagem	Autores que utilizam
Water Environment Research Foundation (WERF) BMP and LID whole life cycle cost modeling tools	http://www.werf.org/i/a/Ka/Search/ResearchProfile.aspx?ReportId=SW2R08	Analisar o custo de vida total dos métodos sustentáveis de drenagem urbana	YANG e CHUI (2016)
Low-Impact Development Rapid Assesment (LIDRA)	http://www.lidratool.org/database/database.aspx	Analisar a redução dos custos da drenagem urbana com métodos sustentáveis	YU et al., (2010)
EPA System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration Model (SUSTAIN)	http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/sustain	Avaliar os custos e analisar a implementação dos métodos de drenagem urbana sustentáveis	GAO et al., (2015);
Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualization (MUSIC)	http://www.ewater.com.au/products/ewatertoolkit/urban-tools/music/	Avaliar o custo-eficácia, a redução da quantidade e a melhoria da qualidade do escoamento superficial dos métodos de drenagem urbana sustentáveis	RAHMAN et al., (2015)

Fonte: Adaptado de Jayasooriya e Ng (2014).

O SWMM possui um módulo LID, que tem a capacidade de simular várias medidas estruturais de drenagem urbana, entre elas os pavimentos permeáveis. De acordo com Rossman (2010), um sistema de pavimento permeável no módulo LID do SWMM é representado pelas camadas verticais de superfície, pavimento, assentamento, armazenamento e um sub-dreno opcional (Figura 6).

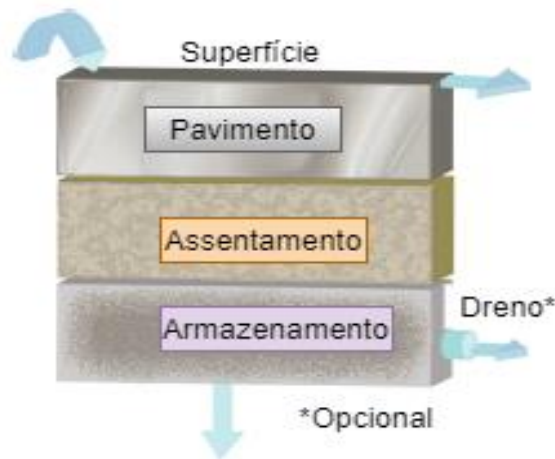


Figura 6 - Interface de um pavimento permeável no módulo LID no EPA SWMM
Fonte: Adaptado de Rossman (2010).

A camada superficial recebe chuvas e escoamentos diretos de outras áreas, a camada de armazenamento recebe água percolada da camada de pavimento acima dela e perde água por infiltração no solo natural subjacente, na camada de armazenamento ocorre a evapotranspiração da água e a vazão ocorre através de um sistema de drenagem de tubo perfurado e opcional.

Individualmente, no software EPA SWMM, cada uma das camadas possuem seus próprios parâmetros, como: porosidade do material granular (ou do solo), condutividade hidráulica (CO), diâmetro, porosidade, fator de colmatação, etc.

O módulo LID do SWMM para pavimentos permeáveis vem sendo utilizado por alguns autores. Randall et al., (2020) avaliaram o módulo LID do SWMM para pavimentos permeáveis e quantificaram a taxa de descarga e a de evaporação que pode ser esperada para vários tipos de pavimentos permeáveis. Bateni et al., (2020) utilizaram o módulo LID do SWMM para a

modelagem, em escala de laboratório, de pavimentos permeáveis com a presença de armazenamento de microdetenção subterrânea, este resultou em maior redução do escoamento superficial em comparação com o concreto permeável e com o asfalto poroso.

Bai et al., (2019) avaliaram o desempenho de pavimentos permeáveis, telhados verdes, jardins de chuva e de cinturões verdes côncavos quanto a redução do escoamento superficial e da taxa de pico e quanto ao custo econômico utilizando o módulo LID do SWMM. Os telhados verdes apresentaram melhor desempenho quanto a redução do escoamento superficial e da taxa de pico e o cinturão verde côncavo foi classificado como o mais viável economicamente.

Qin et al., (2013) avaliaram o desempenho do módulo LID do SWMM para pavimentos permeáveis, telhados verdes e *swales* em comparação com o sistema de drenagem convencional. Eles constataram que os três cenários de LID são mais eficazes na redução de inundações durante eventos de tempestades. Os *swales* possuem melhor desempenho durante tempo de pico inicial, os pavimentos permeáveis são melhores para eventos de pico médio e os telhados verdes para tempo de pico tardio.

Vaillancourt et al., (2019) utilizaram o módulo LID do SWMM para pavimentos permeáveis para quantificar o impacto da implementação de pavimentos permeáveis intertravado porosos em uma área urbana, na redução do escoamento superficial, este variou de 26% a 98% dependendo do evento de chuva, ao longo de um ano de monitoramento.

A Tabela 2 apresenta os componentes do sistema, os parâmetros, os valores fornecidos pelo Manual e as faixas de valores utilizados em artigos atuais.

Tabela 2 - Parâmetros dos pavimentos permeáveis utilizados na simulação LID - SWMM

Comp. do Sistema	Parâmetros	Valores do Manual	Faixa	Referências
Camada Superficial	Profundidade de arm.	1,905 mm	-	Zhang e Guo (2015)
	Cobertura vegetativa	0	0 – 20 mm	Bai et al., (2019); Randall et al., (2020)
	Coefficiente de Manning	0,015	0,017 - 0,12	Bateni et al., (2020); Bai et al., (2019)
	Declividade da superf.	5%	1% - 1,5%	Bai et al., (2019); Randall et al., (2020)
Pavimento	Espessura	150 mm	80 - 150 mm	Randall et al., (2020); Xie et al., (2017)
	Proporção de vazios	0,2	0,15 - 0,5	Bateni et al., (2020); Xie et al., (2017)
	Superfície impermeável	0	0 -0,9	Randall et al., (2020)
	Permeabilidade	2240 mm/h	200 - 250 mm/h	Bateni et al., (2020); Xie et al., (2017)
	Fator de colmatação	0	0	Xie et al., (2017); Bateni et al., (2020)
Assentamento	Espessura	-	100 – 150 mm	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Porosidade	-	0,3 – 0,5	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Capacidade de campo	-	0,110	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Ponto de murcha	-	0,10	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Condutividade hidráulica saturada	-	9 mm/h	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Inclinação da condutividade	-	19	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Potencial mátrico	-	45	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
Armazenamento	Altura	500 mm	250 mm – 510 mm	Bai et al., (2019); Randall et al., (2020)
	Proporção de vazios	0,75	0,43 – 0,75	Bai et al., (2019); Randall et al., (2020)
	Taxa de infiltração	120 mm/h	20 mm/h – 250 mm/h	Bateni et al., (2020)
	Fator de colmatação	0	0	Bai et al., (2019); Randall et al., (2020)
Dreno	Coefficiente do dreno	-	0,69 – 0,97 mm/h	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Expoente do dreno	-	0,5	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)
	Alt. de desloc do dreno	-	0 - 6 mm	Bai et al., (2019); Vaillancourt et al., (2019)

Fonte: Autoria Própria (2020)

3.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Moriasi et al. (2015) descreveram a calibração de um modelo como o processo de estimativa de parâmetros comparando as previsões do modelo para um determinado conjunto de dados nas condições observadas. Eles descrevem o modelo de validação como o de execução de um modelo utilizando os parâmetros do processo de calibração.

Intuitivamente, é esperado que quanto maior a quantidade de informações inferidas no modelo, usando todos os dados de várias medições, melhores estimativas dos parâmetros serão obtidas. Porém, a disponibilidade de dados de calibração pode ser limitada no processo de calibração por busca randômica (BROEKHUIZEN et al., 2020).

De acordo com Palla e Gnecco (2015), o módulo LID do SWMM para pavimentos permeáveis quando calibrado e validado corretamente, pode ser implementado com sucesso para modelar bacias urbanas e obter respostas hidrológicas.

Para avaliar o desempenho de um modelo, Moriasi et al., (2007) recomendam 3 medidas quantitativas estatísticas a serem utilizadas: coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o erro médio absoluto (MAE), o erro médio quadrático (RMSE). Moriasi et al. (2015) afirmam que a simulação do modelo pode ser usada satisfatoriamente quando $NS > 0,5$, $PBIAS \pm 15\%$ e $RMSE \leq 0,7$. A Tabela 3 apresenta os critérios de eficiência comumente utilizados para a validação de modelos hidrológicos.

Tabela 3 - Critérios de eficiência para avaliar a calibração.

Critério	Nomenclatura	Autores que utilizaram
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	Nash-Sutcliffe	Palla e Gnecco (2015); Khaleghi et al., (2020)
$EMA = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_i - O_i $	Erro médio absoluto	Platz et al., (2020)
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}$	Erro médio quadrático	Khaleghi et al., (2020); Zhang et al., (2020)
$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \times 100$	Viés percentual	Khaleghi et al., (2020); Zhang et al., (2020)
$VE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i}$	Erro de Volume Relativo	Broekhuizen et al., (2020)

Fonte: Autoria Própria (2020).

Platz, Simon e Tryby (2020), compararam as previsões do SWMM com dados empíricos relatados em diversas pesquisas, obtiveram um modelo de calibração e validação satisfatório para o módulo LID de pavimentos permeáveis, encontraram uma média NS de 0,74, PBIAS de -1,74% e um RMSE de 0,63. Palla e Gnecco (2015) em um estudo em escala de laboratório na Itália obtiveram uma média NS de 0,75 para simulações com três períodos de retorno para pavimentos permeáveis utilizando o SWMM.

Bateni et al., (2020) em um experimento em escala de laboratório, utilizaram o NS e a diferença percentual relativa para a calibração de seus sistemas de pavimentos permeáveis e obtiveram valores de NS maiores do que 0,5, concluíram que o módulo LID do SWMM pode ser utilizado satisfatoriamente para modelagens. Bai et al., (2019) em um experimento em escala de laboratório, utilizaram como parâmetros para a calibração a rugosidade de Manning, os coeficientes para a área impermeável, a área permeável e a profundidade do armazenamento de depressão na área impermeável. Vaillancourt et al., (2019) em um estudo em escala de campo, utilizaram os parâmetros de capacidade de campo (CC), ponto de murcha

(PM), condutividade hidráulica saturada, inclinação de condutividade, taxa de evaporação e coeficiente do dreno (CD) para realizar a calibração do módulo LID para pavimentos permeáveis e obtiveram um NS > 0,90 e um RMSE variando entre 4,7% a 8,1%.

3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade de um modelo de simulação embasado fisicamente é necessária para fornecer as informações que a simulação representa, ajudam a distinguir as necessidades de pesquisa e a avaliar a racionalidade do modelo (PANOS et al., 2020). De acordo com McCuen e Snyder (1983), o parâmetro de sensibilidade é univariado, ou seja, não há interação entre variáveis.

Para o módulo LID do SWMM, é importante identificar os parâmetros mais influentes para auxiliar na tomada de decisão dos modeladores e para reduzir a variação de resultados da simulação (Leimgruber et al. 2018). No entanto, a análise de sensibilidade dos parâmetros do módulo LID de pavimentos permeáveis do SWMM ainda não foi muito relatada (Randall et al., 2020).

Randall et al., (2020) classificaram 5 parâmetros como os mais sensíveis para o módulo LID do SWMM para pavimentos permeáveis. Entre eles, a taxa de evaporação da camada de superfície. Na camada de assentamento a fração de volume e a capacidade do solo e na camada de armazenamento o índice de vazios (IV) e o dreno de saída.

Wolfand et al., (2018) analisaram na camada de superfície a rigidez, a declividade da superfície e a área da bacia hidrográfica e encontraram a porcentagem de área da bacia hidrográfica tratada pelo LID como o fator mais sensível. Vaillancourt et al., (2019) avaliaram na camada de assentamento a capacidade do campo, o ponto de murcha, a condutividade hidráulica saturada e a inclinação da condutividade. Na camada de armazenamento a taxa de exfiltração e o coeficiente do dreno e concluíram que o coeficiente do dreno foi o parâmetro mais sensível para a sua modelagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado na cidade de Pato Branco/PR cuja localização pode ser observada na Figura 7, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR campus Pato Branco, situada na Via do Conhecimento, Km 1, conforme Figura 8. A cidade se localiza no sudoeste do estado do Paraná e segundo dados obtidos no Instituto Brasileiro Geografia e Estatísticas (IBGE), conta com uma população de 82.881 habitantes, pelo senso de 2019. Possui uma área de 537,8 km² e a densidade demográfica é de 153,6 hab/km².

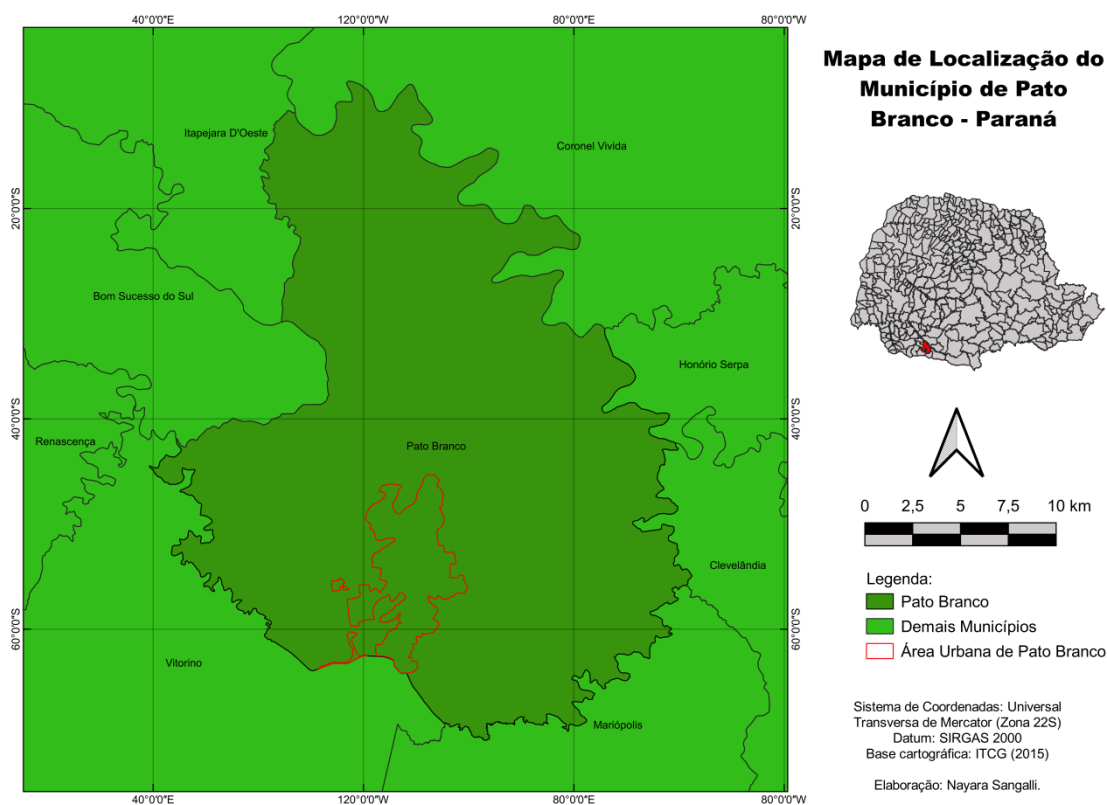


Figura 7 - Mapa de Localização de Pato Branco/PR
Fonte: Autoria Própria (2020).

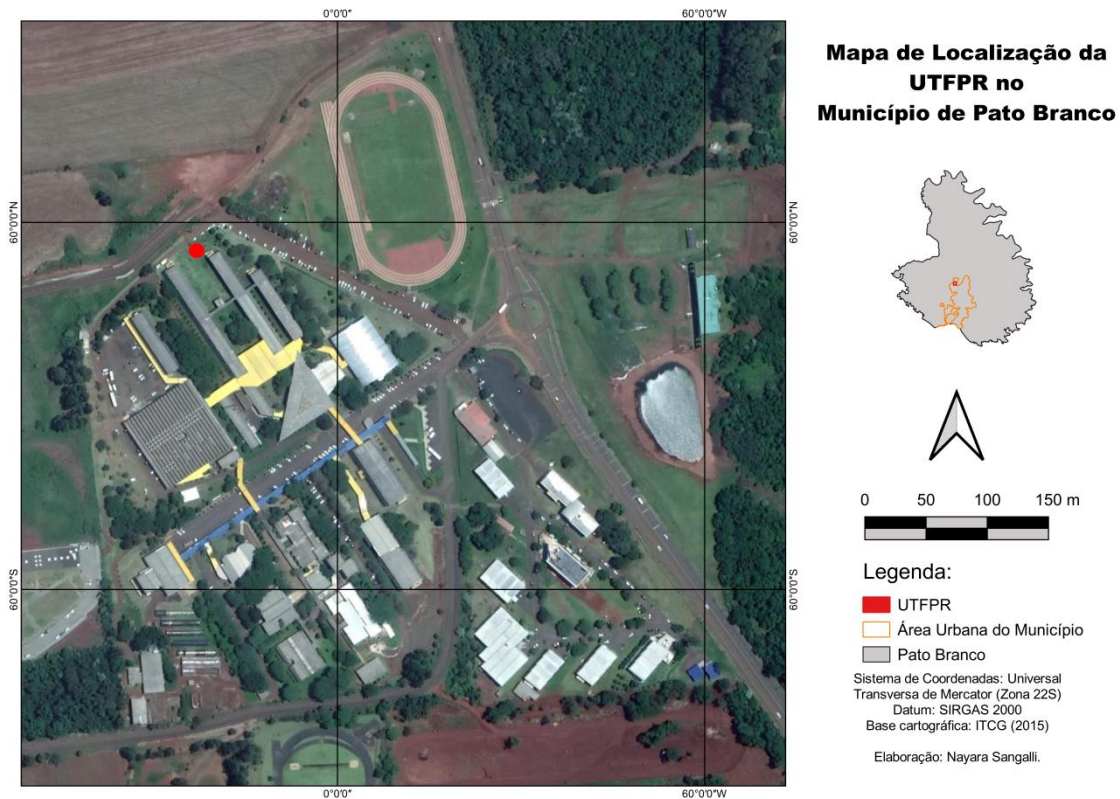


Figura 8 - Mapa de Localização da UTFPR campus Pato Branco/PR
 Fonte: Autoria Própria (2020).

De acordo com Alvares et al. (2013), o clima de Pato Branco é subtropical úmido mesotérmico, obedece a classificação de Koeppen, do tipo Cfb, sem estações secas e com geadas frequentes. A cidade é banhada pela bacia hidrográfica do Rio Iguaçu. Na área de estudo ocorrem solos da ordem Latossolo, Natossolo, Cambissolo Distrófico e Neossolo.

Quanto a pluviometria da região, se analisou uma série histórica de 1979 a 2005, a média de precipitação anual foi de 2109,79 mm/ano, sendo outubro o mês mais chuvoso, e agosto o mês menos chuvoso. 29,93% do total da precipitação anual se concentraram nos meses de outubro, novembro e dezembro, já no trimestre menos chuvoso – julho, agosto e setembro, concentrou 20,51% do total precipitado (TABALIPA & FIORI, 2008).

A Figura 9 demonstra o gráfico da precipitação média mensal de longo termo (histórica) para a cidade de Pato Branco – PR. Os dados são da estação passo da ilha (código: 2652033). Foram verificadas as séries históricas de 1979 a 2005.

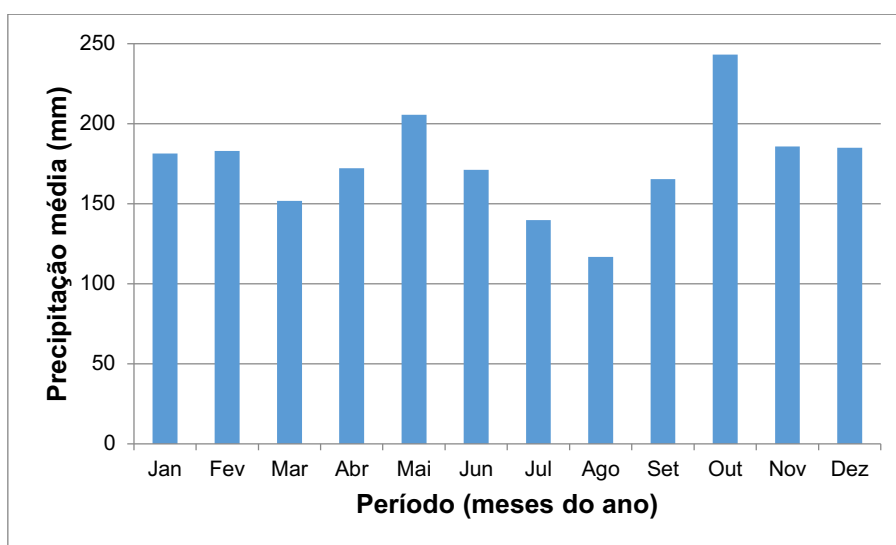


Figura 9 - Precipitação média mensal de longo termo para Pato Branco/PR
 Fonte: Autoria Própria (2020). Dados disponíveis em:
www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas

Ainda de acordo com Tabalipa e Fiori (2008), a temperatura média da cidade de Pato Branco – PR variou entre 14°C e 22°C. Quanto aos ventos, a velocidade média é de 10 km/h, e a cidade está sob influência principalmente dos ventos nas direções Sudeste (23,05% do total) e Sul (21,60% do total). A umidade relativa do ar em quase todos os meses do ano é de 74%, sendo considerada alta.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS NOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS

4.2.1 Brita 3 (Camada De Armazenamento)

4.2.1.1 Granulometria

Para determinar a composição granulométrica do agregado graúdo foi utilizada a norma NBR 248:2001. A amostra foi coletada de acordo com as recomendações da NBR 26:2000, esta última determina que para o agregado

gráudo se deve obter 3 amostras parciais para a realização do ensaio, obtidas na base, meio e alto da pilha com brita.

Após a coleta, uma das amostras ficou reservada e foi umedecida para evitar segregação. As outras 2 amostras foram preparadas conforme a norma redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório NBR NM 27:2000. Também foram umedecidas para evitar a perda de finos. Então, foi utilizado o quarteamento (método B). A massa utilizada por amostra foi de 7,5 kg.

As 2 amostras foram secas em estufa por 24h e resfriadas em temperatura ambiente e foi determinada a massa das amostras. A primeira amostra foi despejada sobre o conjunto de peneiras e se fez a agitação mecânica, para permitir a separação e a classificação previa dos diferentes tamanhos dos grãos. Foi verificada a massa retida em cada uma das peneiras e posteriormente, o procedimento foi repetido para a segunda amostra. Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados no Apêndice B.

4.2.1.2 Massa Específica Aparente

Para determinar a massa unitária do agregado gráudo foi utilizada a ABNT NBR 45:2006. A amostragem do agregado foi realizada seguindo as recomendações das normas NBR 26:2000 e NM 27:2000. O procedimento foi realizado com 3 amostras de aproximadamente 21 kg cada.

Como a dimensão do agregado gráudo é de 37,5 mm, foi adotado como procedimento de ensaio o Método A – Massa unitária de material compactado, para agregados com a dimensão igual ou menor do que 37,5 mm.

Foi determinada e registrada a massa do recipiente vazio. O recipiente foi preenchido com o agregado gráudo até 1/3 de sua capacidade e nivelado manualmente. Depois, foi efetuado o adensamento da camada de agregado com 25 golpes da haste de adensamento.

O procedimento foi repetido para 2/3 do recipiente e para o mesmo cheio e finalmente foi anotada a massa do recipiente e do seu conteúdo.

Para determinar a massa unitária no estado solto, foi empregado o Método C. Primeiro, foi registrada a massa do recipiente vazio. Em seguida o mesmo foi preenchido de água e com o agregado, foi nivelado e determinado então a sua massa. Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados no Apêndice C.

4.2.1.3 Massa específica

A massa específica do agregado graúdo foi determinada a partir da ABNT NBR 53:2009.

Foi tomada a massa da amostra total, que somou 16,65 kg. Em seguida, a amostra foi dividida em 3 partes de aproximadamente 5,55 kg cada. Então as 3 amostras foram imersas em água à temperatura ambiente por um período de 24 ± 4 h. Após esse período foi realizada a operação de enxugamento das amostras, envolvendo-as em um pano absorvente até a água visível ser eliminada. Posteriormente, se mediu a massa das amostras em uma balança de precisão, e assim foi obtida a massa do agregado saturado com superfície seca (ms).

Para determinar a massa em água (ma), as amostras foram submergidas em água e mantidas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e suas massas foram tomadas dentro da água com uma balança de precisão de 1g. Então as amostras foram secas a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e esfriadas em temperatura ambiente, depois foi tomada novamente a massa em balança com precisão de 1g, assim se obteve a massa do agregado seco (msec). Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados no Apêndice D.

4.2.2 Pedrisco (Camada de Assentamento)

4.2.2.1 Granulometria

Para determinar a composição granulométrica da camada de assentamento foi utilizada a norma NBR 248:2001. A amostra foi coletada de acordo com a NBR 26:2000, esta determina que para o agregado miúdo se deve obter 3 amostras parciais para a realização do ensaio, obtidas na base, meio e alto da pilha com pedrisco. A massa utilizada por amostra foi de 0,5 kg.

As 3 amostras foram secas em estufa por 24h e resfriadas em temperatura ambiente e se determinou a massa de cada uma delas. A primeira amostra foi despejada sobre o conjunto de peneiras e se fez a agitação mecânica, para permitir a separação e a classificação previa dos diferentes tamanhos. Foi verificada a massa retida em cada uma das peneiras e posteriormente, o procedimento foi repetido para a segunda e para a terceira amostra. Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados no Apêndice E.

4.2.2.2 Massa Unitária

Para determinar a massa unitária do agregado miúdo foi utilizada a ABNT NBR 45:2006. A amostragem do agregado foi realizada seguindo as recomendações das normas NBR 26:2000 e NBR 27:2000. Foi adotado como procedimento de ensaio o Método A – Massa unitária de material compactado, para agregados com a dimensão igual ou menor do que 37,5 mm.

Primeiramente, foi determinada e registrada a massa do recipiente vazio. O recipiente foi preenchido com o agregado miúdo até 1/3 de sua capacidade e nivelado com os dedos. Depois, foi efetuado o adensamento da camada de agregado com 25 golpes da haste de adensamento.

O procedimento foi repetido para 2/3 do recipiente e para o mesmo cheio e finalmente foi anotada a massa do recipiente e do seu conteúdo.

Para determinar a massa unitária no estado solto, foi empregado o Método C. Primeiro, foi registrada a massa do recipiente vazio. Em seguida o

mesmo foi preenchido de água e com o agregado, foi nivelado e determinado então a sua massa.

4.2.2.3 Massa Específica

A massa específica do agregado miúdo foi determinada a partir da ABNT NBR 53:2009.

Foi tomada a massa da amostra total. Em seguida, a amostra foi dividida em 3 partes. Então, as 3 amostras foram imersas em água à temperatura ambiente por um período de 24 ± 4 h. Após esse período foi realizada a operação de enxugamento das amostras, envolvendo-as em um pano absorvente até a água visível ser eliminada. Posteriormente, se mediu a massa das amostras em uma balança de precisão, e assim foi obtida a massa do agregado saturado com superfície seca (ms).

Para determinar a massa em água (ma), as amostras foram submergidas em água e mantidas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e suas massas foram tomadas dentro da água com uma balança de precisão de 1g. Então as amostras foram secas a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e esfriadas em temperatura ambiente, depois foi tomada novamente a massa em balança com precisão de 1g, assim se obteve a massa do agregado seco (msec). Os resultados dos ensaios de massa unitária e massa específica se encontram no Apêndice F.

4.2.3 Paviers (Camada de Revestimento)

4.2.3.1 Absorção de Água

Para a realização do ensaio de porosidade dos paviers foi utilizada a norma ABNT NBR 9781:2013. A amostra foi composta de 6 corpos de prova de bloco de concreto intertravado convencional e 6 corpos de prova de bloco de concreto poroso. Eles foram imersos em água à uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, por um período de 24h. Após, o excesso de água foi retirado com um pano, então foi anotada a massa dos corpos de prova saturados.

Posteriormente, os corpos de prova saturados foram levados à estufa com temperatura a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24h. Depois, foi medida a massa de cada um dos corpos de prova. A medição foi repetida a cada 2h, até que a diferença de massa não fosse superior a 0,5% em relação ao valor anterior. O Apêndice G apresenta os resultados deste ensaio.

4.2.3.2 Condutividade Hidráulica

Para a realização do ensaio de porosidade dos *pavers* foi utilizada a norma ABNT NBR 16416:2015. O procedimento consistiu primeiramente na pré-molhagem para a determinação do volume de água a ser utilizado no ensaio, com a saturação da área de ensaio. Foi utilizado 3,6 kg de água e se mediu o tempo de infiltração. Então, foi posicionado um cilindro com diâmetro 300 ± 10 mm sobre o pavimento, atentou-se para que não ocorressem vazamentos de água para fora da área interna do cilindro.

O ensaio deve ser iniciado em até dois minutos após a pré-molhagem. O volume de água determinado pelo tempo da pré-molhagem precisa ser vertido no interior do cilindro mantendo-se uma coluna de água com altura oscilando entre 10 a 15 mm em relação a superfície do pavimento. Foi anotado o tempo decorrido entre o início de aplicação da água e a infiltração total, considerada até que toda a água seja infiltrada.

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS

4.3.1 Dimensionamento Mecânico

4.3.1.1 Determinação do CBR

A capacidade de sustentação do solo quanto ao tráfego para determinada estrada é conhecido pelo Índice de Suporte Califórnia – ISC (*California Bearing Ratio* – CBR). A partir da determinação deste parâmetro, se

define o uso apropriado do solo em camadas de pavimentos (EMMERT; PEREIRA, 2016).

O Índice de Suporte Califórnia (CBR), foi obtido através da realização de ensaio, seguindo as recomendações da ABNT NBR 9895:2016, a granulometria de acordo com a ABNT NBR 181:2016 e a amostra foi preparada de acordo com a ABNT NBR 6457:1986.

A norma recomenda moldar 5 corpos de prova, porém, foram moldados 7 corpos de prova. Eles ficaram imersos em um tanque de água por 4 dias e a cada 24h foram feitas as leituras das extensões. Posteriormente, foi realizado o ensaio de penetração e a partir dos valores obtidos foi traçada a curva pressão-penetração, e foi calculado o ISC de cada corpo de prova. O corpo de prova escolhido para o dimensionamento do pavimento permeável foi o que se encontrou na umidade ótima, ou seja, o corpo de prova 4.

Os limites de liquidez e de plasticidade, também conhecidos como limites de Atterberg, foram determinados com o solo em sua condição natural, aplicando os procedimentos normatizados pela ABNT. No caso do limite de liquidez, foi determinado de acordo com a NBR 6459:2016 e o limite de plasticidade segundo a NBR 7180:2016.

Para se obter a máxima densidade aparente seca e a umidade ótima de cada amostra, foram seguidas as instruções da norma ABNT NBR 7182:2016. Por fim, o Índice de Suporte Califórnia foi obtido através da Equação 1.

$$ISC = \frac{PC \cdot 100}{PP} \quad (1)$$

Na qual: ISC = Índice de suporte Califórnia (adimensional); PC = Pressão calculada ou pressão corrigida (MPa) e PP = Pressão padrão (MPa).

Para realizar o dimensionamento mecânico foi utilizado o método de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). De acordo com Souza (1981), primeiramente é calculado o índice de

suporte, tanto dos materiais granulares constitutivos quanto do subleito, através do CBR, apresentado na Equação 2. É possível utilizar o CBR corrigido ou índice de grupo (IG), quando for justificável maior segurança no projeto.

$$I.S = \frac{CBR + CBRig}{2} \quad (2)$$

Com a condição $I.S \leq CBR$. Onde: I.S = Índice de Suporte; CBR = Índice de Suporte Califórnia; CBRig = Índice de Suporte Califórnia Corrigido.

Posteriormente, se calcula o tráfego. O pavimento é dimensionado de acordo com o número de operações de um eixo adotado como padrão (N). Para pavimentos permeáveis Woods-Ballard et al., (2015) recomendam um período de retorno de 20 anos. O volume médio de tráfego diário, V_m é apresentado na Equação 3 e o volume total de tráfego, durante o período V_t , em um sentido é apresentado na Equação 4.

$$V_m = \frac{V_1 \cdot \left[2 + (p - 1) \cdot \frac{t}{100} \right]}{2} \quad (3)$$

Sendo: V_m = Volume médio diário de tráfego (veículos); V_1 = Volume médio diário de tráfego no ano de abertura (veículos); P_i = Período (anos); t = Taxa de crescimento anual (%).

O volume médio diário de tráfego no ano de abertura (V_1) é o número de vagas do estacionamento próximo ao bloco J1, na UTFPR *campus* Pato Branco, é considerada uma área de tráfego de veículos leves, automóveis e motocicletas.

$$V_t = 365 \cdot p \cdot V_m \quad (4)$$

Depois, é calculado o número equivalente de operação do eixo simples padrão (N), apresentado na Equação 5.

$$N = V_t \cdot FE \cdot FC \quad (5)$$

Onde: FE = Fator de Eixos (Adotado); FC = Fator de Carga (Adotado).

O FE é o número que multiplicado pelo número de veículos, resulta no número de eixos correspondentes. É possível se obter este parâmetro considerando o volume total de tráfego e a contagem do número total de eixos (n), conforme a Equação 6.

$$FE = \frac{n}{V_t} \quad (6)$$

Onde: n = contagem do número total de eixos.

De acordo com o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981), os coeficientes de equivalência estrutural são definidos para os diferentes materiais que compõem os pavimentos. É designado genericamente para a base (Kb) e para a sub base (Ks).

Conhecendo os parâmetros anteriores, é possível realizar o dimensionamento do pavimento. A partir do valor do CBR é possível encontrar a espessura total do pavimento, através do gráfico representado pela Figura 10.

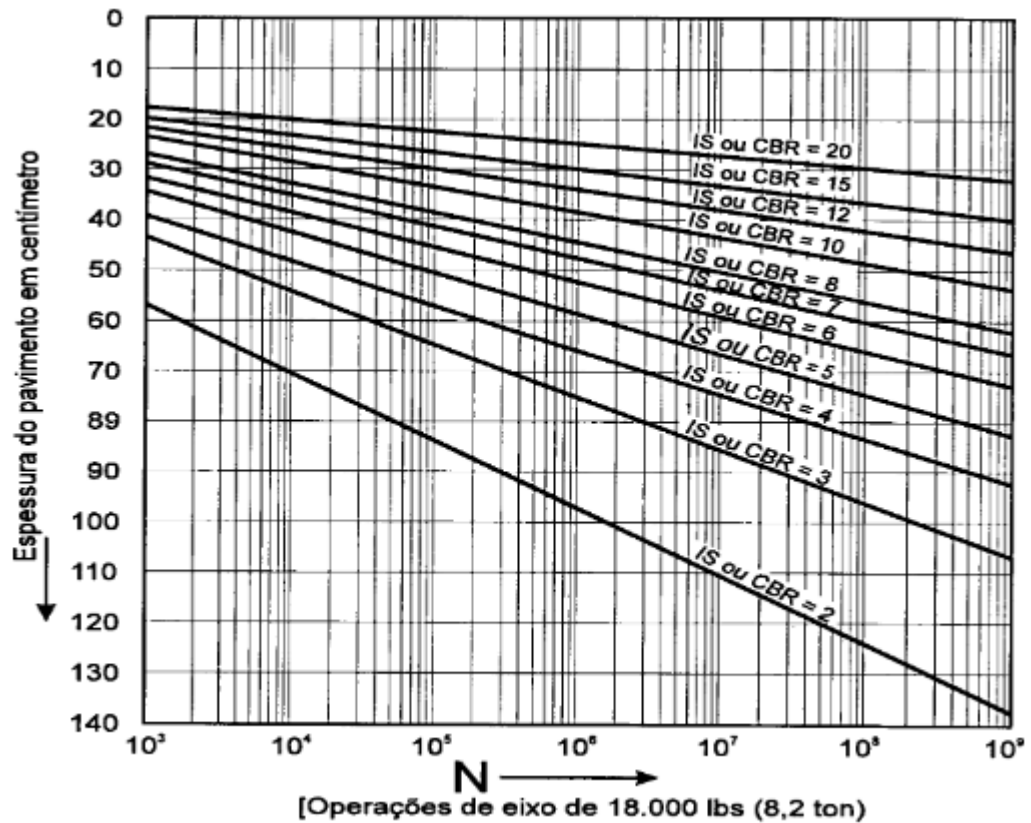


Figura 10 - Ábaco de Dimensionamento de pavimentos flexíveis
 Fonte: Método de projetos de pavimentos flexíveis do DNER (1981).

4.3.2 Dimensionamento Hidrológico

4.3.2.1 Método da curva envelope

O dimensionamento hidrológico pode ser efetuado a partir do método da curva envelope. Este método tem sido utilizado para dimensionar os sistemas de infiltração. A partir da derivação da equação da continuidade, é obtido o volume de retenção, com a máxima diferença entre as curvas dos volumes de entrada e saída dos sistemas acumulados (CASTRO, 2011; SOBRINHA, 2012; TECEDOR, 2014).

A partir da associação de uma chuva de projeto a um balanço hídrico são obtidas as dimensões mínimas das camadas e os volumes de armazenamento necessários (SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007). O período de

retorno adotado foi o de 10 anos, para estruturas de infiltração total (WOODS-BALLARD et al., 2015).

Através da Equação 7, de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), para a cidade de Pato Branco – PR, proposta por Reis (2017), se definiu a intensidade da chuva a ser empregada no pavimento.

$$i = \frac{986,7 \cdot (TR)^{0,1457}}{(tc + 9,791)^{0,7244}} \quad (7)$$

Na qual: i = Intensidade de precipitação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); TR = Tempo de Retorno (anos); tc = Duração da chuva (min); a , b , c = Parâmetros da equação.

Posteriormente, a equação IDF é convertida para uma IDF do tipo Talbot, conforme a Equação 8.

$$i = \frac{a \cdot T^b}{tc + c} \quad (8)$$

Silveira (2003), a partir de simulações numéricas determinou os parâmetros da equação IDF de Talbot, conforme a Equação 9.

$$i = \frac{k \cdot T^m}{(t + d)^n} \quad (9)$$

Na tentativa de ajustar os parâmetros, Silveira (2003) realizou a correção dos coeficientes por meio de simulações numéricas, para aproximar os valores das expressões, conforme expresso nas Equações 10, 11 e 12.

$$a = 0,68 \cdot k^{(0,06 \cdot d^{1,13} \cdot n^{-0,26})} \quad (10)$$

$$b = m \quad (11)$$

$$c = 1,32 \cdot n^{-2,28} \cdot d^{0,89} \quad (12)$$

Posteriormente, é obtido o volume de dimensionamento ou volume Máximo ($V_{m\acute{a}x}$), pela Equação 13.

$$V_{m\acute{a}x} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} TR^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma \sqrt{H}} \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (13)$$

Onde: $V_{m\acute{a}x}$ = Volume máximo (cm); TR = período de retorno (anos); a , b e c = parâmetros da equação IDF obtidos anteriormente; β = produto do coeficiente do escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área de saída = 1; q_s = vazão de saída constante do dreno ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); γ = Razão entre área de percolação e volume do dispositivo (mm^{-1}); H = Profundidade média do volume de acumulação do dispositivo (mm).

A partir da obtenção do $V_{m\acute{a}x}$, pode ser efetuado o cálculo da espessura do reservatório do pavimento para reservatórios horizontais (declividade zero). A Equação 14 representa a altura máxima do reservatório.

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\eta} \quad (14)$$

Na qual $H_{m\acute{a}x}$ = Altura máxima do reservatório (cm) e η = porosidade do material de enchimento da camada de armazenamento.

4.3.2.2 Método da NBR 16416:2015

O dimensionamento hidrológico do pavimento permeável também foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 16.416:2015 (ABNT, 2015). A altura da base granular foi calculada através da Equação 15.

$$H_{max} = \frac{P_e A_2 + P - f t_{enc}}{n} \quad (15)$$

Onde:

H_{max} = Espessura total da camada do reservatório (m); P_e = Precipitação efetiva sobre a área de contribuição (m); A_2 = Razão entre a área de superficial de entorno aos pavimentos permeáveis (A_c) (m^2) e a área superficial dos PP (A_p) (m^2); P = Precipitação de projeto (m); f = Taxa de infiltração de água no solo (m/h); t_{enc} = Tempo de enchimento de água da camada de armazenamento (horas); n = Porosidade total da camada de armazenamento.

Foi adotado um tempo de enchimento igual há 2 horas, conforme recomendado pela NBR 16.416/2015. Como medida simplificadora, não se considerou área de contribuição no entorno dos PP. Por isso, a única entrada de água (na forma de precipitação) ocorre sobre a área superficial dos pavimentos permeáveis. Foi adotado um sistema com drenos de fundo, junto à base dos PP. Por isso, o sistema é classificado como sem infiltração de água na camada de subleito.

A precipitação de projeto foi obtida usando a equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) do município de Pato Branco. A intensidade da precipitação de projeto foi calculada por REIS (2017) (Equação 19).

Foi escolhido um período de retorno de 10 anos, conforme recomendado pela NBR 16.416/2015. Foi adotado um tempo de duração da precipitação de 1 minuto.

4.4 EXECUÇÃO DO MÓDULO EXPERIMENTAL

Para a execução e o monitoramento do módulo experimental de pavimento permeável foram seguidas as recomendações contidas no *The SuDS Manual* (WOODS-BALLARD et al., 2015) e da norma NBR 16416:2015.

Inicialmente, as etapas de execução efetuadas na área experimental foram a limpeza e a escavação. Em seguida, foi realizado o nivelamento e a compactação do terreno e, posteriormente, o terreno foi regularizado e foram

postos *pallets* sobre ele, com a finalidade de servirem como base para o módulo experimental, conforme a Figura 11.

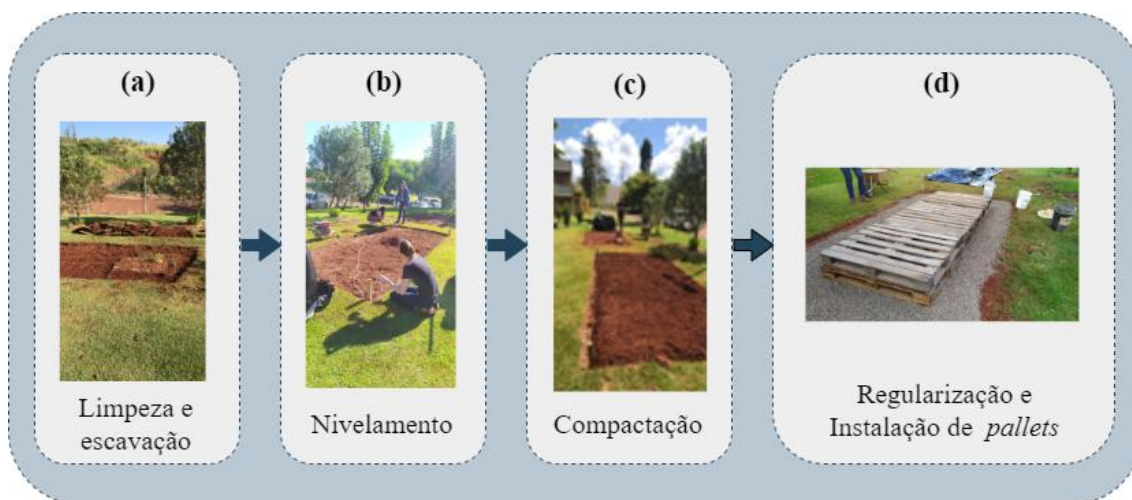


Figura 11 - Etapas de execução dos módulos experimentais: (a) Limpeza e Escavação; (b) Nivelamento; (c) Compactação; (d) Regularização e Instalação de *pallets*.
Fonte: Autoria Própria (2020).

O módulo foi construído em chapa metálica de 0,97m de comprimento por 0,98m de largura. O revestimento utilizado foi o bloco de concreto intertravado permeável (*paver poroso*). O bloco possui superfície retangular e dimensões de 10x20x6 cm.



Figura 12 - Bloco de concreto intertravado poroso
Fonte: Autoria própria (2020).

Seguindo as recomendações da NBR 9781:2013 foi realizada a avaliação dimensional do *paver*, utilizando paquímetro. É recomendado que as dimensões não diferissem de ± 3 mm entre os pavers.

O módulo foi preenchido com Brita 3 e pedrisco, atentando-se para a compactação de cada camada. Entre estas camadas foi instalada uma manta

geotêxtil, a fim de impedir o carreamento de sólidos entre elas. Então, foi disposto o revestimento de bloco de concreto intertravado poroso sobre o módulo experimental.

No módulo experimental foi instalado um dreno de fundo, um tubo perfurado de PVC, com 75 mm de diâmetro, está tubulação seguiu para o reservatório. Por último, acima da camada de assentamento foi instalado um dreno para coletar e direcionar a água do escoamento superficial a seu respectivo reservatório. Na Figura 13 está representado o módulo experimental de pavimento permeável em uma perspectiva tridimensional.

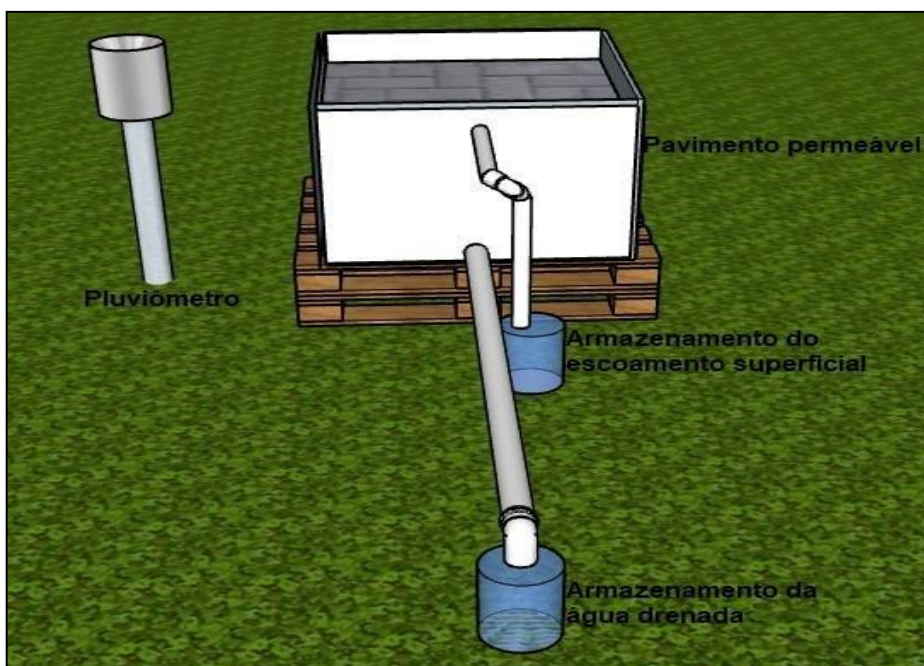


Figura 13 - Representação tridimensional do módulo experimental de pavimento permeável
Fonte: Autoria Própria (2020).

4.5 MONITORAMENTO DO MÓDULO EXPERIMENTAL

Para o monitoramento do módulo experimental se utilizou 2 transdutores de pressão, 1 pluviômetro de báscula e 1 data *logger*.

Os transdutores de pressão são da marca HOBO, modelo U20L-01, permitem medir a pressão (kPa) e a temperatura da água (°C), com resolução

de 0,21 cm e com precisão de 0,1%. Os intervalos de registro são dados de 0,1s até 18h.

O pluviômetro de balança é da marca DAVIS, modelo 6463, ele permite o monitoramento do volume pluviométrico de maneira automática e contínua. A resolução do equipamento é de 0,2 mm. A faixa de medição é de 0 a 700 mm/h, a sessão de coleta é de 200 mm de diâmetro, e, além disso, disponibiliza dados de todas as intensidades de precipitação (mínima, média ou máxima), o intervalo de leitura será a cada 1 min.

De acordo com Woods-Ballard et al., (2015), os eventos de precipitação devem possuir uma altura de chuva superior a 2,5 mm e devem ser separados pelo intervalo de 6 h, para serem considerados independentes.

Com o auxílio dos transdutores de pressão foi medida a lâmina retida no tanque de coleta, drenada pelo módulo experimental. O tanque de coleta de escoamento superficial permaneceu vazio para todos os eventos coletados durante o período de monitoramento.

O intervalo de leitura foi a cada 1 min, um transdutor ficou no reservatório de drenagem e outro no reservatório de escoamento superficial. O monitoramento ocorreu de janeiro a maio de 2021.

4.6 MODELAGEM USANDO O EPA SWMM

Selecionada a área de estudo, determinou-se o módulo experimental, com área de 0,94 m², podendo observar a inserção da subárea no *software* EPA SWMM. Sendo assim, determinou-se a topologia do sistema de drenagem, bem como seus exutórios, os quais podem ser observados na Figura 14.

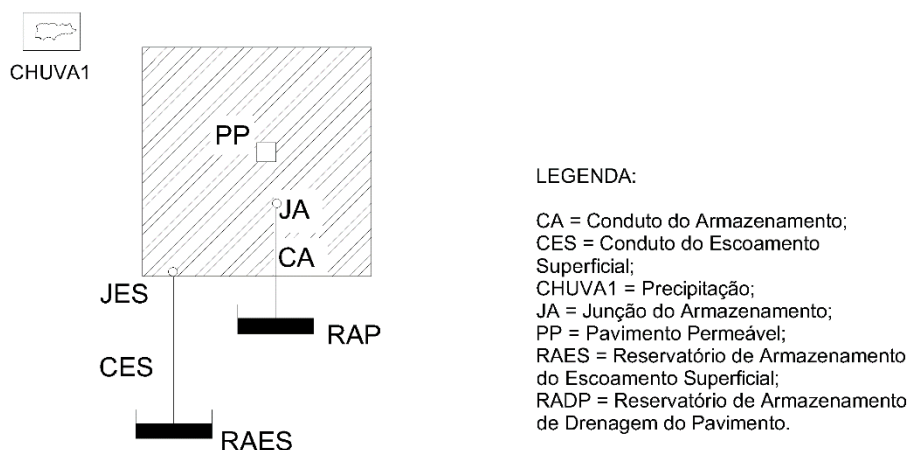


Figura 14 - Topologia dos módulos experimentais
 Fonte: Autoria própria (2020).

A camada que recebe a precipitação e a contribuição de outras áreas é a superfície. Para pavimentos permeáveis, a camada superficial é o material permeável, pois este sistema não possui berma. Esta camada recebe diretamente a precipitação e a encaminha para as outras camadas por infiltração. A água pode ir para a atmosfera pelo processo de evapotranspiração e pode sair do sistema através do escoamento superficial (Equação 18).

$$\frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad (18)$$

Na qual: d_1 = Armazenamento de água na camada superficial (mm); i = Intensidade de precipitação (mm/h); q_0 = Vazão de contribuição de áreas impermeáveis adjacentes (mm/h); e_1 = Evapotranspiração na camada superficial (mm/h); f_1 = Escoamento superficial (mm/h) e q_1 = Fluxo de água que vai para a camada inferior (mm/h).

Para a modelagem no SWMM a vazão de contribuição de áreas impermeáveis adjacentes foi nula, assim como a evapotranspiração na camada superficial.

A vazão que vai para a camada inferior (q_1), é calculada utilizando a equação de Manning de fluxo uniforme para o solo. Assume-se que a largura da área de fluxo é muito maior que a profundidade deste fluxo (Equação 19).

$$q_1 = \frac{1,49}{n_1} \sqrt{S_1} (W_1/A_1) \phi_1 (d_1 - D_1)^{5/3} \quad (19)$$

Na qual: n_1 = Coeficiente de rugosidade da superfície; S_1 = Inclinação da superfície (mm/mm); W_1 = Comprimento total de um dos lados do pavimento permeável onde o escoamento é coletado (mm); D_1 = Profundidade de armazenamento da depressão superficial (mm); A_1 = Área da superfície do pavimento permeável (mm²).

A camada de pavimento é a composta pelo material de preenchimento ou pelo pavimento, é representada no módulo LID do EPA SWMM pela Equação 20.

$$D_4 \cdot (1 - F_4) \frac{\partial \theta_4}{\partial t} = f_1 - e_4 - f_4 \quad (20)$$

Na qual: D_4 = Espessura da camada de pavimento (mm); F_4 = Fração da área da superfície ocupada por blocos impermeáveis (mm); f_1 = Escoamento superficial (mm/h); e_4 = Evapotranspiração na camada do pavimento (mm/h) e f_4 = Taxa de fluxo nominal do pavimento (mm/h).

Para a modelagem no SWMM a fração da área da superfície ocupada por blocos impermeáveis foi nula, pois todos os blocos são permeáveis. A evapotranspiração na camada do pavimento também foi nula.

A camada de assentamento pode ser composta por uma mistura de agregados, ela perde água por evapotranspiração para a atmosfera e por percolação para a camada de armazenamento (Equação 21).

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_4 - e_2 - f_2 \quad (21)$$

Na qual: D_2 = Espessura da camada de assentamento (mm); f_4 = Taxa de fluxo nominal do pavimento (mm/h); e_2 = Evapotranspiração na camada de assentamento (mm/h) e f_2 = Taxa de percolação da camada de assentamento (mm/h).

Para a modelagem no SWMM, a evapotranspiração na camada de assentamento foi desconsiderada, assim como a taxa de percolação do solo. A taxa de fluxo nominal no pavimento é representada na Equação 22.

$$f_4 = \min \left[f_4, \frac{(D_3 - d_3)\phi_3}{\Delta t + e_3 + f_3 + q_3} \right] \quad (22)$$

Na qual: D_3 = Espessura da camada de armazenamento (mm); d_3 = Armazenamento de água na camada de armazenamento (mm); ϕ_3 = Fração nula da camada de armazenamento (Volume nulo/ Volume total); e_3 = Evapotranspiração na camada de armazenamento (mm/h); f_3 = Taxa de exfiltração da camada de armazenamento para a camada de assentamento (mm/h); q_3 = Taxa da vazão de sub-dreno da camada de armazenamento (mm/h).

A camada que irá armazenar a água infiltrada, geralmente composta por brita, seixos ou cascalho é a de armazenamento. Ela permite a infiltração em solos nativos e pode ter remoção de água através de um dreno. Ela está representada conforme a Equação 23.

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad (23)$$

Na qual: d_3 = Armazenamento de água na camada de armazenamento (mm); f_2 = Taxa de percolação do solo (mm/h).

Para a modelagem no SWMM a evapotranspiração na camada de armazenamento foi nula, assim como a taxa de percolação do solo. A taxa de exfiltração (f_3) do fundo da zona de armazenamento para o solo normalmente depende da profundidade da água armazenada e do perfil de umidade do solo sob a unidade LID. O SWMM assume que a taxa de exfiltração é a condutividade hidráulica saturada do solo. O pavimento permeável deste experimento é do tipo C e, portanto, não ocorre a infiltração da água no solo.

A evapotranspiração na camada de armazenamento (e_3) é apresentada na Equação 24, e a taxa de vazão de sub-dreno da camada de armazenamento (q_3), é expressa pela Equação 25.

$$e_3 = \{\min[E_0(t) - e_1 - e_2, \phi_3 d_3]/\Delta_t\} \quad (24)$$

$$q_3 = \min\left[q_3, \frac{(d_3 - D_{aD})\phi_3}{\Delta_t + f_2 - f_3 - e_3}\right] \quad (25)$$

Os parâmetros de entrada para o editor de pavimento permeável no SWMM são apresentados na Tabela 4. Foi considerado que o pavimento permeável ocupou 100% da área do módulo experimental.

Tabela 4 – Valores de entrada para o módulo de pavimento permeável no SWMM

Camada	Parâmetros	Valores iniciais	Sensibilidade/Calibração
Superfície	Altura da Berma (mm)	0	NÃO
	Fração de vegetação	0	NÃO
	Rugosidade de Manning	0,024	NÃO
	Inclinação (%)	1	NÃO
Assentamento	Altura (mm)	30	NÃO
	Porosidade	0,5	SIM
	Capacidade de campo	0,06	SIM
	Ponto de murcha	0,02	SIM
	Condutividade hidráulica	125	SIM
	Inclinação da condutividade	10	NÃO
Armazenamento	Potencial mátrico (mm)	50	NÃO
	Altura (mm)	470	NÃO
	Índice de vazios	0,6	SIM
	Taxa de infiltração	0	NÃO
	Fator de colmatação	0	NÃO
Dreno	Expoente do dreno	0,5	SIM
	Coefficiente do dreno	25	SIM
	Offset do dreno	20	SIM
Outros	Área total (ha)	0,00009506	NÃO
	Largura (m)	0,89	NÃO

Fonte: **Autoria Própria (2021).**

4.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para a análise de sensibilidade dos parâmetros do pavimento permeável do SWMM foi utilizado um modelo focado em LID (Rosa, Clausen e Dietz, 2015). Com base neste método os parâmetros foram ajustados em um intervalo de $\pm 90\%$, mantendo todos os outros parâmetros inalterados. Para os eventos de precipitação analisados a sensibilidade foi avaliada para o resultado de lâmina da água do reservatório de descarga do dreno e para o tempo em

que leva para ocorrer esta lâmina máxima no reservatório de descarga do dreno.

Existem mais de 20 parâmetros de entrada para o módulo LID de pavimentos permeáveis do SWMM. Com base na análise de sensibilidade proposta por Randall et al., (2020) e Vaillancourt et al., (2019), os parâmetros serão testados um de cada vez.

Foram analisados oito parâmetros do módulo LID do SWMM, sendo a porosidade, a capacidade de campo, o ponto de murcha e a condutividade da camada de assentamento. O índice de vazios da camada de armazenamento e o coeficiente do dreno, o expoente do dreno e o *offset* do dreno (OD). A Tabela 5 descreve os parâmetros analisados e seus respectivos intervalos de análise.

Tabela 5 – Intervalos de valores para a análise de sensibilidade

Camada	Parâmetros	Valores originais	Intervalo de análise
Assentamento	Porosidade	0,5	0,1 - 0,95
	Capacidade de campo	0,06	0,06 - 0,114
	Ponto de murcha	0,02	0,002 - 0,038
	Condutividade	125	12,5 - 237,5
Armazenamento	Índice de vazios	0,6	0,06 - 0,96
Dreno	Expoente do dreno	0,5	0,05 - 0,95
	Coeficiente do dreno	25	2,5 - 47,5
	Offset do dreno	20	2,0 - 38,0

Fonte: Aatoria Própria (2021).

O coeficiente de sensibilidade local (S_R) é demonstrado através da Equação 16. Ele permite a comparação de sensibilidades para parâmetros de entrada com diferentes ordens de magnitude (ROSA, CLAUSEN e DIETZ, 2015). O parâmetro CS representa uma função do intervalo de entrada para a resposta não linear.

$$S_R = \left(\frac{\delta R}{\delta P} \right) \cdot \left(\frac{P}{R} \right) \quad (16)$$

Em que: S_R = Coeficiente de sensibilidade local; δR = É a diferença entre o original com a nova saída do modelo; δP = É a diferença entre o parâmetro original com o parâmetro ajustado; P = Valor original do parâmetro de interesse; R = É a saída do modelo original.

Os dados de precipitação utilizados para a análise de sensibilidade foram obtidos pelo método dos blocos alternados. Com o uso da Equação IDF de Pato Branco/PR (Equação 7) foi possível obter 12 intensidades de precipitações artificiais diferentes com tempos de retorno (TR) de 1, 2, 5, 10, 25 e 50 anos e tempos de duração (t) de 10 e de 30 min. Os dados das precipitações se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Intensidade dos eventos fictícios para a análise de sensibilidade

TR (anos)	t (min)	
	10	30
	IDF	
1	113,5 mm/h	68,44 mm/h
2	125,56 mm/h	75,71 mm/h
5	143,50 mm/h	86,53 mm/h
10	158,75 mm/h	95,72 mm/h
25	181,428 mm/h	109,39 mm/h
50	200,70 mm/h	121,01 mm/h

Fonte: Autoria Própria (2020).

4.8 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo se realizou por busca randômica, sem a utilização de algoritmos de otimização. Os três parâmetros mais sensíveis obtidos através da análise de sensibilidade foram variados em uma faixa de $\pm 40\%$ e foram feitas simulações no SWMM com todas as combinações para os três parâmetros.

A performance do modelo foi avaliada pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o erro médio quadrático (RMSE) e o erro médio absoluto (EMA) (MORIASI et al., 2007; PALLA E GNECCO, 2015; MULETA et al., 2012).

Durante o período de monitoramento foram coletados 12 eventos de precipitação. A Tabela 7 representa as características destes eventos, incluindo o período seco antecedente em dias (ADP). Foram escolhidos dois eventos de

precipitação obtidos em campo para a calibração e dois eventos para a validação e foi analisada a lâmina da água obtida em campo e a no SWMM.

Tabela 7 – Características de precipitação dos eventos coletados durante o período de monitoramento

Fase	Evento	Data do Evento	Total precipitado (mm)	Duração (h)	Intensidade média (mm/h)	ADP (Dias)
Calibração	8	02/03/2021	28,6	0,76	37,6	32
	12	26/03/2021	10	2,36	4,23	1
Validação	9	04/03/2021	23	2,9	7,93	2
	6	23/01/2021	37,6	6,28	5,99	2
Demais Eventos	1	13/01/2021	8,2	2,38	3,41	5
	2	16/01/2021	7,6	6,28	1,11	4
	3	17/01/2021	12,2	3,0	4,06	1
	4	19/01/2021	18,2	12,65	1,44	4
	5	21/01/2021	3,6	5,33	0,5	2
	7	24/02/2021	3,4	7,83	0,23	2
	10	05/03/2021	8,8	3,08	2,85	0
	11	05/03/2021	16,6	6,88	2,41	0

Fonte: Autoria Própria (2021).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRESENTES NOS MÓDULOS EXPERIMENTAIS

Os resultados parciais dos ensaios já realizados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da caracterização dos materiais contidos nos módulos

Parâmetros	Materiais		
	Brita 3	Pedrisco	Pavers
DMC	37,5 mm	12,5 mm	-
Absorção de água (%)	53,6	48,95	8,39
Massa Específica (g/cm ³)	3,37	3,13	-
Massa Unitária (kg/m ³)	1590,95	1597	-
Condutividade Hidráulica (mm/h)	-	-	$2,4 \cdot 10^{-2}$

Fonte: Autoria Própria (2020).

Os resultados obtidos para a brita 3, se encontram dentro da faixa recomendada pela literatura. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2009), para o material ser classificado como Brita 3, a sua dimensão máxima característica (DMC) deve ficar em uma faixa entre 25 mm a 50 mm. A Figura 15 apresenta a curva granulométrica da Brita 3.

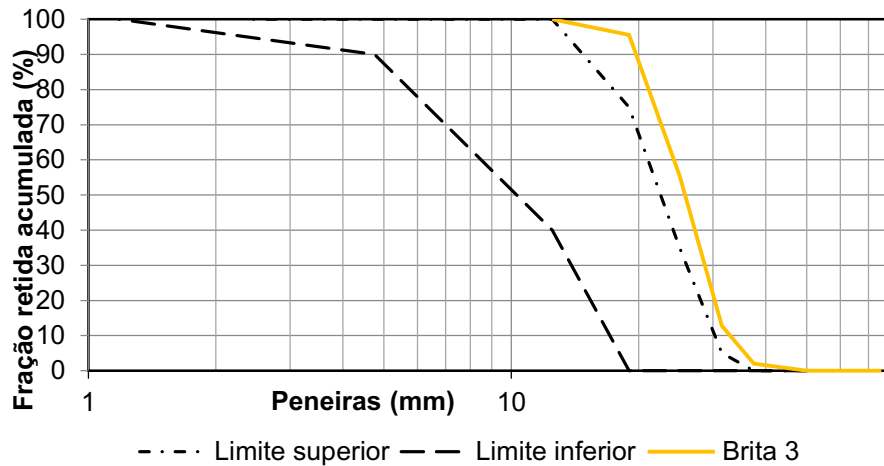


Figura 15 - Distribuição Granulométrica da Brita 3
 Fonte: Autoria Própria

A NBR 16416:2015 recomenda que para a camada de assentamento devem ser utilizados materiais como agregado graúdo, com menos de 2% de material passante na peneira #200 (75mm). O material adotado para esta camada foi o pedrisco. Sua DMC resultou em um valor maior do que o intervalo máximo recomendado pela Norma, que é de 9,5 mm o que favorece a drenagem do pavimento permeável. A Figura 16 apresenta a curva granulométrica do pedrisco.

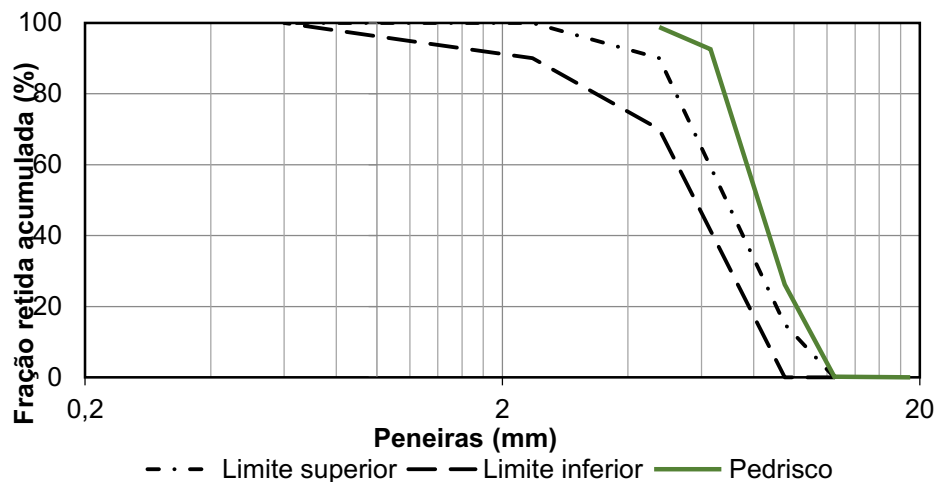


Figura 16 - Distribuição Granulométrica do Pedrisco
 Fonte: Autoria Própria

Outro parâmetro a ser considerado no projeto de pavimentos permeáveis é a permeabilidade (k). De acordo com a norma, o pavimento

permeável recém-construído deve apresentar permeabilidade $\geq 10^{-3}$ m/s (ABNT, 2015). Ele representa a velocidade da água para percolar o solo. O paver poroso utilizado atendeu ao requisito da Norma.

5.2 MÓDULO EXPERIMENTAL

A espessura da camada de armazenamento (base) do pavimento permeável encontrada no dimensionamento mecânico foi de 36 cm. Pelo dimensionamento hidrológico (método da curva envelope) se obteve uma espessura de armazenamento de 16,48 cm e pelo método da NBR 16416:2015 foi encontrada uma espessura de 10,1 cm.

Woods-Ballard et al., (2015) afirmam que a camada de armazenamento de um projeto de pavimentos permeáveis deve possuir uma capacidade hidráulica excedente. Portanto, a espessura encontrada no dimensionamento mecânico foi a adotada, por ter sido superior a espessura hidráulica-hidrológica, obtida tanto pela curva envelope, quanto pela NBR 16.416/2015.

A altura do bloco intertravado do poroso é de 6 cm, conforme o Apêndice H, que apresenta as dimensões do *paver* da camada de revestimento. Segundo Woods-Ballard et al., (2015) a camada de assentamento de pavimentos permeáveis deverá ter 5 cm, esta camada será composta de pedrisco. Somando os valores das 3 camadas (armazenamento, assentamento e revestimento), a espessura total do pavimento adotada foi de 47 cm. A Figura 17 representa as camadas dos módulos experimentais e suas respectivas dimensões.

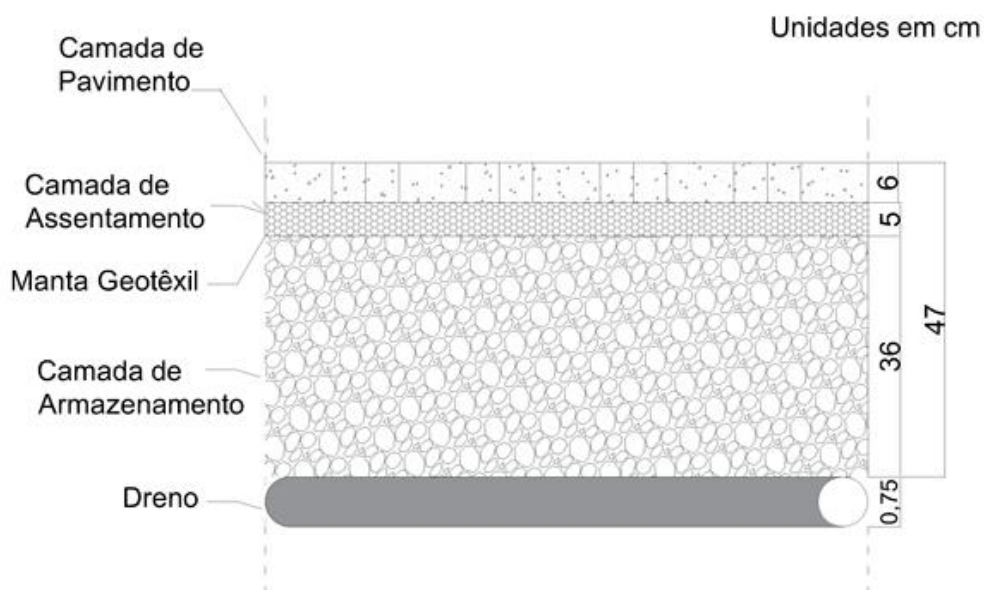


Figura 157 - Camadas dos módulos experimentais e suas respectivas dimensões
 Fonte: Autoria Própria (2020).

5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O coeficiente de sensibilidade representa o quanto aquele parâmetro analisado consegue interferir no modelo. Quanto maior esta métrica, maior é a perturbação do parâmetro na modelagem. A Tabela 9 representa as médias absolutas de coeficiente de sensibilidade para os oito parâmetros analisados, tanto para a lâmina da água, quanto para o tempo necessário para que ocorresse a maior lâmina da água no reservatório de descarga do dreno.

Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade para a lâmina da água foram o *offset* do dreno, o índice de vazios da camada de armazenamento e a porosidade da camada de assentamento, corroborando com Randall et al., (2020) que concluíram que os parâmetros mais sensíveis da modelagem eram os que tinham maior influência sobre a capacidade de retenção do pavimento permeável.

Para o tempo em que ocorreu a maior lâmina da água no reservatório de descarga do dreno os parâmetros mais sensíveis encontrados foram a

porosidade, a condutividade e a capacidade de campo, todos da camada de assentamento.

Tabela 9 – Coeficiente de sensibilidade absoluto dos parâmetros analisados em função da lâmina e do tempo

Camada	Parâmetros	CS médio absoluto	
		Lâmina	Tempo
Assentamento	Porosidade	0,2859	2,0918
	Capacidade de campo	0,0854	0,4518
	Ponto de murcha	0,028	0,0054
	Condutividade	0,1343	0,8284
Armazenamento	Índice de vazios	0,2442	0,03
Dreno	Expoente do dreno	0,0032	0,0185
	Coeficiente do dreno	0,0003	0,0163
	Offset do dreno	0,3554	0,0793

Fonte: Autoria Própria (2021).

Na Tabela 10 é apresentado o ranqueamento dos oito parâmetros analisados para a lâmina da água em função do coeficiente de sensibilidade para cada chuva artificial utilizada para realizar esta análise. A Tabela 9 está em ordem decrescente, onde, o parâmetro que apresentou maior coeficiente de sensibilidade é o primeiro (1º), e o oitavo (8º) parâmetro é o que apresentou o menor coeficiente de sensibilidade. Posteriormente, para realizar a calibração do modelo foram selecionados os três parâmetros mais sensíveis (1º, 2º e 3º) referentes às simulações em que foram observadas o valor da lâmina da água para a chuva com tempo de retorno de 1 ano (Chuva 1 e Chuva 7 da Tabela 9), que apresenta o mesmo tempo de retorno das precipitações medidas em campo.

Para a Chuva 1 e para a Chuva 7 os parâmetros mais sensíveis foram o offset do dreno, a porosidade da camada de assentamento e o índice de vazios da camada de armazenamento. Porém, se alguma das precipitações obtidas em campo resultasse em um tempo de retorno (TR) diferente de 1 ano, seriam outros os parâmetros com maior coeficiente de sensibilidade e a serem utilizados na etapa de calibração do modelo. Na Tabela 9 é possível observar que para a Chuva 10, Chuva 11 e Chuva 12 os três parâmetros mais sensíveis do ranqueamento não são os mesmos do que para as outras chuvas. Quando se trata de análise de sensibilidade, o tempo de retorno (TR) influencia e pode

alterar os parâmetros mais sensíveis de determinada simulação. Qin et al., (2013) analisaram o módulo LID do SWMM para três diferentes sistemas, incluindo o pavimento permeável e também concluíram que as características dos eventos de chuva influenciam no desempenho do modelo.

Tabela 10 – Classificação dos parâmetros para a lâmina da água do reservatório de descarga do dreno em função de diferentes tempos de retorno de precipitações

Chuva	TR (anos)	t (min)	Ranking							
			1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º
Chuva 1	1	10	OD	PO	IV	CC	CO	PM	ED	CD
Chuva 2	2	10	OD	PO	IV	CC	CO	PM	ED	CD
Chuva 3	5	10	OD	PO	IV	CC	CO	PM	ED	CD
Chuva 4	10	10	OD	PO	IV	CC	CO	PM	CD	ED
Chuva 5	25	10	OD	PO	IV	CO	CC	PM	CD	ED
Chuva 6	50	10	OD	PO	IV	CO	CC	PM	ED	CD
Chuva 7	1	30	OD	PO	IV	CC	CO	PM	ED	CD
Chuva 8	2	30	OD	PO	IV	CO	CC	PM	ED	CD
Chuva 9	5	30	OD	PO	IV	CO	PM	CC	ED	CD
Chuva 10	10	30	OD	PO	CO	IV	CC	PM	ED	CD
Chuva 11	25	30	CO	OD	PO	IV	CC	PM	CD	ED
Chuva 12	50	30	CO	OD	IV	PO	CC	PM	CD	ED

Fonte: Aatoria Própria (2021).

Onde: OD = Offset do dreno; PO = Porosidade; IV = Índice de Vazios; CC = Capacidade de Campo; CO = Condutividade; PM = Ponto de Murcha; ED = Expoente do dreno e CD = Coeficiente do dreno.

Na Tabela 11 é apresentado o ranqueamento dos oito parâmetros analisados para o tempo onde ocorreu a maior lâmina da água do reservatório de descarga. Os três parâmetros mais sensíveis foram a porosidade, a condutividade e a capacidade de campo (todos da camada de assentamento). Para o tempo onde ocorreu a maior lâmina da água, o tempo de retorno da chuva não influenciou no ranqueamento dos três parâmetros mais sensíveis (1º, 2º e 3º), eles se mantiveram os mesmos para todas as chuvas artificiais. Contudo, se os outros parâmetros do ranqueamento fossem levados em conta, (do 4º parâmetro em diante, por exemplo) seria necessário analisar individualmente cada chuva com seu devido tempo de retorno para se obter os parâmetros mais sensíveis e posteriormente calibrar o modelo.

Tabela 11 – Classificação dos parâmetros para o tempo onde ocorre a maior lâmina da água do reservatório de descarga do dreno em função de diferentes tempos de retorno de precipitações

Chuva	TR (anos)	t (min)	Ranking							
			1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º
Chuva 1	1	10	PO	CO	CC	IV	ED	CD	OD	PM
Chuva 2	2	10	PO	CO	CC	ED	OD	PM	IV	CD
Chuva 3	5	10	PO	CO	CC	IV	PM	ED	CD	OD
Chuva 4	10	10	PO	CO	CC	IV	OD	ED	PM	CD
Chuva 5	25	10	PO	CO	CC	IV	CD	OD	PM	ED
Chuva 6	50	10	PO	CO	CC	IV	OD	PM	CD	ED
Chuva 7	1	30	PO	CO	CC	IV	OD	PM	ED	CD
Chuva 8	2	30	PO	CO	CC	IV	ED	CD	PM	OD
Chuva 9	5	30	PO	CO	CC	CC	ED	IV	CD	PM
Chuva 10	10	30	PO	CO	CC	IV	ED	CD	OD	PM
Chuva 11	25	30	PO	CO	CC	IV	OD	CD	ED	PM
Chuva 12	50	30	PO	CO	CC	CD	ED	IV	PM	OD

Fonte: Autoria Própria (2021).

O parâmetro *offset* do dreno (Figura 18) foi o parâmetro que mais influenciou na modelagem. Seguido pela porosidade da camada de assentamento (Figura 19) e o índice de vazios da camada de armazenamento (Figura 20). As três figuras (18, 19 e 20) apresentam os gráficos de *boxplot* com a distribuição e valores discrepantes dos coeficientes de sensibilidade obtidos para cada um destes parâmetros mais sensíveis em função do tempo de retorno da precipitação, a fim de mostrar a influência do TR sobre cada parâmetro.

É importante salientar que a precipitação em que os parâmetros analisados apresentaram um maior coeficiente de sensibilidade é a com tempo de retorno de um ano, tanto para o tempo de duração de dez minutos quanto para o de trinta minutos (Chuva 1 e Chuva 7). Quanto maior o tempo de retorno da precipitação menos sensíveis são os parâmetros (OD, IV e PO), isto indica que menos estes parâmetros influenciarão na modelagem.

Durante o período de monitoramento, os eventos de precipitação coletados apresentaram baixa e média intensidade (apenas um evento apresentou alta intensidade), e a capacidade de retenção do pavimento permeável analisado foi muito maior do que a maioria destes eventos de precipitação. Os parâmetros (IV e PO) interferem diretamente na capacidade

de infiltração do pavimento permeável e por isso foram tão sensíveis na modelagem, corroborando com Randall *et al.*, (2020).

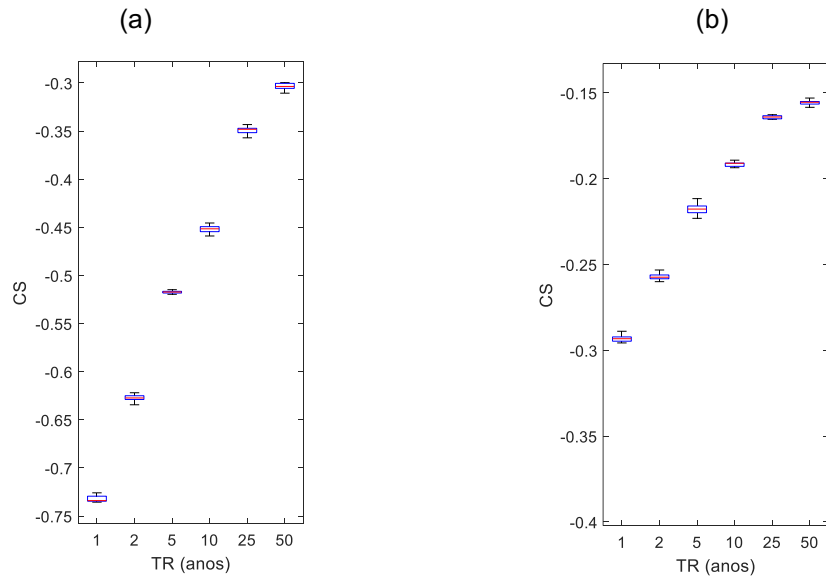


Figura 18 – Coeficiente de sensibilidade para a lâmina da água em razão do tempo de retorno da precipitação para o parâmetro offset do dreno (a) tempo de duração de precipitação de dez minutos; (b) tempo de duração de precipitação de trinta minutos
Fonte: Autoria Própria (2021).

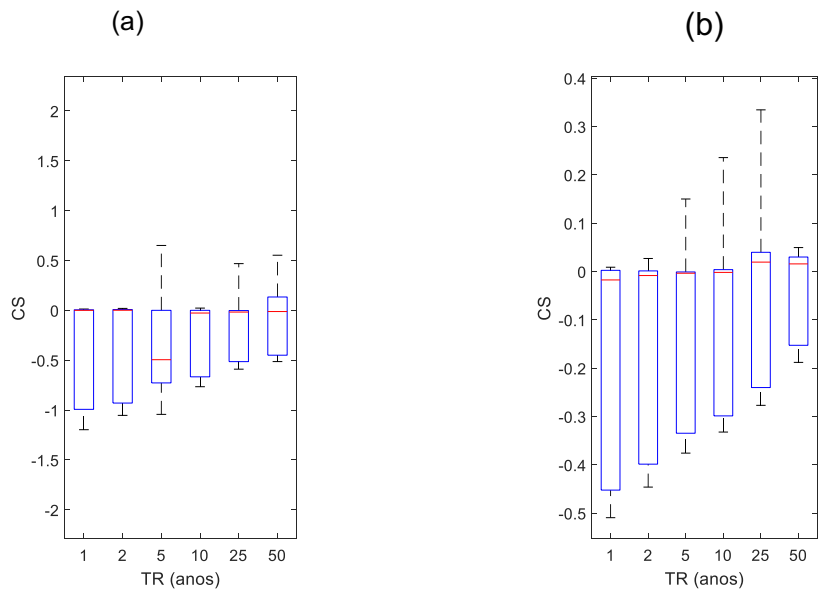


Figura 19 – Coeficiente de sensibilidade para a lâmina da água em razão do tempo de retorno da precipitação para o parâmetro porosidade (a) tempo de duração de precipitação de dez minutos; (b) tempo de duração de precipitação de trinta minutos
Fonte: Autoria Própria (2021).

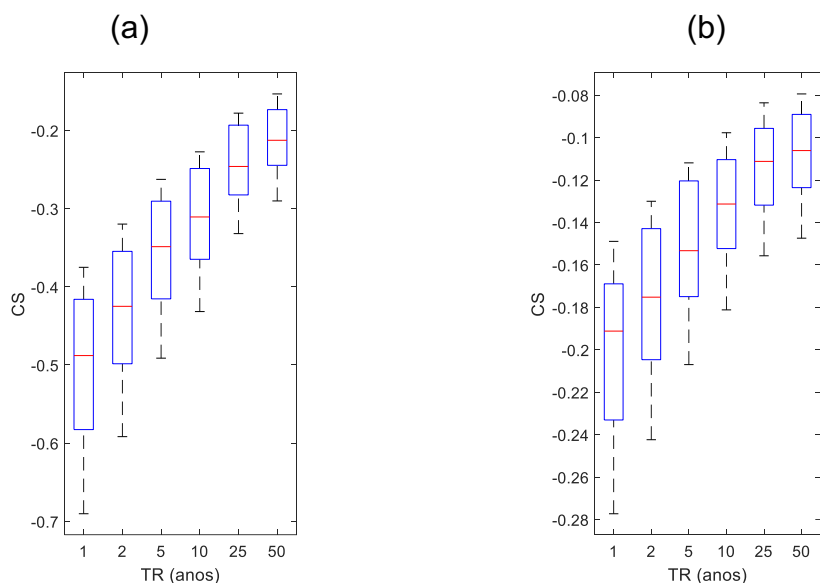


Figura 20 – Coeficiente de sensibilidade para a lâmina da água em razão do tempo de retorno da precipitação para o parâmetro índice de vazios (a) tempo de duração de precipitação de dez minutos; (b) tempo de duração de precipitação de trinta minutos
 Fonte: Autoria Própria (2021).

5.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A Tabela 12 apresenta os parâmetros analisados e seus respectivos intervalos de análise utilizados para a calibração do modelo.

Camada	Parâmetros	Valores originais	Intervalo de análise
Assentamento	Porosidade	0,5	0,3 - 0,7
Armazenamento	Índice de vazios	0,6	0,36 - 0,84
Dreno	Offset do dreno	20	12,0 - 28,0

Fonte: Autoria Própria (2021).

As chuvas utilizadas para a calibração foram o evento 8 e o evento 12. A partir dos valores estimados para a calibração do evento 12, foram validados o evento 6 o evento 9.

Durante o período de monitoramento, que durou de janeiro até maio de 2021 foi obtidos 12 eventos de precipitação. A maioria dos eventos obtidos

possuem baixa ou média intensidade, exceto o Evento 8, que apresentou intensidade alta. Os eventos de precipitação foram classificados de acordo com a intensidade: baixa ($i < 2,5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$); média ($2,5 \leq i < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) e alta ($10 \leq i < 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) (Brown, 2015). Os outros eventos não foram utilizados neste trabalho devido ao baixo volume de precipitação acumulado dos mesmos, em razão de que, o armazenamento final nesta modelagem no SWMM foi de 9,3 mm. Portanto, para precipitações acumuladas menores do que 9,3 mm a vazão a jusante do dreno foi nula. E alguns eventos apresentaram uma duração (em h) superior aos demais, não sendo possível calibrar ou validar estes eventos. O Evento 4, por exemplo, apresentou um total precipitado de 18,2 mm, em 12,6h, sua intensidade média ficou baixa (1,44 mm/h), e o evento não apresentou bons resultados de calibração e de validação.

Outra condição de contorno considerada nesta modelagem foi que a porcentagem inicialmente saturada era zero, ou seja, o pavimento permeável foi considerado totalmente seco para todos os eventos de precipitações. Não foram considerados os dias antecedentes de chuva. Se a umidade fosse monitorada em todas as camadas possivelmente seria obtida uma calibração mais refinada do modelo. É sugerido para trabalhos futuros que o monitoramento continue e que sejam simuladas precipitações com maiores intensidades.

A Figura 21 apresenta tanto a lâmina da água observada em campo e a obtida no SWMM através da calibração, como o hietograma dos dados observados para o evento 8 de precipitação. Este evento, em comparação aos outros, teve a maior intensidade média (37,6 mm/h), e foi o único que apresentou alta intensidade, por esta razão não foi possível validar nenhum outro evento com a calibração deste evento. A Figura 22 e a Figura 23 apresentam uma tentativa de validação do Evento 6 e do Evento 9, respectivamente, utilizando os valores da calibração do Evento 8.

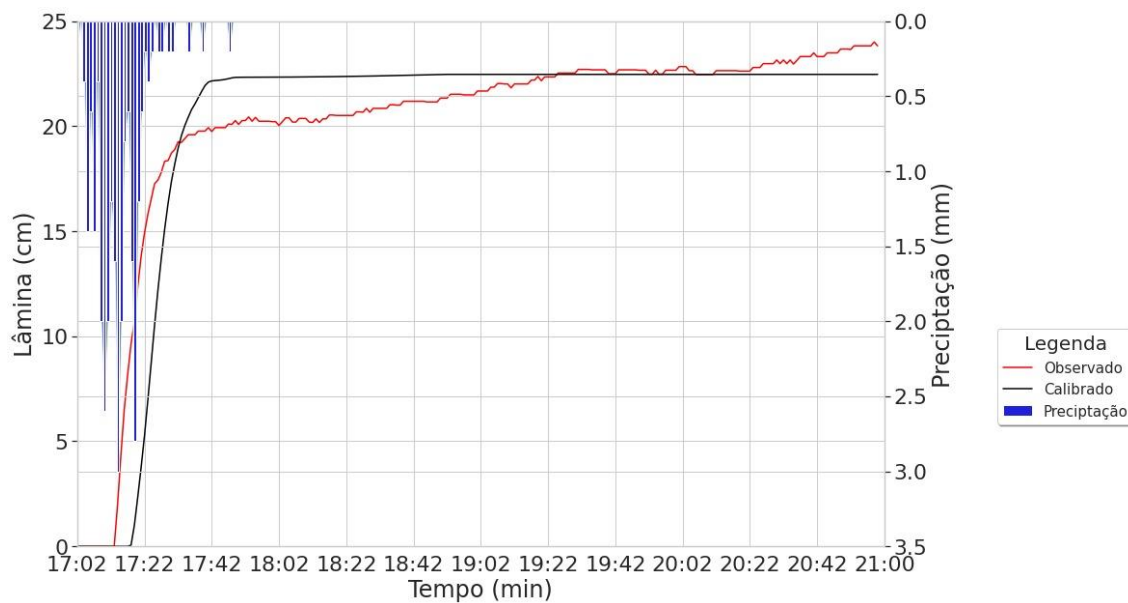


Figura 21 – Hietograma e diagrama observado e calibrado de lâmina da água para o Evento 8
 Fonte: Autoria Própria (2021).

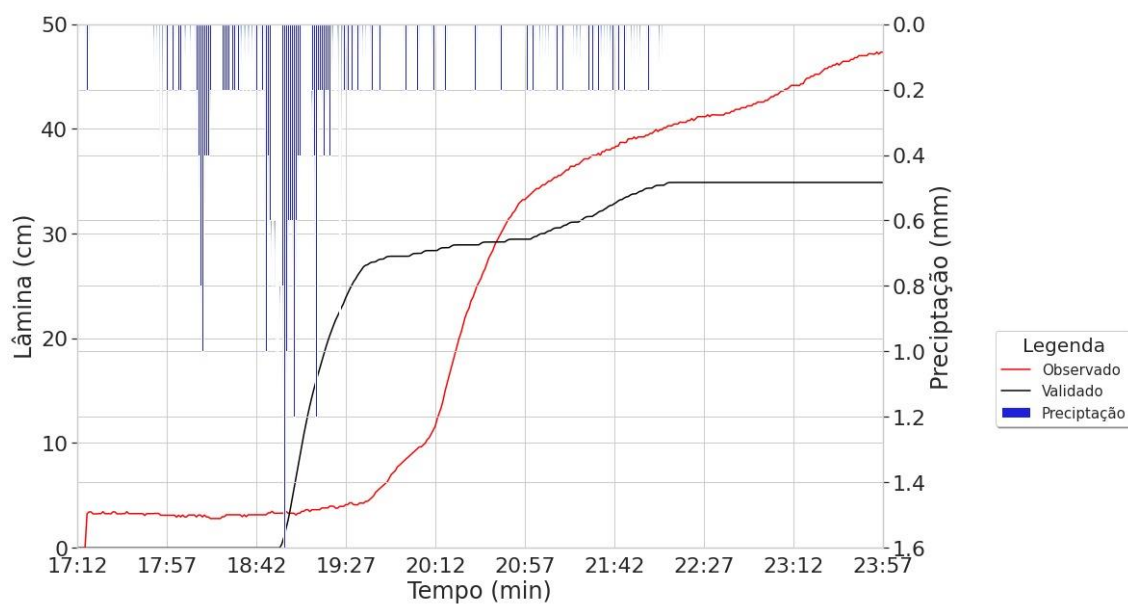


Figura 22 – Hietograma e diagrama observado e validado (tentativa) de lâmina da água para o Evento 6
 Fonte: Autoria Própria (2021).

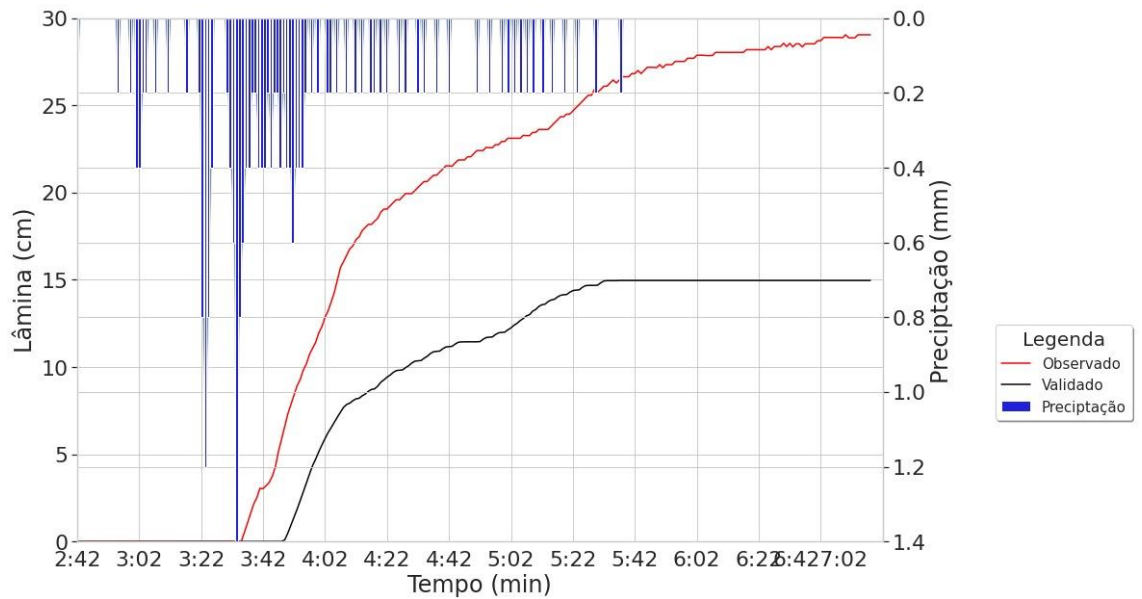


Figura 23 – Hietograma e diagrama observado e validado (tentativa) de lâmina da água para o Evento 9

Fonte: Autoria Própria (2021).

A Figura 24 apresenta tanto a lâmina da água observada em campo e a obtida no SWMM através da calibração, como o hietograma dos dados observados para o evento 12 de precipitação. O volume total precipitado foi de 10 mm.

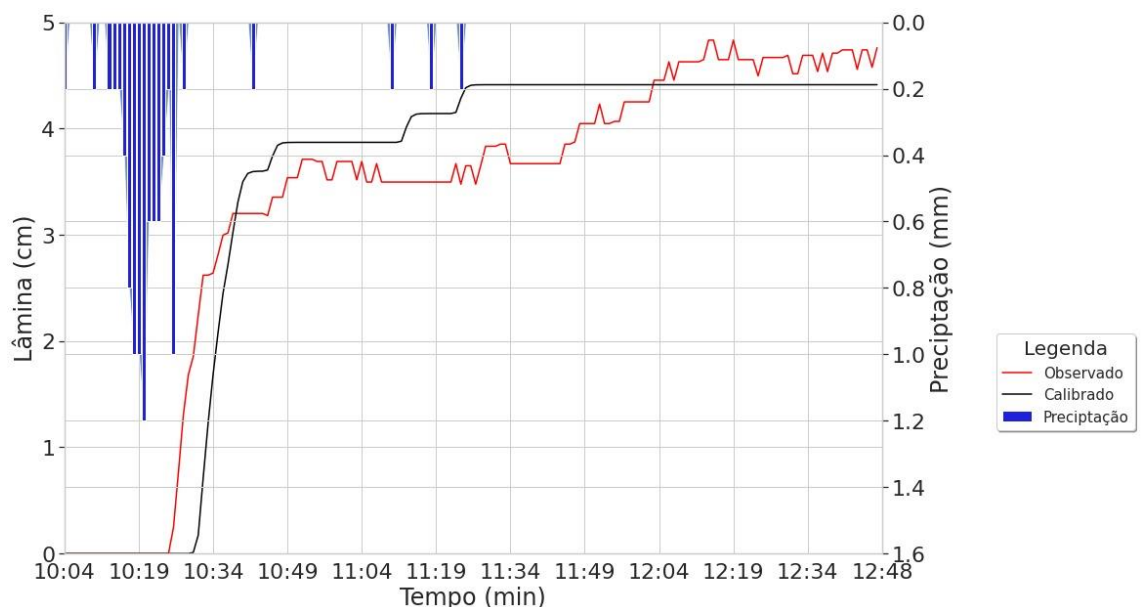


Figura 24– Hietograma e diagrama observado e calibrado de lâmina da água para o Evento 12

Fonte: Autoria Própria (2021).

Para a etapa de calibração, a melhor combinação para o Evento 8 foi para um valor de *offset* do dreno de 28 (+40%), de índice de vazios de 0,6 (Original) e de porosidade de 0,3 (-40%).

O evento 12, em comparação aos outros, teve o valor de Nash e Sutcliffe mais próximo à 1 e os menores valores de erro médio quadrático e de erro médio absoluto, além de se tratar de um evento de baixa intensidade, assim como os demais eventos. A melhor combinação foi para um valor de *offset* do dreno de 18 (-10%), de índice de vazios de 0,42 (-30%) e de porosidade de 0,3 (-40%).

Samouei e Ozger (2020) ao avaliaram a implementação de três diferentes LIDs no SWMM, incluindo o pavimento permeável, a célula de biorretenção e o telhado verde. Ao avaliarem a eficiência da calibração obtiveram um NS de 0,97, o que garante a validade dos resultados do modelo. Outrossim, Platz, Simon e Tryby (2020), encontraram uma média de NS de 0,74 para pavimentos permeáveis utilizando o módulo LID do SWMM e o software PEST para auxiliar na calibração.

A partir dos dados utilizados na calibração do evento 12 foi possível validar o Evento 9 (Figura 25) e o Evento 6 (Figura 26).

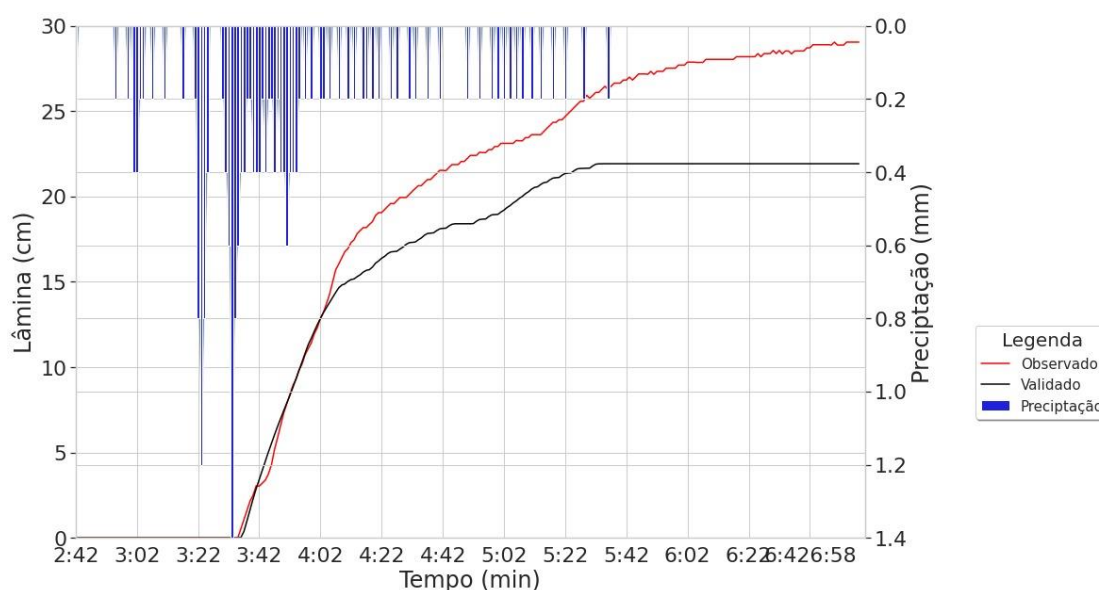


Figura 25 – Hietograma e diagrama observado e validado de lâmina da água para o Evento 9
Fonte: Autoria Própria (2021).

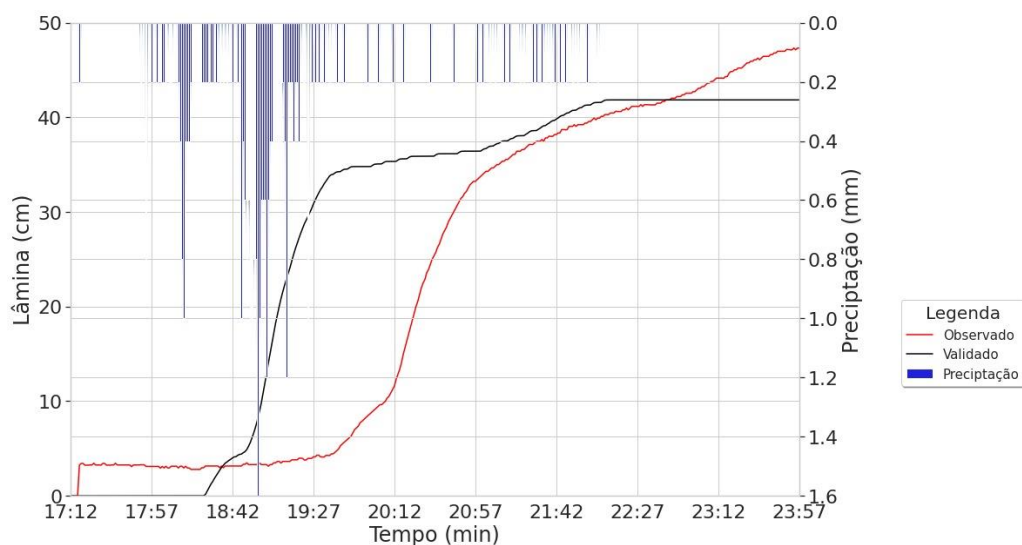


Figura 26 – Hietograma e diagrama observado e validado de lâmina da água para o Evento 6
 Fonte: Autoria Própria (2021).

A Tabela 13 apresenta os critérios de erro usados para avaliar os resultados de calibração e da validação do modelo.

Tabela 13 – Resultados da performance do modelo LID do SWMM para as etapas de calibração e de validação do modelo

Etapa	Evento	NS	MAE	RMSE
Calibração	8	0,8344	0,0130	0,0076
	12	0,8804	0,0037	0,0003
Tentativa de Validação	6	-4,48	0,0884	0,1909
Validação	9	0,2802	0,0840	0,1532
	6	0,7819	0,0722	0,2696
	9	0,8790	0,0315	0,0258

Fonte: Autoria Própria (2021).

Conforme Palla e Gnecco (2015), quando o valor de Nash e Sutcliffe é maior do que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Moriasi et al. (2015) afirmam que a simulação do modelo pode ser usada satisfatoriamente quando $NS > 0,5$ e $RMSE \leq 0,7$.

Na tentativa de validação para o Evento 6 e para o Evento 9 a partir da calibração do Evento 8, o critério de eficiência e erros do modelo não foram satisfatórios, por isso foi necessário tentar a validação a partir dos dados da

calibração do Evento 12, que acabou atendendo aos critérios de desempenho da modelagem.

Para valores mais refinados de validação é recomendado observar as condições de contorno do EPA SWMM, como o valor de armazenamento final, a porcentagem inicialmente saturada do pavimento e os dias antecedentes de chuva.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostra que o módulo LID do SWMM utilizado para a modelagem de um pavimento poroso apresentou bons resultados após a calibração e validação do modelo, sendo uma ferramenta eficaz para a modelagem de cenários hidrológicos.

No SWMM se considerou uma condição inicial seca do pavimento para todos os eventos, se a umidade fosse monitorada em todas as camadas a calibração do modelo poderia ser mais refinada.

Na análise de sensibilidade a maioria dos parâmetros se mostrou insensível ou com pouca sensibilidade, somente os parâmetros que impactaram diretamente na capacidade de retenção do pavimento se mostraram sensíveis. Isto ocorreu porque a capacidade de infiltração do pavimento permeável analisado era muito maior do que os eventos de precipitação coletados durante o período de monitoramento.

Foi possível constatar que o tempo de retorno das precipitações influencia na sensibilidade de alguns parâmetros, principalmente no *offset* do dreno e no índice de vazios da camada de armazenamento. Para as chuvas com menores tempos de retorno os parâmetros mais sensíveis para a modelagem foram o *offset* do dreno, a porosidade da camada de assentamento e o índice de vazios da camada de armazenamento. Já para as chuvas com maiores períodos de retorno os parâmetros mais sensíveis seriam a condutividade hidráulica, o *offset* do dreno e o índice de vazios ou a porosidade da camada de assentamento.

Devido ao curto período de monitoramento todos os eventos tiveram um período de retorno menor do que um ano. Para trabalhos futuros é sugerido mais estudos de monitoramento e modelagem, com um maior período de monitoramento para verificar o desempenho de pavimentos permeáveis e de outros sistemas LID no SWMM ao longo do tempo e com precipitações com diferentes períodos de retorno.

REFERÊNCIAS

ABERA, L.; SURBECK, C.; O'REILLY, A. Simulated Performance of In-Place Pervious Concrete under Varying Storms, Surface Areas, and Infiltration Rates. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12118 – *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16416 – *Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro: 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457 – *Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9781 – *Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9895 – *Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248 – *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 26 – *Agregados - Amostragem*. Rio de Janeiro 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 27 – *Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório*. Rio de Janeiro 2000.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45 – *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53 – *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro 2009.

AHAMMED, F. A review of water-sensitive urban design technologies and practices for sustainable stormwater management. *Sustainable Water Resources Management*, v. 3, n. 3, p. 269 – 282, 2017.

ALAM, T.; MAHMOUD, A.; JONES, K.D.; BEZARES-CRUZ, J.C.; GUERRERO, J. WinSLAMM Simulation of Hydrologic Performance of Permeable Pavements — A Case Study in the Semi-Arid Lower Rio Grande Valley of South Texas, United States. *Water*, v.11, 2019.

ALAOUI, A.; ROGGER, M.; PETH, S.; BLÖSCHL, G. Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, v. 557, 2018.

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.

ARYAL, R.; BEECHAM, S.; KAMRUZZAMAN, M.; CONNER, S.; LEE, B. Temporal change of PM10 and its mass fraction during a dust storm in September 2009 in Australia. *Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 8, n. 5, p. 483 – 494, 2014.

ASCE, Permeable pavements recommended design guidelines. Reston, VA: *American Society of Civil Engineers*, 2013.

ASCE/EPA. Urban Stormwater BMP Performance Monitoring: Guidance Manual, p. 214, 2002.

ASHLEY, R.; WALKER, L.; D'ARCY, B.; WILSON, S.; ILLMAN, S.; SHAFFER, P.; WOODS-BALLARD, B.; CHATFIELD, P. UK sustainable drainage systems: past, present and future. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, v. 168, p. 125 – 130, 2015.

BAI, Y.R.; LI, Y.H.; ZHANG, R.Y.; ZHAO, N.; ZENG, X.F. Comprehensive Performance Evaluation System Based on Environmental and Economic Benefits for Optimal Allocation of LID Facilities. *WATER*, v.11, n.341, p. 187 – 190, 2019.

BATANI, N.; LAI, S. H.; PUTUHENA, F. J.; MAH, D. Y. S.; MANNAN, M. A.; CHIN, R. J. Hydrological impact assessment on permeable road pavement with subsurface precast micro-detention pond. *Water And Environment Journal*, p. 102 – 112, 2020.

BOOGAARD, F.; LUCKE, T.; BEECHAM, S. Effect of Age of Permeable Pavements on Their Infiltration Function. *CLEAN - Soil, Air, Water*, v. 42, p. 146 – 152, 2014.

BROEKHUIZEN, L.; LEONHARDT, G.; MARSALEK, J.; VIKLANDER, M. Event selection and two-stage approach for calibrating models of green urban drainage systems. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 2, 2020, 2020.

BROWN, R. A.; BORST, M.; Quantifying evaporation in a permeable pavement system. *Hydrological Processes*, v. 29, p. 2100 – 2111, 2015.

BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; TURCO, M.; PIRO, P. "Title On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of Low Impact Development techniques Permalink." *JOURNAL OF HYDROLOGY*, v. 548, p. 263 – 277, 2016.

BUTLER, D.; PARKINSON, J. Towards sustainable urban drainage. *Water Science And Technology*, v. 35, n. 9, p. 53 – 63, 1997.

CAMPORESE, M.; DEAN, J.; DRESEL, P.; WEBB, J.; DALY, E. Hydrological modelling of paired catchments with competing land uses. *Proceedings 20th Int. Congress on Modelling*, p.1819 – 1825, 2013.

CASTRO, A. S. *Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento superficial urbano*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CHEN, X.; TIAN, C.; MENG, X.; XU, Q.; CUI, G.; ZHANG, Q.; XIANG, L. Analyzing the effect of urbanization on flood characteristics at catchment levels. *Proceedings of the International Association.*, v. 370, p. 33 – 38, 2015.

CHEN, X.; LI, F.; LI, X.; HU, Y.; HU, P. Evaluating and mapping water supply and demand for sustainable urban ecosystem management in Shenzhen, China. *Journal Of Cleaner Production*, v. 251, p. 119 – 132, 2020.

CHUI, T. F. M.; LIU, X.; ZHAN, W. Assessing costeffectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events. *Journal of Hydrology*, v. 533, p. 353 – 364, 2016.

CORTIER, O.; BOUTOUIL, M.; MAQUAIRE, O. Physical Model of Hydrological Behavior of Permeable Pavements Using FlexPDE. *Journal Of Hydrologic Engineering*, v. 24, n. 10, p. 401 – 435, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *DNIT – IPR 719. Manual de Pavimentação. 3ª Edição*. Rio de Janeiro, 2006.

DRAKE, J. A. P.; BRADFORD, A.; MARSALEK, J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge. *Water Quality Research Journal of Canada*, v. 48, n. 3, p. 203 – 222, 2013.

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

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S. Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: estudo de caso. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 2, p. 601 – 614, 2016.

ESSER, V.; BUCHTY-LEMKE, M.; SCHULTE, P.; PODZUN, L. S.; LEHMKUHL, F. Signatures of recent pollution profiles in comparable central European rivers – Examples from the international River Basin District Meuse. *CATENA*, v. 193, n. 104646, 2020.

FASSMAN, E.; BLACKBOURNE, S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 15, n. 6, p. 475 – 485, 2010.

FLETCHER, T. D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, p. 1 – 18, 2014.

FLETCHER, T.D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art. *Advances In Water Resources*, v. 51, p. 261 – 279, 2013.

FUCHS, S.; BROMBACH, H.; WEISS, G. New database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer systems. *Water Science Technology*, v. 51, n. 2, p. 119 – 128, 2005.

GAO, J.; WANG, R. S.; HUANG, J. L.; LIU, M. Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area. *Ecological Modelling*, v. 318, p. 177 – 183, 2015.

GIMENEZ-MARANGES, M.; BREUSTE, J.; HOF, A. Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: a review. *Journal Of Cleaner Production*, v. 255, p. 120 – 152, 2020.

GIVAN. Building natural value for sustainable economic development: the *Green Infrastructure Valuation Toolkit user guide*, 2010.

GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M. Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall watershed-bioretenion system. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 22, n. 1, 2017.

GULBAZ, S.; YILDIRIM, A.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C.M. A Water Quality-Quantity Model for Avcilar Campus of Istanbul University Incorporating LID Implementation. *NEW TRENDS IN URBAN DRAINAGE MODELLING*, p. 688 – 692, 2018.

HOU, J. Experimental study for effects of terrain features and rainfall intensity on infiltration rate of modelled permeable pavement. *Journal of Environmental Management*, v. 243, p. 177 – 186, 2019.

HU, M.; SAYAMA, T.; ZHANG, X.; TANAKA, K.; TAKARA, K.; YANG, H. Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China. *Journal of Environmental Management*, v. 193, p. 430 – 438, 2017.

HUNG, C. L. J.; JAMES, L. A.; CARBONE, G. J.; WILLIAMS, J. M. Impacts of combined land-use and climate change on streamflow in two nested

catchments in the Southeastern United States. *Ecological Engineering*, v. 143, n. 105665, 2020.

IBGE. *INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA*. Pas - Pesquisa Anual de Serviços, 2019.

ILLGEN, M. K.; HARTING, T. G.; SCHMITT, A.; WELKER, A. "Runoff and Infiltration characteristics of permeable pavements: Review of an intensive monitoring program." *Proceedings Novatech*. Lyon, France: GRAIE, 2007.

IMRAN, H.M.; AKIB, S.; KARIM, M.R. "Permeable Pavement and Stormwater Management Systems: A Review." *Environmental Technology*, v. 34, n.18, p. 2649 – 2656, 2013.

JATO-ESPINO, D.; SILLANPÄÄ, N.; CHARLESWORTH, S.M.; ANDRÉS-DOMÉNECH, I. Coupling GIS with stormwater modelling for the location prioritization and hydrological simulation of permeable pavements in urban catchments. *Water*, 2016.

JAYASWAL, K.; SAHU, V.; GURJAR, B. R. Water Pollution, Human Health and Remediation. *Energy, Environment, And Sustainability*, p. 11 – 27, 2017.

JAYASOORIYA, V. M.; NG, A. W. M. Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. *Water Air & Soil Pollution*, v. 225, n. 8, p. 2040 – 2055, 2014.

KHALEGHI, E.; SADODDIN, A.; NAJAFINEJAD, A.; BAHREMAND, A. Flood hydrograph simulation using the SWMM model: A semiarid zone watershed case study, Shiraz Khoshk River, Iran. *Natural Resource Modeling*, v. 33, 2020.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. High-strength clogging resistant permeable pavement. *International Journal Of Pavement Engineering*, p. 1 – 12, 2019.

KUMAR, K.; DHORDE, A. Impact of Land use Land cover change on Storm Runof Generation: A case study of suburban catchments of Pune, Maharashtra, India. *ENVIRONMENT DEVELOPMENT AND SUSTAINABILITY*, 2020.

LEIMGRUBER, J.; KREBS, G.; CAMHY, G.; MUSCHALLA, D. Sensitivity of Model-Based Water Balance to Low Impact Development Parameters. *Water*, v. 10, n. 12, 2018.

LIANG, K.; JIANG, Y.; QI, J.; FULLER, K.; NYIRANEZA, J.; MENG, F. R. Characterizing the impacts of land use on nitrate load and water yield in an agricultural watershed in Atlantic Canada. *Science of The Total Environment*, v. 729, n. 138793, 2020.

LIU, X.; ZOU, B.; FENG, H.; LIU, N.; ZHANG, H. Anthropogenic factors of PM2.5 distributions in China's major urban agglomerations: a spatial-temporal analysis. *Journal Of Cleaner Production*, v. 264, p. 121 – 134, 2020.

LUCKE, T.; BEECHAM, S. Field Investigation of Clogging in a Permeable Pavement System. *Building Research & Information*, v. 39. p. 603 – 615, 2011.

MAHMOUD, A.; ALAM, T.; SANCHEZ, A.; GUERRERO, J.; ORABY, T.; IBRAHIM, E.; JONES, K. Stormwater Runoff Quality and Quantity from Permeable and Traditional Pavements in Semiarid South Texas. *Journal of Environmental Engineering*, v. 146, 2020.

MANCIPE-MUNOZ, N. A.; BUCHBERGER, S. G.; SUIDAN, M. T.; LU, T. Calibração do Modelo de Chuva-Escoamento em Bacias Hidrográficas Urbanas para Avaliação de Gerenciamento de Águas Pluviais, *Journal Water Research*, 2014.

MARQUES, A. S. *Sistemas de drenagem de águas pluviais*. ERSAR, Lisboa, Portugal, 2013.

MCCUEN, R.H.; SNYDER, W. M. Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications. *Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall*, 1983.

MGUNI, P.; HERSLUND, L.; JENSEN, M.B. Green infrastructure for flood-risk management in Dar es Salaam and Copenhagen: exploring the potential for transitions towards sustainable urban water management. *Water Policy*, v. 17, p. 126 – 142, 2015.

MILLER, J. D.; KIM, H.; KJELDSEN, T. R.; PACKMAN, J.; GREBBY, S.; DEARDEN, R. 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.

MME [Ministério de Minas e Energia] Produto 22 – Agregados para a construção civil – 2010 a 2030, 2009. Disponível em:<http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/0b657545-498a-46ee-b836974026d435a?version=1.0>. Acesso em mai/2020.

MORIASI, D.N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. “Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria.” *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 58, p.1763 – 1785, 2015.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.” *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007.

MOUTINHO, V.; MADALENO, M.; MACEDO, P. The effect of urban air pollutants in Germany: eco-efficiency analysis through fractional regression models applied after DEA and SFA efficiency predictions. *Sustainable Cities and Society*, v. 59, n. 102204, 2020.

MULETA, M. K.; MCMILLAN J.; AMENU G.G.; BURIAN S.J. Bayesian approach for uncertainty analysis of an urban storm water model and its application to a heavily urbanized watershed, *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 18, n. 10, p. 1360 – 1371, 2012.

NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J. M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 33, n. 3, p. 839 – 849, 1990.

O'DONNELL, E.; MASKREY, S.; EVERETT, G.; LAMOND, J. Developing the implicit association test to uncover hidden preferences for sustainable drainage systems. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 378, n. 2168, p. 190 – 207, 2020.

OPHIYANDRI, T. Identification of drainage systems capacity using epa-swmm 5.1 version modeling in gunung pangilun of padang city. *International Journal Of Geomate*, v. 18, n. 70, p. 16 – 22, 2020.

PAIVA, A. C. da E.; NASCIMENTO, N.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; CARRIELLO, F.; REZENDE, F. S. Urban expansion and its impact on water security: the case of the paraíba do sul river basin, São Paulo, Brazil. *Science Of The Total Environment*, v. 720, p. 137 – 149, 2020.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 361 – 368, 2015.

PALMSTROM, N.; WALKER, W. The P8 urban catchment model for evaluating nonpoint source controls at the local level. Enhancing States' Lake Management Programs, *US EPA*, 1990.

PANOS, C.L.; WOLFAND, J. M.; HOGUE, T.S. "SWMM Sensitivity to LID Siting and Routing Parameters: Implications for Stormwater Regulatory Compliance." *Journal of the American Water Resources Association*, p. 1 – 20, 2020.

PLATZ, M.; SIMON, M.; TRYBY, M. Testing of the Storm Water Management Model Low Impact Development Modules. *Jawra Journal Of The American Water Resources Association*, v. 56, n. 2, p. 283 – 296, 2020.

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

RAHMAN, M. D. A.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, p. 183 – 194, 2015.

RANDALL, M.; STØVRING, J.; HENRICH, M.; JENSEN, M. B. Comparison of SWMM evaporation and discharge to in-field observations from lined permeable pavements. *Urban Water Journal*, p. 1 – 12, 2020.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; MILLER, N. “Green-Ampt infiltration parameters from soils data.” *Journal of Hydraulics Engineering*, v. 1, n. 62, p. 62 – 70, 1983.

RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I.; HUERTAS-FERNÁNDEZ, F.; MORENO, B.; MARTÍNEZ, G.; GRINDLAY, A.I. 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. : A case study in the south of Spain. *Journal Of Environmental Management*, v. 205, p. 151 – 162, 2018.

ROSSMAN, L. A: *EPA SWMM 5.0 – Modelo de gestão de drenagem urbana*, 2010.

SAADEH, S.; RALLA, A.; AL-ZUBI, Y.; WU, R.; HARVEY, J. Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2019.

SAMOUEI, S.; OZGER, M. Evaluating the performance of low impact development practices in urban runoff mitigation through distributed and combined implementation. *Journal of Hydroinformatics*, 2020.

SANCHEZ, G. M.; TERANDO, A.; SMITH, J. W.; GARCÍA, A. M.; WAGNER, C. R.; MEENTEMEYER, R. K. Forecasting water demand across a rapidly urbanizing region. *Science of The Total Environment*, v. 730, n.139050, p. 115 – 128, 2020.

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

SCHÜTZE, M.; WILLEMS, P.; VAES, G. Simulações Integradas de Sistemas de Águas Residuais Urbanas - Quantos Dados de Chuva Precisamos?, em: Soluções Globais para Drenagem Urbana, *Sociedade Americana de Engenheiros Civis*, Lloyd Center Doubletree Hotel, Portland, Oregon, Estados Unidos, p. 1 – 11, 2002.

SHUSTER, W. D.; BONTA, J.; THURSTON, H.; WARNEMUENDE, E.; SMITH, D. R.. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: a review. *Urban Water Journal*, v. 2, n. 4, p. 263 – 275, 2005.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 12:258-265, 2008.

SILVEIRA, G. L. *Cobrança pela Drenagem Urbana de Águas Pluviais: incentivo à sustentabilidade*. Relatório de Pós-Doutorado, 2003.

SILVEIRA, M. L. L.; GOLDENFUM, J.A. Metodologia generalizada para prédimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 12, n. 2, p. 157 – 168, 2007.

SIMPSON, M. G.; ROESNER, L.A. Hydrologic Modeling and Capital Cost Analysis of Low-Impact Development. *JOURNAL OF SUSTAINABLE WATER IN THE BUILT ENVIRONMENT*. v. 4, n. 05018003, 2018.

SMITH, D. R. *Permeable Interlocking Concrete Pavements: selection · design · construction · maintenance*. 3. ed. Washington Dc: Icp, p. 62, 2006.

SOBRINHA, L. A. Monitoramento e modelagem de um poço de infiltração de águas pluviais em escala real e com filtro na tampa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 147f, 2012.

SOUZA, M. L. de. Método de projeto de pavimentos flexíveis. 3.ed. rev. Atual. Rio de Janeiro: IPR. DITC, 1981.

SU, W.; DUAN, H. Catchment-based imperviousness metrics impacts on floods in Niushou River basin, Nanjing City, East China. *Chinese Geographical Science*, v. 27, n. 2, p. 229 – 238, 2017.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. Impact of urbanization on flood: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of hydrology*, v. 412, p. 210 – 219, 2012.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Caracterização dos solos da bacia do Rio Ligeiro (PR) na estabilidade de taludes. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, n.1, p. 11 – 26, 2012.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Estudo do clima do município de Pato Branco, Paraná. *Synergismus scyentifica*, 2008.

TECEDOR, N. *Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração de construído em escala real*. 2014. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

TODESCHINI, S. Hydrologic and Environmental Impacts of Imperviousness in an Industrial Catchment of Northern Italy. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 21, n.7, p. 501 – 514, 2016.

TUCCI, C. E. M. *Estudos Avançados* 22, 2008.

TURCO, M.; KODEŠOVÁ, R.; BRUNETTI, G.; NIKODEM, A.; FÉR, M.; PIRO, P. 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.

TZIAMPOU, N.; COUPE, S. J.; SAÑUDO-FONTANEDA, L. A.; NEWMAN, A. P.; CASTRO-FRESNO, D. Fluid transport within permeable pavement systems: a review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. : A review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. *Construction And Building Materials*, v. 243, p. 118 – 179, 2020.

UACDC. *Low Impact Development a design manual for urban areas*, 2010.

VAN DER BRUGGE, R.; DE GRAAF, R. Linking water policy innovation and urban renewal: The case of Rotterdam, the Netherlands. *Water Policy*, v. 12, p. 381 – 400, 2010.

VAILLANCOURT, C.; DUCHESNE, S.; PELLETIER, G. Hydrologic Performance of Permeable Pavement as an Adaptive Measure in Urban Areas: case studies near montreal, canada. *Journal Of Hydrologic Engineering*, v. 24, n. 8, p. 101 – 112, 2019.

WANG, H. W.; MAO, Y. F.; GAO, Y.; FAN, J. H.; ZHANG, S. F.; MA, L. M. Analysis of bioretention cell design elements based on Fourier amplitude sensitivity test (FAST). *Advanced Materials Research*, v. 779, p. 1369 – 1375, 2013.

WANG, Z.; SHAO, G.; LU, J.; ZHANG, K.; GAO, Y.; DING, J. Effects of controlled drainage on crop yield, drainage water quantity and quality: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, v. 239, n. 106253, 2020.

WINSTON, R. J.; AREND, K.; DORSEY, J. D.; JOHNSON, J. P.; HUNT, W. F. Hydrologic Performance of a Permeable Pavement and Stormwater Harvesting Treatment Train Stormwater Control Measure. *Journal Of Sustainable Water In The Built Environment*, v. 6, n. 1, p. 401 – 409, 2020.

WOLFAND, J. M.; BELL, C. D.; BOEHM, A.B.; HOGUE, T.S.; LUTHY, R.G. Multiple Pathways to Bacterial Load Reduction by Stormwater Best Management Practices: Trade-Offs in Performance, Volume, and Treated Area. *Environmental Science and Technology*, v. 52, n. 11, p. 6370 – 6379, 2018.

WOODS-BALLARD, B. et al. *The SUDS Manual*. 1.ed. Londres: CIRIA, v. 44, 2007.

WOODS-BALLARD, B. et al. *The SUDS Manual*. Londres: CIRIA, 2015.

XIE, J.; WU, C.; LI, H.; CHEN, G. Study on Storm-Water Management of Grassed Swales and Permeable Pavement Based on SWMM. *Water*, v. 9, n. 11, p. 840 – 852, 2017.

YAN, M.; CHAN, J. C. L.; ZHAO, K. Impacts of Urbanization on the Precipitation Characteristics in Guangdong Province, China. *Advances In Atmospheric Sciences*, v. 37, n. 7, p. 696 – 706, 2020.

YANG, Y.; CHUI, T .F. M. Optimal design of green and grey stormwater infrastructure for small urban catchment based on life-cycle cost-effectiveness analysis. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2016.

YIN, J.; GENTINE, P.; ZHOU, S.; SULLIVAN, S. C.; WANG, R.; ZHANG, Y.; GUO, S. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 1034 – 1050, 2018.

YONG, C. F.; DELETIC, A.; FLETCHER, T. D; GRACE, M. R. The drying and wetting effects on clogging and pollutant removal through porous pavements, in *Proceedings of the 7th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, NOVATECH*, 2010.

YU, H.; ZHAO, Y.; FU, Y.; LI, L. Spatiotemporal Variance Assessment of Urban Rainstorm Waterlogging Affected by Impervious Surface Expansion: A Case Study of Guangzhou, China. *Sustainability*, v. 10, n. 10, 2018.

YU, Z.; AGUAYO, M.; PIASECKI, M.; MONTALTO, F. Developments in LIDRA 2.0: a planning level assessment of the cost-effectiveness of low impact development. *Proceedings of the ASCE Environment and Water Resources Institute Conference*, Providence, Rhode Island, 2010.

ZHANG, S.; GUO, Y. SWMM Simulation of the Storm Water Volume Control Performance of Permeable Pavement Systems. *Journal Of Hydrologic Engineering*, v. 20, n. 8, p. 101 – 106, 2015.

ZHANG, P.; CHEN, L.; HOU, X.; WEI, G.; ZHANG, X.; SHEN, Z. Detailed Quantification of the Reduction Effect of Roof Runoff by Low Impact Development Practices. *Water*, v. 12, n. 795, 2020.

ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, v. 16, p. 195 – 23, 2001.

APÊNDICE A – CBR – LEITURA EXTÊNSOMETRO 4

Tabela A-1 – Leitura do extênsometro

Corpo de prova 4				
Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (mm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,5	0,63	0,006	10,504945	1,367
1	1,27	0,011	2,0054895	0,261
1,5	1,9	0,016	2,9604845	0,385
2	2,54	0,020	3,7244805	0,485
2,5	3,17	0,025	4,774975	0,621
3	3,81	0,026	4,965974	0,646
3,5	4,44	0,028	5,2524725	0,683
4	5,08	0,030	5,72997	0,746
5	6,35	0,038	7,1624625	0,932
6	7,62	0,039	7,3534615	0,957
7	8,89	0,041	7,7354595	1,006
8	10,16	0,042	8,021958	1,044
9	11,43	0,044	8,3084565	1,081
10	12,7	0,046	8,785954	1,143

Penetração	Pressão			
	Calculada	Corrigida	Padrão	ISC(%)
2,54	0,485	0	6,9	7,02
5,08	0,746	0	10,5	7,10

Fonte: Autoria Própria (2020).

APÊNDICE B – BRITA 3 - AMOSTRAS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Tabela B-1 – Ensaio de granulometria

Brita: aprox. 37,5 mm _ 1ª Amostra						
Peneira (mm)	M1		M2		Médias	
	Massa retida (g)	% Retida	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida	% Retida acumulada
75	0	0	0		0	0
63	0	0	0		0	0
50	0	0	0		0	0
37,5	153,3	2,052	140,1	2,01	2,03	2,03
31,5	993,2	13,30	563,9	8,08	10,69	12,72
25	3229,3	43,23	2944,5	42,18	42,71	55,42
19	2787,6	37,32	2993,2	42,88	40,10	95,52
12,5	306	4,10	339,4	4,86	4,48	100,00
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0	0	0	0	0
2,36	0	0	0	0	0	0
1,18	0	0	0	0	0	0
0,6	0	0	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0	0	0
0,15	0	0	0	0	0	0
Somatório da massa	7469,40		6981,10			
Massa inicial (g)	7,5		6,98			
MF - Módulo de Finura						0,98
DMC - Dimensão máxima característica						37,5

Fonte: Autoria Própria (2020).

APÊNDICE C – BRITA 3 - AMOSTRAS DO ENSAIO DE POROSIDADE

Tabela C-1 – Ensaio de porosidade

Massa do recipiente (kg)	Massa da placa de calibração (kg)	Massa do conjunto (recipiente e cheios + placa de calibração) (kg)	Massa da água necessária para encher o recipiente (kg)	Temperatura da água no recipiente (°C)	Massa Específica da água(kg/m ³)	Volume do recipiente (m ³)	Volume do recipiente (l ³)
0,45	-	-	13,4	19,8	998,54	0,0134	13,42
Método A - agregado < 37,5 mm							
Amostras	Recipiente vazio (kg)	Recipiente + agregado compactado (kg)	Agregado Compactado (kg)		Massa Unitária (kg/m ³)		
Amostra 1	0,45	22,00	21,55		1605,86		
Amostra 2	0,45	21,65	21,2		1579,78		
Amostra 3	0,45	21,75	21,3		1587,23		
					1590,95		
Método C - Material no estado solto							
	Recipiente vazio (kg)	Recipiente + agregado (kg)	Agregado(kg)		Massa Unitária (kg/m ³)		
Amostra 1	0,45	20,8	20,35		1516,44		
Índice de Vazios			0,529		52,90%		

Fonte: Autoria Própria (2020).

**APÊNDICE D – BRITA 3 - AMOSTRAS DO ENSAIO DE MASSA
ESPECÍFICA**

Tabela D-1 – Ensaio de massa específica

Parâmetros de ensaio	Determinação		
	3	2	1
Amostra (g)	50895,00	5555,00	5555,00
Agregado saturado com superfície seca ms (g)	50105,00	5590,5	5590,5
Massa em água ma (g)	4408,35	3944,16	4712,61
Agregado seco m (g)	50160,9	5562	5562
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	1,09	3,43	6,54
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	1,09	3,39	6,36
Massa específica aparente (cm ³)	1,09	3,37	6,33

Fonte: Autoria Própria (2020).

**APÊNDICE E – PEDRISCO - AMOSTRAS DO ENSAIO DE
GRANULOMETRIA**

Tabela E-1 – Ensaio de granulometria

Pedrisco - Amostra 1						
Peneira (mm)	M1		M2		Médias	
	Massa retida (g)	Retenção (%)	Massa Retida (g)	Retenção (%)	Retenção (%)	Retenção acumulada (%)
75	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
37,5	0	0	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
12,5	4,01	0,4	0	0	0,198	0,198
9,5	262,93	25,91	263,91	26,13	26,018	26,216
6,3	686,28	67,63	656,28	64,97	66,3	92,516
4,75	53,46	5,27	73,67	7,29	6,281	98,797
Fundo	8,06	0,79	16,29	1,61	1,203	100
Somatório da massa	1014,74	99,6	1010,15	100		
Massa inicial (g)	550		500			
	Módulo de Finura (MF)					2,169
	Dimensão máxima característica (DMC)					12,5

Fonte: Autoria Própria (2020).

**APÊNDICE F – PEDRISCO - AMOSTRAS DO ENSAIO DE MASSA
UNITÁRIA E MASSA ESPECÍFICA**

Tabela F-1 – Ensaio de massa unitária e massa específica

Parâmetros de ensaio	Determinação		
	3	2	1
	Amostra (g)	2000	2000
Saturada (g)-ms	2022,5	2015,5	2016
Massa em água ma (g)	1341,09	1330,14	1338,26
Massa seca msec (g)	1970	1954,5	1964,5
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	3,13	3,13	3,13
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	2,96	2,94	2,97
Massa específica aparente (cm ³)	2,89	2,85	2,89

Fonte: Autoria Própria (2020).

APÊNDICE G – PAVERS – AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Tabela G-1 – Avaliação dimensional dos pavers

Bloco intertravado	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Aprovado (A)/ Rejeitado (R)
Bloco poroso				
1	57	98	200	(A)
2	59	99	198	(A)
3	56	98	196	(R)
4	59	99	200	(A)
5	58	99	200	(A)
6	60	98	200	(A)

Fonte: Autoria Própria (2020).

**APÊNDICE H – PAVERS – ABSORÇÃO DE ÁGUA DO BLOCO
INTERTRAVADO DE CONCRETO POROSO**

Tabela H-1 – Absorção de água do bloco intertravado poroso

Amostra	Massa seca (Kg)	Massa saturada (Kg)	Absorção de água (%)	Absorção de água média (%)
01	2,2630	2,4530	8,40	
02	2,2970	2,4715	7,60	8,21
03	2,3110	2,5105	8,63	

Fonte: Autorial própria